

آنالیز حرارتی مشعلهای متخلخل تابشی در حالت گذرا

خسرو لاری^۱، سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب^۲

بخش مهندسی مکانیک - دانشگاه شهید باهنر کرمان
ganj110@mail.uk.ac.ir

چکیده

در کار حاضر رفتار گذرای مشعلهای متخلخل و چگونگی کارکرد این گونه سیستمها با پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تعیین مشخصه های حرارتی، از حل عددی معادلات انرژی برای جریان گاز و محیط متخلخل و معادلات انتقال حرارت تشعشعی بر پایه مدل دو شار حرارتی (Two-flux model) استفاده شده است. فرآیند احتراق انجام شده در داخل این گونه مشعلها با جایگزینی یک منبع تولید حرارت با قدرت یکنواخت در نظر گرفته شده است. نتایج شامل توزیع درجه حرارت و شار تشعشعی در داخل مشعل در حالت گذرا و دائمی و همینطور تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. انطباق بین نتایج کارحاضر و نتایج دیگر محققین که از مدلهای تشعشعی متفاوتی استفاده کرده اند رضایت بخش می باشد.

واژه های کلیدی: مشعلهای متخلخل - مدل دو شار حرارتی - شرایط گذرا.

۱- مقدمه

یکی از موضوعات نسبتاً جدیدی که در دو دهه اخیر مورد مطالعه بسیاری از محققین قرار گرفته است، استفاده از مشعلهای متخلخل بجای مشعلهای مرسوم می باشد. مشعلهای متخلخل مزایای بسیاری نسبت به دیگر مشعلهای متداول دارند. از جمله این مزایا بالاتر بودن بازده حرارتی در اثر کاهش اتلاف آنتالپی جریان گاز، از بین بردن نقاط داغ (hot spots) در وسایل منتقل کننده حرارت به علت یکنواخت نمودن گرمادهی و همچنین کاهش تشکیل گازهای NO_x در نتیجه پایین آوردن دمای شعله می باشد. بعلاوه محیط متخلخل سبب می شود تا هوا و سوخت به میزان بیشتر و به صورت یکنواخت تر با یکدیگر مخلوط شوند و فرصت کافی جهت انجام فرآیند احتراق وجود داشته باشد که در نتیجه انتشار CO و هیدروکربنهای نسوخته نیز کاهش می یابد. با این اوصاف در صورت پذیرش و کاربرد اینگونه مشعلها در کاربردهای تجاری، صنعتی و ... فواید آن از جمله کم کردن اتلاف انرژی، بالا بردن طول عمر وسایل انتقال دهنده حرارت و بهبود بخشیدن کیفیت هوا بسیار سودمند خواهد بود.

اولین اقداماتی که در زمینه کاربرد محیط متخلخل در ساختمان دستگاههای با درجه حرارت بالا صورت پذیرفت در خصوص بازیافت انرژی در این گونه سیستمها بوده است که سابقه آن به سال ۱۹۸۲ و مطالعات Echigo[1] برمی گردد. نتایج محاسبات نشان دادند که با نصب یک لایه متخلخل در مسیر عبور جریان گاز داغ خروجی از اگزوز بسیاری از دستگاههای حرارتی، می توان قسمت اعظمی از انرژی حرارتی گاز را بطریق انتقال حرارت جابجایی به محیط متخلخل منتقل نمود و این انرژی دریافتی را بصورت تشعشع به داخل سیستم بازگرداند.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد

۲- استادیار

در مورد مشعلهای متخلخل اولین تحقیقات صورت گرفته به سال ۱۹۸۶ باز می گردد که [2] Echigo و همکاران با در نظر گرفتن یک منبع تولید حرارت در داخل محیط متخلخل پدیده احتراق را شبیه سازی نمودند. در این مطالعه از روش انتگرالی جهت تعیین توزیع شار تشعشی در داخل مشعل استفاده گردید. نتایج نشان داد که پیش گرم شدن مخلوط سوخت و هوا باعث افزایش چشمگیر راندمان مشعل می شود.

