

بررسی عددی اثر تشعشعی گاز عملگر بر رفتار حرارتی مشعل متخلخل تابشی

محمد مهدی کشتکار^{۱*}، سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب^۲

دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان

(* نویسنده مخاطب: mkeshtkar54@yahoo.com)

چکیده

در کار صورت گرفته به بررسی عملکرد یک مشعل متخلخل تحت اثر یک گاز عملگر تشعشعی پرداخته می شود. مشعل های متخلخل بر اساس 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 غیر یکنواخت سهموی شبیه سازی می گردد. از آنجا که محیط متخلخل، یک جسم خاکستری در نظر گرفته می شود، علاوه بر تبادل حرارتی جابجایی 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 دو بعدی و با در نظر گرفتن هر سه نوع انتقال حرارت جابجایی، هدایت و تشعشع در محیط متخلخل و جریان گاز صورت گرفته است. جهت یافتن توزیع شار حرارت تشعشعی در محیط متخلخل از روش جهات 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 گاز عملگر تشعشعی 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 محققین دیگر مقایسه شده است و تطابق خوبی مشاهده گردیده است.

واژه‌های کلیدی: گاز عملگر تشعشعی - روش جهات مجزا - مشعل متخلخل.

۱- مقدمه

در سالهای 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 دینا میکی توان بیشتر و آلاینده‌گی کمتر می باشد. در این نوع مشعل ها از یک محیط متخلخل جهت تقویت احتراق استفاده می شود. استفاده از مشعل متخلخل دارای مزایای زیادی می باشد که یکی از آنها پیش گرم شدن مخلوط سوخت و هوای ورودی به مشعل توسط هدایت و تشعشع ناشی از بالا دست ناحیه احتراق در ماتریس متخلخل می باشد [۱ و ۲].

از آنجا که جهت توسعه و بهینه سازی مشعل های متخلخل تابشی بایستی از مدل های فیزیکی و ریاضی دقیق تری استفاده گردد، 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 تاکنون سواته [۳]، از یک مدل یک بعدی جهت بررسی اثرات دبی جرمی و ضریب انتقال حرارت بر رفتار حرارتی مشعل متخلخل استفاده کردند. آنها دریافتند که افزایش نرخ دبی جرمی باعث افزایش نرخ آزادسازی حرارت می گردد. تانگ و سواته [۴] با در نظر گرفتن هدایت، جابه جایی و تشعشع به بررسی یک مشعل متخلخل در مختصات یک بعدی پرداختند. آنها جهت مدل کردن انتقال حرارت تابشی از روش ها رمونیک های 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

۱- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی کرمان

۲- استاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان

گاز و جامد دارد. 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 گردد. آنها هم چنین نشان دادند که ضریب هدایت حرارتی کم فاز جامد، نسبت پخش کم و ضریب انعکاس بالای محیط ورودی باعث افزایش راندمان در مشعل های متخلخل می گردد [۵].

تحقیق دیگری با فرضیات ساده کننده در مختصات دو بعدی 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. هم چنین یک مطالعه عددی و آزمایشی در مختصات دو بعدی 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 ساده کننده مطالعه ای در زمینه احتراق و انتقال حرارت در مشعل های متخلخل انجام دادند. آنها دریافتند که حداکثر مقدار دما، با افزایش ضریب انحراف لایه افزایش می یابد.

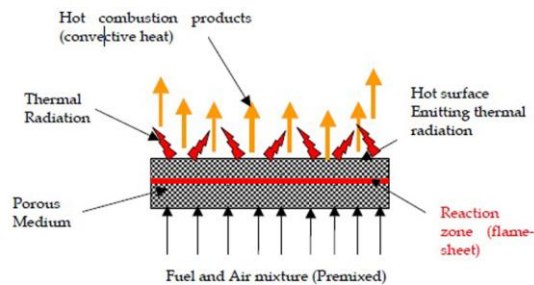
از آنجا که جهت بررسی دقیق تر مشعل های متخلخل نیاز به یافتن توزیع شار حرارتی تابشی در محیط متخلخل می باشد، روشهای متعددی تاکنون مورد استفاده قرار گرفته اند. اولین شبیه سازی دو بعدی مشعل های متخلخل، با در نظر گرفتن تشعشع حجمی و همچنین اثرات پخش تشعشعی توسط تالکدار و همکارانش [۹] صورت گرفت. آنها در ادامه کار، حالت های پایا و گذرای سیستم را بررسی کردند. معادلات فازهای گاز و جامد همزمان حل شدند و جهت یافتن توزیع شار حرارتی تابشی از روش هارمونیک های کرولی استفاده شد [۱۰]. لازم به ذکر است که روش هارمونیک های کرولی به محاسبات پیچیده و طولانی جهت یافتن توزیع شار تابشی در یک محیط صادر کننده، جذب کننده و پخش نیاز دارد.

هم چنین یک مطالعه دو بعدی در مختصات استوانه ای توسط مالیکو و پیرا [۱۱] جهت آنالیز مشعل های متخلخل صورت گرفت. آنها خواص تشعشعی محیط متخلخل را بر عملکرد مشعل متخلخل مطالعه کردند و نشان دادند که پروفیل های دما بسیار به خواص تشعشعی وابسته می باشد، مخصوصاً زمانی که نسبت پخش افزایش یابد، راندمان مشعل کاهش می یابد. شبیه سازی حرارتی یک مشعل متخلخل توسط نویسندگان مقاله حاضر با استفاده از روش جهات مجزا در مختصات دو بعدی مستطیلی نیز انجام گردیده است [۱۲]. در آن کار از اثر تشعشعی گاز در مقایسه با تشعشع فاز جامد صرف نظر شده و هم چنین یک ناحیه تولید حرارت غیر یکنواخت به عنوان چشمه حرارتی مشعل در نظر گرفته شده است. با بررسی نتایج مشخص گردید که استفاده از لایه های متخلخل با نسبت ظرافت بالاتر و نسبت پخش کمتر راندمان مشعل متخلخل افزایش می یابد.

در تمامی کارهای قبلی از اثر تشعشعی گاز عملگر در مشعل متخلخل صرف نظر شده است و پدیده تشعشع تنها بین ذرات محیط متخلخل در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است در کار حاضر، اثر تشعشعی گاز عملگر نیز در محاسبات منظور شده است و از روش جهات مجزا جهت محاسبه توزیع شار تابشی در مشعل متخلخل تابشی استفاده گردیده است. گنجعلیخان نسب و فلاح [۱۳] اثر تشعشعی گاز عملگر را بر رفتار حرارتی یک لایه بازیافت متخلخل به صورت یک بعدی بررسی کردند. در آن کار مشخص گردید که اگر گازهای تشعشعی از قبیل دی اکسید کربن یا بخار آب به همراه گاز ورودی وارد لایه شود، اثر تشعشع گاز عبوری بر عملکرد لایه ناچیز نخواهد بود بویژه 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 گردید. هم چنین در کار دیگری، گنجعلیخان نسب و مرامی ساران [۱۴] مشخصات حرارتی یک مبدل حرارتی متخلخل چند لایه را با در نظر گرفتن اثرات تشعشعی گاز عبوری بررسی کردند. آنها با استفاده از روش دو شار حرارتی و در مختصات یک بعدی معادلات حاکم را در حالت گذرا حل کردند و دریافتند اثر تشعشعی گاز عبوری بویژه در دماهای بالا محسوس می باشد.

مطالعه کارهای صورت گرفته قبلی نشانگر این واقعیت است که رفتار حرارتی یک مشعل متخلخل تحت اثر عبور یک گاز عملگر تشعشعی تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا هدف از مطالعه حاضر، ادامه کار قبلی نویسندگان مقاله [۱۲] می باشد که رفتار حرارتی مشعل متخلخل را با لحاظ کردن اثر تشعشعی گاز عملگر مورد مطالعه قرار می دهد.

اصول عملکرد یک مشعل متخلخل در شکل ۱ نشان داده شده است. مخلوط سوخت و هوای گازی، وارد محیط متخلخل می شود و احتراق روی می دهد. نتیجتاً، آنتاپی گاز عبوری بالا رفته و باعث ایجاد تشعشع حرارتی می گردد.



شکل ۱: اصول عملکرد مشعل متخلخل تابشی

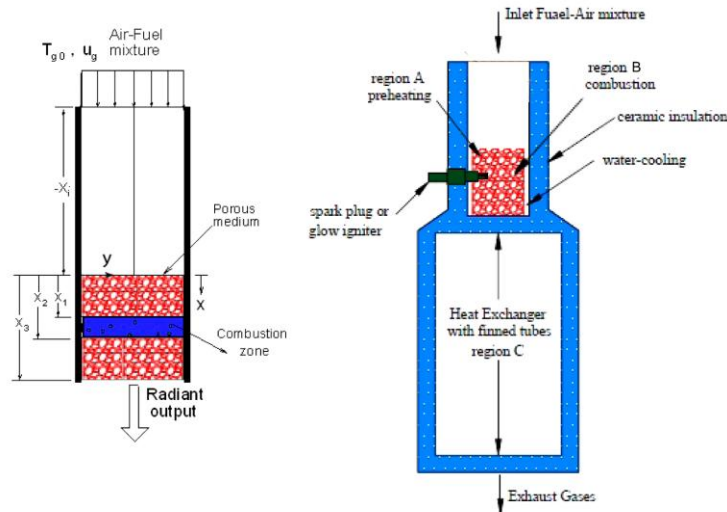
همانگونه که قبلاً نیز در قسمت های قبلی ذکر گردید، هدف اصلی مقاله حاضر، بررسی اثر تشعشی گاز عملگر بر رفتار حرارتی مشعل متخلخل تابشی در میدان مستطیلی دو بعدی و با لحاظ کردن اثرات پخش تشعشی و هم چنین در نظر گرفتن یک مدل سهموی جهت احتراق می باشد. معادلات حاکم شامل دو مطالعه انرژی فازهای گاز و جامد به صورت عددی و به طور همزمان حل می گردند و جهت یافتن توزیع شار حرارت تابش از روش جهات مجزا استفاده می گردد. جهت بررسی صحت نتایج بدست آمده، نتایج حل عددی با نتایج بدست آمده توسط محققین قبلی به صورت تئوری و آزمایشی مقایسه گردیده است و تطابق مناسبی حاصل گردیده است.