در سال ۱۹۹۱، [3] Tong و همکارانش با در نظر گرفتن تخمین یک بعدی و استفاده از روش هارمونیک کروی (Spherical harmonic method) در محاسبه شار تشعشی، مشعلهای متخلخل را بررسی نمودند و دریافتند 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 تأثیر قابل توجهی در شار تشعشی خروجی از مشعل دارد و بر خلاف هدایت حرارتی گاز قابل صرف نظر نمی باشد. در این مطالعه نیز پدیده احتراق توسط جایگزینی یک منبع تولید حرارت با شدت یکنواخت مدل سازی گردید. [4] Brenner و همکاران در سال ۲۰۰۰، با در نظر گرفتن سیستم دو بعدی همراه با مدل سازی پدیده احتراق از طریق حل معادلات حاکم، مشخصه های حرارتی مشعلهای متخلخل را تعیین نمودند. در این کار مدل خاصی جهت تعیین توزیع شار تشعشی استفاده نگردید و از نتایج آزمایش کمک گرفته شد.

در سال ۲۰۰۳، [5] Talukdar و همکاران، جهت آنالیز مشعلهای متخلخل از یک سیستم دو بعدی استفاده نمودند و اثرات پخش انرژی تشعشی توسط محیط متخلخل را نیز در این مطالعه لحاظ کردند. جهت مدل سازی پدیده احتراق، از یک منبع تولید حرارت با شدت یکنواخت استفاده گردید و برای حل معادلات تشعشی از روش [6] Collapsed dimension کمک گرفته شد. قابل ذکر است که روش مذکور محاسبات بسیار پیچیده ای را جهت تعیین شار تشعشی نیاز دارد.

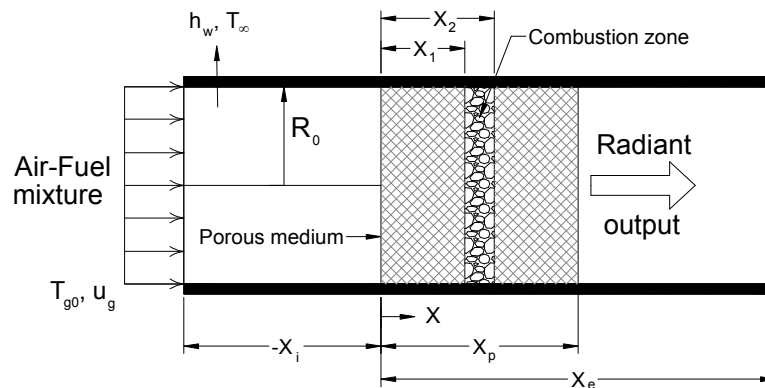
با توجه به این که پدیده انتقال حرارت تشعشی نقش اساسی را در فرآیند احتراق داخل مشعلهای متخلخل دارد استفاده از مدل تابشی مناسب جهت تجزیه و تحلیل این گونه سیستمها از اهمیت زیادی برخوردار است. در کار حاضر سعی شده است که جهت آنالیز مشعلهای متخلخل از مدل دو شار حرارتی جهت تعیین توزیع شار تشعشی استفاده شود. لازم به ذکر است که این مدل در عین سادگی از دقت قابل قبولی برخوردار است [7]. علاوه بر این، نتیجه بررسی مطالعات بعمل آمده در این زمینه نشان می دهد که تا بحال از این روش جهت آنالیز مشعلهای متخلخل در حالت گذرا استفاده نشده است.

در مطالعه حاضر مشخصه های حرارتی مشعلهای متخلخل استوانه ای شکل با در نظر گرفتن یک سیستم یک بعدی و از طریق حل معادلات انرژی برای گاز و لایه متخلخل در حالت گذرا به همراه معادلات دو شار حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. در این معادلات، اثرات هدایت حرارتی و جابه جایی هم برای گاز و هم برای محیط متخلخل در نظر گرفته شده و محیط متخلخل علاوه بر انتقال حرارت جابجایی با جریان گاز قادر است انرژی تشعشی را پخش، جذب و صادر نماید. تنها از اثرات تشعشی گاز در مقایسه با فاز جامد صرف نظر می شود. در این کار پدیده احتراق با در نظر گرفتن یک منبع تولید حرارت با قدرت یکنواخت مدل سازی شده است. جهت بررسی اعتبار مدل بکار گرفته شده و روش حل معادلات، نتایج عددی بدست آمده 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 پارامترهای مختلف از جمله خواص فیزیکی و تشعشی محیط متخلخل بر کارکرد اینگونه مشعلها بخصوص در شرایط راه اندازی مورد مطالعه قرار گیرد.