۲- توصیف مساله

مساله مورد بحث، بررسی رفتار حرارتی یک مشعل متخلخل در مختصات دو بعدی مستطیلی و با در نظر گرفتن اثر تشعشی گاز عملگر می باشد. مدل مورد استفاده به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است و مشابه مدلی است که قبلاً توسط نویسندگان مقاله در مرجع [۱۲] مورد استفاده قرار گرفته است.

المانی که به عنوان مشعل متخلخل عمل می کند در فاصله $0 < x < x_3$ قرار گرفته است. همانگونه که در این شکل مشاهده می شود، مشعل مورد نظر از سه ناحیه اصلی شامل یک ناحیه پیش گرمکن (ناحیه A)، یک ناحیه احتراق (ناحیه B) و یک مبدل حرارتی (ناحیه C) تشکیل شده است.

تمام خواص ترموفیزیکی فازهای گاز و جامد ثابت فرض شده اند و لایه از سمت بالا دست و پایین دست تحت تابش تشعشعات خارجی B_1 و B_2 که به سیستم اعمال می شوند، قرار می گیرد. قابل ذکر است در مدل مورد نظر اثرات هدایت و تشعشع در فازهای گاز و جامد و انتقال حرارت جابه جایی بین ذرات جامد و گاز در نظر گرفته شده است. ناحیه تولید حرارت به صورت غیر یکنواخت و به شکل تابعی سهموی (در جهت y) در نظر گرفته شده و نشان دهنده شعله در مشعل می باشد، به طوریکه مقدار حداکثر حرارت آزاد شده در خط مرکزی مشعل و مقدار حداقل آن نزدیک دیوارهای مشعل ایجاد می شود.



شکل ۲: شماتیک مشعل متخلخل تابشی

۳- فرمول بندی

۳-۱- معادلات حاکم

به علت فرض عدم تعادل حرارتی بین فازهای گاز و جامد، معادلات انرژی جداگانه ای برای فازهای گاز و جامد در نظر گرفته شده است. این دو معادله به هم وابسته می باشند و به صورت زیر نوشته می شوند:

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

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

جهت حل معادلات فوق، بایستی ابتدا توزیع شار حرارتی تشعشعی مشخص گردد. بنابراین جهت مشخص کردن عبارت $\nabla \cdot q$ که به دلیل تشعشع در معادلات فوق ظاهر می گردد، 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 فوق k_a ضریب جذب، $I(r, \Omega)$ شدت تابش جهت دار، Ω جهت تابش و I_b شدت تابش جسم سیاه می باشد. جهت تعیین $I(r, \Omega)$ معادله انتقال حرارت تابشی زیر برای یک محیط خاکستری بایستی حل گردد:

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

که در این معادله σ_s و $\phi(\Omega' \rightarrow \Omega)$ به ترتیب ضریب پخش و تابع فاز می باشند. همچنین عبارت اول نشانگر تغییر شدت تابش I در یک جهت مشخص \hat{s} و معادل مجموع تشعشعات ناشی از صدور (عبارت اول در سمت راست)، جذب و پخش خروجی در جهت \hat{s} (عبارت دوم سمت راست) و پخش ورودی در جهت \hat{s} (عبارت سوم سمت راست) می باشد. نسبت پخش به عنوان نسبت بین ضرایب پخش و انحراف تعریف می شود. لازم به ذکر است هر ناحیه در محیط متخلخل، خاکستری، همگن و ایزنتروپیک ($\phi=1$) فرض می گردد [۱۵].

در مختصات دو بعدی مستطیلی، معادله انتقال حرارت تابشی را برای هر جهت مجزای m می توان 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 β ضریب انحراف و m, m' بیانگر جهات خروجی و ورودی تابش می باشند. μ^m, ζ^m نیز کسینوس های هادی یک جهت مشخص می باشند. به این ترتیب در روش جهات مجزا معادله (۳) را می توان 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 جهات مجزا و وابسته به درجه تقریب N می باشد که توسط رابطه $M = N(N+2)/2$ به یکدیگر مرتبط می شوند. لازم به ذکر است در مساله مورد بحث از تقریب S_6 ($N=6$) استفاده گردیده است. جهت مطالعه پارامتریک مساله، مقادیر گروههای بدون بعدی به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \rho_g u_g c_g T_i / \dot{Q} L_x, \quad \Pi_2 = h A T_i / \dot{Q}, \quad \Pi_3 = k_g T_i / \dot{Q} L_x^2, \quad \Pi_4 = k_p T_i / \dot{Q} L_x^2, \quad \Pi_5 = h L_x / k_p \\ \Pi_6 &= \varepsilon k_p / \sigma T_i^3 L_x, \quad \zeta_{fl} = (x_1 + x_2) / x_3, \quad p_a = A_s \sigma T_i^4 / \dot{Q}, \quad Q = q / \dot{Q} L_x \end{aligned}$$

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

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

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

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

اکنون بایستی معادلات (۷) و (۸) و معادله انتقال حرارت تابشی (۵) به صورت همزمان توسط شرایط مرزی مناسب حل گردند.

۲-۳- شرایط مرزی

برای جریان گاز در خارج از محیط متخلخل، می توان 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 هم چنین فرض عایق بودن دیواره های مشعل، شرایط مرزی جهت معادله انرژی گاز می باشند:

$$\begin{aligned} \left[\theta_g \right]_{\xi_x=0} &= \theta_{gi} & \left[\frac{\partial \theta_g}{\partial \xi_y} \right]_{\xi_y=0} &= 0 \\ \left[\frac{\partial \theta_g}{\partial \xi_x} \right]_{\xi_x=1} &= 0 & \left[\frac{\partial \theta_g}{\partial \xi_y} \right]_{\xi_y=1} &= 0 \end{aligned}$$

جهت معادله انرژی فاز جامد، دو موازنه انرژی در محل های ابتدایی و انتهایی لایه و همچنین فرض عایق بودن دیواره، شرایط مرزی مورد استفاده می باشند:

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

نهایتاً، جهت حل معادله انتقال حرارت تابشی، با فرض انعکاسی بودن دیواره های کانال ($\rho=1$)، شرایط مرزی زیر در دیواره های بالا و پایین مشعل ($\xi_y = 0, 1$) مورد استفاده قرار می گیرند:

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

از طرفی همانگونه که قبلاً نیز ذکر شد، دو شدت تابش خارجی B_1 و B_2 به ترتیب از سمت بالا دست و پایین دست به سیستم اعمال می شوند. بنابراین شرایط مرزی مناسب برای قسمت های $\xi_x = 0, 1$ به صورت زیر می باشند:

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

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

۴- مراحل حل عددی

پس از آنکه معادلات حاکم توسط یک شبکه مش بندی با ساختار یکنواخت و به روش تفاضل محدود گسسته شدند، عدم وابستگی شبکه برای چندین شبکه مورد بررسی قرار گرفت و نهایتاً یک شبکه یکنواخت 120×40 به عنوان دامنه حل در نظر گرفته شد. با استفاده از روش تفاضل مرکزی مشکل تفاضل محدود معادلات انرژی گاز و جامد نوشته شده و معادله انتقال

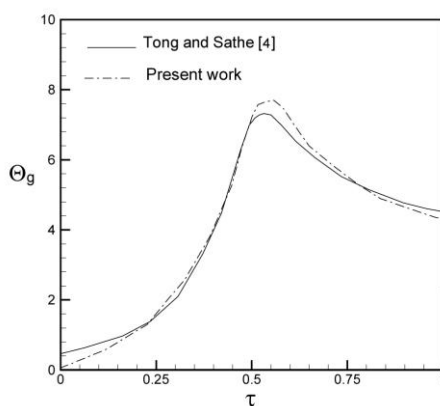
حرارت تابشی نیز بر اساس روش جهات مجزا و به روش سعی و خطا حل می گردد. به طور خلاصه مراحل حل مساله را به صورت زیر می توان بیان کرد:

- ۱- تقریب اولیه ای برای توزیع دمای گاز و محیط متخلخل فرض می شود.
- 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 می گردد.
- ۳- با استفاده از مقادیر شدت تابش بدست آمده در مرحله ۲، معادله انرژی فاز جامد جهت تعیین توزیع دمای ماتریس متخلخل حل می گردد.

۴- شکل گسسته معادله انرژی فاز گاز جهت تعیین توزیع دمای گاز (θ_g) در هر گره حل می گردد. در حل مساله 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 می گردند. جهت حل مساله نیز از یک کد محاسباتی که به زبان MATLAB نوشته شده است استفاده گردیده است.