۲- تئوری

در شکل (۱)، اجزای اصلی یک مشعل متخلخل نشان داده شده است. لایه متخلخل به طول x_p در داخل کانالی با قطر $2R_0$ نصب شده است بطوری که ضخامت لایه نسبت به شعاع کانال کوچک بوده تا تخمین آنالیز یک بعدی صحت داشته باشد. کانال به طول x_i در سمت چپ و طول $(x_e - x_p)$ در سمت راست لایه متخلخل گسترش داده شده است. کانال و لایه متخلخل در زمان صفر در دمای محیط، T_∞ قرار دارند. مخلوط سوخت و هوا از مقطع $x = -x_i$ با دمای یکنواخت T_{g_0}

وارد مجرا می شود. جریان گاز در داخل کانال از نوع اسلاگ (Slug) با سرعت u_g و به صورت آرام و دائمی در نظر گرفته می شود. از اثرات تشعشعی گاز در مقایسه با فاز جامد صرف نظر شده به طوری که پدیده تشعشع فقط در داخل محیط متخلخل و بین ذرات تشکیل دهنده آن برقرار است. موقعیت منبع تولید حرارت که مدل کننده پدیده احتراق می باشد طبق شکل (۱) در محدوده $x_1 < x < x_2$ قرار دارد. گاز داخل کانال از طریق دیواره می تواند با محیط اطراف با دمای T_∞ انرژی حرارتی مبادله نماید.



شکل ۱- شماتیکی از یک مشعل متخلخل

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

$$\phi \rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} (\pi R_0^2) = -\phi \rho_g c_g u_g \frac{\partial T_g}{\partial x} (\pi R_0^2) + \phi \frac{\partial}{\partial x} (k_g \frac{\partial T_g}{\partial x}) (\pi R_0^2) - \phi h_w (T_g - T_\infty) (2\pi R_0) - (1 - \phi) h A (T_g - T_p) (\pi R_0^2) + \phi \dot{Q} \delta(x) (\pi R_0^2) \quad (1)$$

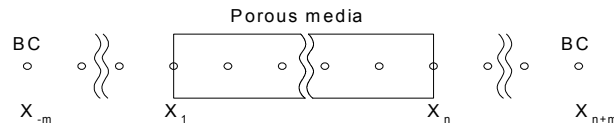
$$(1 - \phi) \rho_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = -\frac{dq_n}{dx} - (1 - \phi) h A (T_p - T_g) + (1 - \phi) \frac{\partial}{\partial x} (k_p \frac{\partial T_p}{\partial x}) \quad (2)$$

$$\frac{dq^+}{dx} = -2\sigma_a q^+ - 2b\sigma_s q^+ + 2\sigma_a \sigma T_p^4 + 2b\sigma_s q^- \quad (3)$$

$$-\frac{dq^-}{dx} = -2\sigma_a q^- - 2b\sigma_s q^- + 2\sigma_a \sigma T_p^4 + 2b\sigma_s q^+ \quad (4)$$

$$q_n = q^+ - q^- \quad (5)$$

برای در نظر گرفتن کامل اثرات هدایت حرارتی در گاز، ناحیه محاسباتی (computational domain) در ابتدا و انتهای لایه متخلخل گسترش داده می شود (شکل ۲). نتایج عددی بدست آمده از حل معادلات به روش تکرار نشان می دهد که برای منظور نمودن کامل اثرات هدایت حرارتی در جریان گاز، بایستی رابطه $m \geq n/5$ بین تعداد نقاط گره ناحیه محاسباتی وجود داشته باشد [8]. توجه شود که در ناحیه $x_{-m} \leq x \leq x_{n+m}$ و $x_n \leq x \leq x_{n+m}$ ، ترم انتقال حرارت جابجایی بین گاز و محیط متخلخل در معادله ۱ مربوط به جریان گاز حذف می شود.