۵- بررسی صحت نتایج

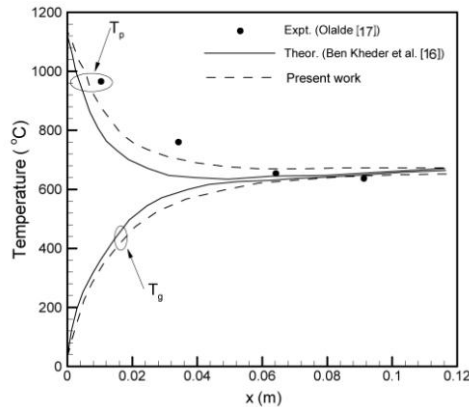
در کار حاضر، رفتار حرارتی یک مشعل متخلخل، زمانیکه گاز عملگر تشعشعی باشد در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله اول نتایج عددی بدست آمده با نتایجی که توسط تانگ رسانه [۴] بدست آمده در شرایط یکسان مقایسه گردیده است. شکل ۳ نشانگر مقایسه توزیع دمای گاز مساله مورد بحث با نسبت ظرافت کم، جهت نزدیک شدن به حالت یک بعدی و حل عددی یک بعدی توسط مرجع [۴] می باشد. همانگونه که از این شکل مشاهده می گردد حداکثر دمای گاز در داخل ناحیه احتراق اتفاق می افتد و سپس به دلیل تبدیل آنتاپی گاز به تشعشع حرارتی، دمای گاز کاهش می یابد. به هر صورت تطابق مناسبی بین نتایج عددی بدست 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

هم چنین به منظور مقایسه نتایج بدست آمده از کار انجام شده، سیستم با حذف عبارت چشمه حرارتی به صورت یک لایه بازیافت حرارت در نظر گرفته شده و نتایج تحت شرایط یکسان، که در مرجع [۱۲] آمده است با نتایج عددی بن خدر [۱۶] و نتایج تجربی اولاد [۱۷] مقایسه گردیده است.

نتیجه این مقایسه در شکل ۴ برای توزیع دمای گاز و لایه نشان داده شده است. هم چنین در این بررسی نیز از اثر تشعشع گاز عملگر صرف نظر شده است. تطابق قابل قبولی بین نتایج بدست آمده با آنچه که به صورت عددی توسط مرجع [۱۶] و آنچه که به صورت تجربی توسط مرجع [۱۷] بدست آمده، مشاهده می گردد.



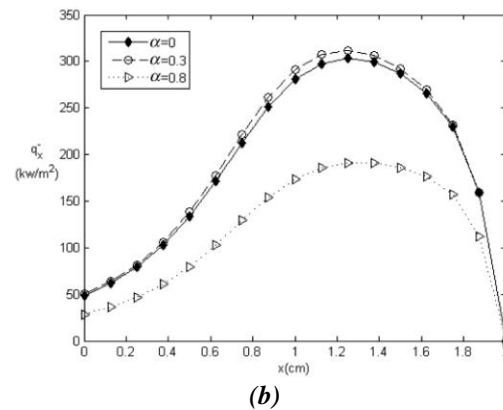
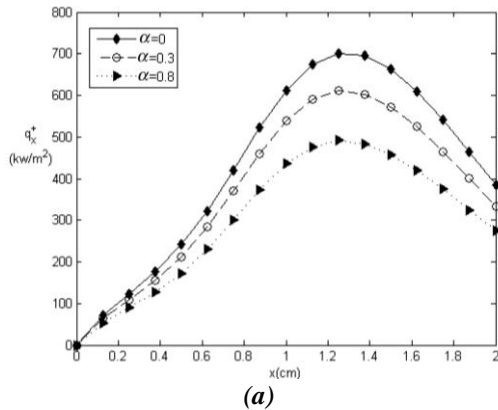
شکل ۴: توزیع دمای گاز و ماتریس متخلخل در طول یک لایه باز یافت

۶- نتایج

در کار حاضر، اثر تشعشعی بودن گاز عملگر بر رفتار حرارتی یک مشعل متخلخل دو بعدی در شرایط مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل ۲ نمایانگر شماتیکی از مشعل مورد نظر می باشد. قابل ذکر است در تمام حالات، L_x ثابت نگه داشته می شود و مقدار این پارامتر تقریباً ۲cm در نظر گرفته می شود. هم چنین ارتفاع محیط متخلخل، L_y برابر ۴cm فرض گردیده است. ناحیه احتراق با ضخامت $0.1L_x$ نیز در وسط لایه متخلخل قرار گرفته است. توزیع شار حرارتی تشعشعی 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 می باشد که پارامتر مهمی در راندمان مشعل های متخلخل تابشی می باشد.

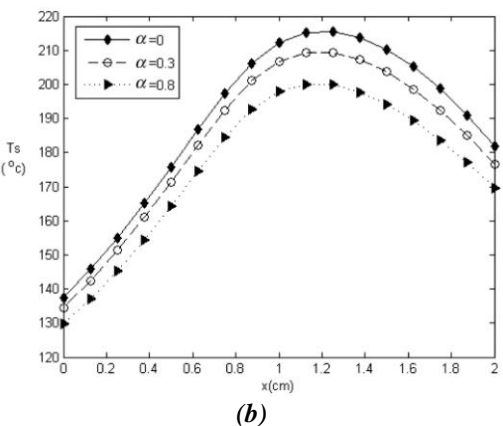
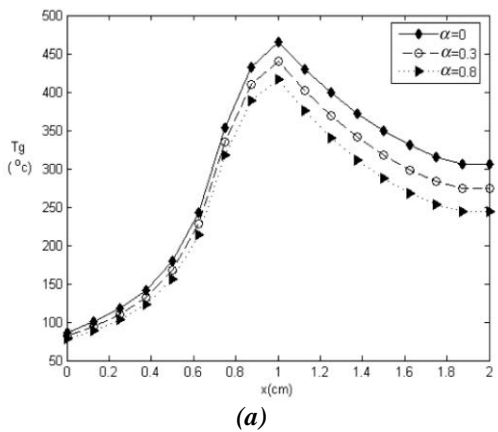
همانگونه که از شکل ۵(a) مشاهده می گردد حداکثر مقدار q_x^+ در خارج از ناحیه احتراق اتفاق می افتد. هم چنین مشاهده می گردد که وجود گاز عملگر تشعشعی باعث کاهش حداکثر مقدار شدت شار q_x^+ در جهت پایین دست و کاهش مقدار شار خروجی از مشعل می گردد. بنابراین می توان نتیجه گرفت زمانی که گاز عملگر در مشعل متخلخل تابشی غیر تشعشعی باشد، مشعل دارای راندمان بیشتری نسبت به حالتی که گاز عملگر تشعشعی باشد، خواهد داشت.

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



شکل ۵: توزیع شار حرارتی تابشی در خط میانی مشعل متخلخل تابشی در سه مقدار مختلف ضریب تشعشی 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 نمایانگر مقایسه عددی دمای فازهای گاز و جامد برای ضرایب مختلف تشعشع گاز می باشد. 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.



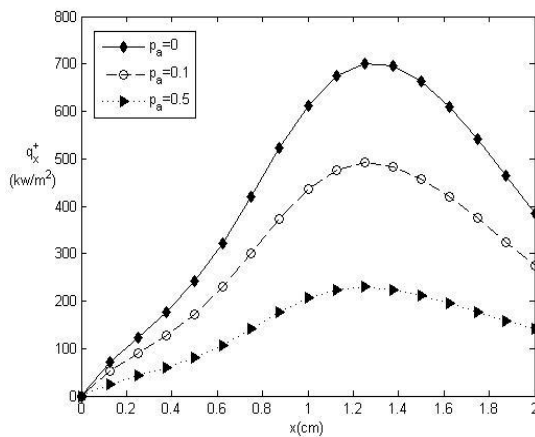
شکل ۶: توزیع دمای گاز و لایه در خط میانی مشعل متخلخل تابشی در سه مقدار مختلف ضریب تشعشی گاز
($\Pi_1 = 0.014, \Pi_2 = 1, \Pi_3 = 2.5 \times 10^{-4}, \Pi_4 = 0.02, \Pi_5 = 5, \Pi_6 = 60, p_a = 0.1, \omega = 0.5$)

همانگونه که در این شکل مشاهده می گردد دمای گاز در ناحیه احتراق اتفاق می افتد و در ناحیه بالا دست جریان نیز به دلیل جذب تشعشع از لایه مخلوط گازی پیش گرم می شود. هم چنین از این شکل مشاهده می گردد که توزیع دمای گاز در پایین دست ناحیه احتراقی بیشتر از ناحیه بالادست احتراق تحت تاثیر ضریب تشعشع گاز قرار می گیرد. به طوریکه از شکل ۶(a) مشاهده می گردد افزایش در ضریب تشعشع گاز عملگر در مقادیر بزرگتر α ، باعث کاهش دمای گاز در طول مشعل خواهد شد.

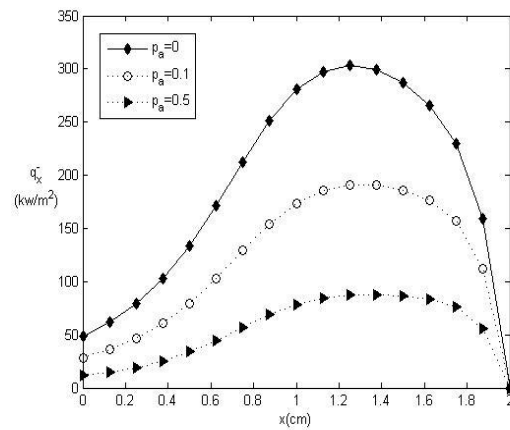
تغییر دمای لایه متخلخل نیز در طول لایه، برای سه مقدار مختلف ضریب تشعشع گاز در شکل ۶(b) نشان داده شده است. در این شکل کاملاً مشخص است که کاهش ضریب تشعشع گاز عملگر باعث افزایش دمای لایه متخلخل خواهد شد.

همانگونه که قبلاً ذکر شد، در بسیاری از کارهای تحقیقی مشابه در زمینه آنالیز مشعل های متخلخل، فاز گاز به عنوان یک محیط غیر تشعشعی در نظر گرفته شده است. در صورتیکه همانگونه که اشکال ۵ و ۶ نشان می دهند کاملاً واضح است که تشعشع گاز پارامتر مهم و اثرگذاری بر رفتار حرارتی مشعل های متخلخل می باشد.

با مراجعه به معادلات انرژی فازهای گاز و جامد (معادلات ۷ و ۸)، مشاهده می گردد اثر تشعشع گاز عملگر که در آخرین عبارت این معادلات قرار گرفته است ممکن است توسط پارامتر p_a نیز تغییر کند. همانطوریکه مشاهده می گردد برای مقادیر بالاتر این پارامتر، توزیع دمای گاز و لایه بیشتر تحت تاثیر تشعشع گاز قرار می گیرد. جهت مطالعه اثر پارامتر p_a بر توزیع دمای گاز و لایه و هم چنین توزیع شار حرارتی تابشی در طول مشعل، اشکال ۷ و ۸ ترسیم گردیده اند.



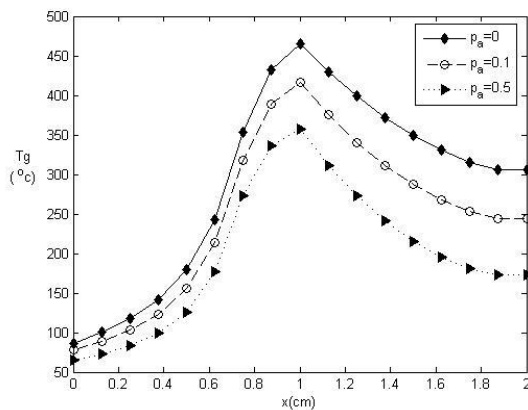
(a)



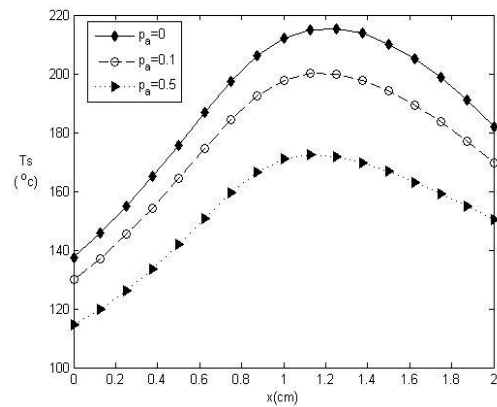
(b)

شکل ۷: توزیع شار حرارتی تابشی در خط میانی مشعل متخلخل تابشی در سه مقدار مختلف پارامتر بی بعد p_a

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



(a)



(b)

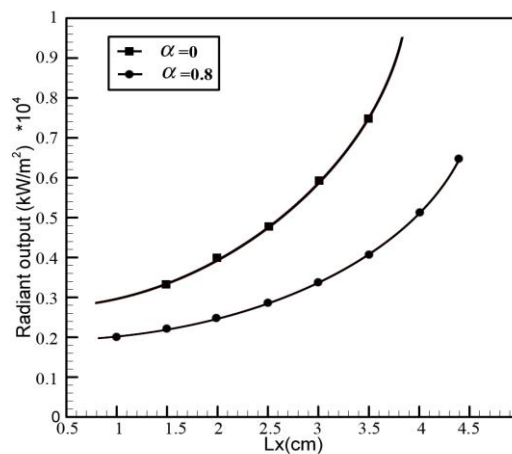
شکل ۸: توزیع دمای گاز و لایه در خط میانی مشعل متخلخل تابشی در سه مقدار مختلف پارامتر بی بعد p_a

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

از شکل ۷ مشاهده می گردد که مقادیر شار حرارتی تابشی هم در جهت پایین دست و هم بالا دست، یعنی q_x^- و q_x^+ با افزایش پارامتر p_a کاهش می یابند.

این رفتار با آنچه که قبلاً در شکل ۵ نشان داده شده است کاملاً در یک راستا می باشد. هم چنین شکل ۸ نشان می دهد که مشعل متخلخل با مقادیر بیشتر پارامتر p_a ، دارای کارکرد سردتری نسبت به زمانی که پارامتر p_a کم باشد خواهد بود. این مطلب با آنچه که در شکل ۶ بدست آمده نیز در توافق کامل می باشد.

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 گردد 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، فرآیند تبدیل انرژی بین آنتالپی گاز و تشعشع حرارتی با نرخ بیشتری اتفاق می افتد. به طوریکه مشعل های متخلخل با ضخامت لایه بیشتر، مقادیر تشعشع خروجی بیشتر و در نتیجه راندمان بالاتری خواهند داشت. هم چنین 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

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

۷- نتیجه گیری

یک مطالعه عددی انتقال حرارت در دامنه حل دو بعدی 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 جداگانه ای مشخص گردیده و روش جهات مجزا جهت تعیین توزیع شار حرارتی تابشی به کار گرفته شده است. احتراق با در نظر گرفتن یک ناحیه تولید حرارت غیر یکنواخت سهموی در وسط لایه متخلخل مدل شده و مشاهدات زیر به طور خلاصه از مطالعه حاضر حاصل گردیده است:

- ۱- مقادیر کوچکتر ضریب تشعشع گاز عملگر منجر به افزایش تابش خروجی از مشعل و افزایش راندمان می گردد.
- ۲- مشاهده گردید زمانی که مقدار پارامتر بی بعد p_a افزایش می یابد، تشعشع خروجی و هم چنین مقدار تلفات حرارتی از مشعل متخلخل تابشی کاهش می یابد.
- ۳- نتایج محاسبات نشان می دهد که استفاده از لایه های متخلخل با ضخامت بیشتر و ضریب تشعشع گاز کمتر باعث افزایش تشعشع خروجی از مشعل و در نتیجه افزایش راندمان می گردد.

- 1- Malico, I., Zhou, X.Y. and Pereira, J. C. F., "Two dimensional Numerical study of combustion and pollutants in porous burner", Combust. Sci. and Tech, Vol. 152, pp. 57-79, 2000.
- 2- Hayashi, T. C., Malico, I., Pereira, J.C.F., "Three-dimensional modeling of a two-layer porous burner for household applications", J. Computers & Structures, Vol. 82, pp. 1543-1550, 2004.
- 3- Takeno, T., Sato, K., "Heat transfer characteristics of porous radiant burners", Combust. Sci. Technol., Vol. 20, pp. 73 – 84, 1979.
- 4- Sathe, S. B., Tong, T.W., "A numerical analysis of heat transfer and combustion in porous radiant burners", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33, pp. 1331-1338, 1990.
- 5- Tong, T. and Sathe, S., "Heat transfer characteristics of porous radiant burners", Trans. Of ASME, J. Heat Transfer, Vol. 113, pp. 423–428, 1991.
- 6- Hackert, C.L., Ellzey, J.L., "Combustion and heat transfer in model two-dimensional porous burners", Combustion and Flame, Vol. 116, pp. 177-185, 1999.
- 7- Brenner, G., et al., "Numerical and experimental investigation of matrix-stabilized methane/air combustion in porous inert media", J. Combust. Flame, Vol. 123, pp. 201–213, 2000.
- 8- Mishra, S. C., et al., "Heat transfer analysis of a two dimensional rectangular porous radiant burner", J. Heat and Mass Transfer, Vol. 33, pp. 467-474, 2006.
- 9- Talukdar, P., et al., "Heat transfer characteristics of a porous radiant burner under the influence of a 2–D radiation field", J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, Vol. 1-11, 2003.
- 10- Talukdar, P., et al., "Heat transfer characteristics of a porous radiant burner under the influence of a 2–D radiation field", J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, Vol. 1-11 ,2003.
- 11- Malico, I. and Pereira, J. C. F., "Numerical study on the influence of radiative properties in porous media combustion", J. Heat Transfer, Vol. 123, pp. 951-957, 2001.
- 12- Keshtkar, M.M. and Gandjalikhan Nassab, S.A., "Theoretical analysis of porous radiant burners under 2-D radiation field using discrete ordinates method", J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, Vol. 32, pp.117-125, 2009.
- 13- Gandjalikhan Nassab, S. A., Fallah, M., "Study of energy recovery by means of porous media considering gas radiation effect". Proc. Instn. Mech. Engrs, part A: J. Power and Energy, Vol. 220, pp. 509–513, 2006.
- 14- Gandjalikhan Nassab, S. A., Maramisaran, M., "Transient numerical analysis of a multi-layered porous heat exchanger including gas radiation effect", J. Thermal Sciences, Vol. 48, pp. 1586-1595, 2009.
- 15- Modest, M. F., *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, USA, 1993.
- 16- Ben Kheder, C., Cherif, B. and Sifaaoui, M.S., "Numerical study of transient heat transfer in semitransparent porous medium", Renewable energy, Vol. 27, pp. 543-560, 2002.
- 17- Oladed, G. *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.