شکل ۲- ناحیه محاسباتی و نقاط گره

در ناحیه ای 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 می توان از ترم هدایت حرارتی در گاز چشم پوشی نمود. بنابراین برای بدست آوردن دمای گاز معادله زیر در حالت دائمی مورد استفاده قرار می گیرد که به صورت تحلیلی قابل حل می باشد.

$$\rho_g c_g u_g \frac{dT_g}{dx} + \frac{2h_w}{R_0} (T_g - T_\infty) = 0 \quad (6)$$

در معادلات ۱ تا ۶ $T, t, x, R_0, A, q, \rho, c, k, h$ و ϕ به ترتیب نشان دهنده دما، زمان، طول، شعاع کانال، سطح مقطع بر واحد حجم جامد، شار تشعشعی، چگالی، ظرفیت حرارتی، ضریب هدایت حرارتی، ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب تخلخل می باشند. زیرنویس های g و p و w به ترتیب برای فاز گاز و فاز جامد و دیواره به کار می رود. ترم $\dot{Q}\delta(x)$ شدت تولید حرارت در واحد حجم می باشد و $\delta(x)$ تابع دلتا (delta function) بوده که بصورت زیر تعریف می شود:

$$\delta(x) = \begin{cases} 1 & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

در معادلات دو شار حرارتی نیز σ_a ، σ_s و b به ترتیب ضریب جذب، ضریب پخش و ضریب انعکاس محیط متخلخل بوده و σ ثابت Stefan-Boltzmann می باشد. پارامترهای q^+ ، q^- شارهای تشعشعی تابیده شده به جهات پایین دست و بالا دست بوده و q_n جمع جبری این دو مقدار می باشد. جهت حل معادلات حاکم، در ابتدا فرم بدون بعد این معادلات با تعریف پارامترهای بدون بعد زیر بدست آمده است:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= \sigma_e x_p & \tau &= \sigma_e x & X &= \frac{x}{x_p} & \theta_{p,g} &= \frac{T_{p,g}}{T_{g_0}} & \Theta &= \frac{T - T_\infty}{T_\infty} \\ \omega &= \frac{\sigma_s}{\sigma_e} & T &= \frac{\sigma T_{g_0}^3 t}{\rho_p c_p x_p} & Q_n &= \frac{q_n}{\sigma T_{g_0}^4} & Pe &= \frac{\rho_g c_g u_g x_p}{k_g} & \delta &= \frac{x_p}{R_0} \\ Nu_g &= \frac{hl}{k_g} & L &= \frac{Ax_p^2}{l} & N_l &= Nu_g L & P &= \frac{h_w}{\rho_g c_g u_g} & P_t &= \frac{h_w x_p}{k_g \sigma_e R_0} \\ N_g &= \frac{k_g \sigma_e}{\sigma T_{g_0}^3} & N_p &= \frac{k_p \sigma_e}{\sigma T_{g_0}^3} & \Gamma &= \frac{\rho_p c_p}{\rho_g c_g} & P_1 &= \frac{\dot{Q} x_p^2}{T_{g_0} k_g} & \xi_{fl} &= \frac{x_1 + x_2}{2x_p} \end{aligned}$$

$$Nu_p = \frac{hx_p}{k_p} \quad R = \frac{\varepsilon \sigma x_p T_{g_0}^3}{k_p} \quad B'_{1,2} = \frac{B_{1,2}}{\sigma T_{g_0}^4}$$

که در پارامترهای فوق Pe و Nu عدد پکلت و ناسلت جریان، τ_0 ضخامت اپتیکی، N_g و N_p پارامترهای هدایت حرارتی، l طول مشخصه لایه متخلخل، Γ نسبت ظرفیت حرارتی لایه متخلخل به ظرفیت حرارتی گاز، N_l نسبت انرژی انتقال یافته بین فاز جامد و گاز بطریق جابجایی به انرژی منتقل شده از طریق هدایت حرارتی گاز، P نسبت انرژی حرارتی انتقال یافته از طریق دیواره کانال به انرژی جریان سیال، ξ_{fl} نشان دهنده موقعیت شعله T, B شار تشعشعی تابیده شده به مشعل و ε ضریب صدور فاز جامد می باشد. با استفاده از این پارامترها، فرم بدون بعد معادلات حاکم بصورت زیر بدست می آید:

$$\frac{\partial \theta_g}{\partial T} = \frac{N_g \Gamma}{\tau_0} \left[-P_e \frac{\partial \theta_g}{\partial X} + \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial X^2} - N_l \left(\frac{1-\phi}{\phi} \right) (\theta_g - \theta_p) - 2P_l \tau_0 (\theta_g - \theta_\infty) + P_1 \delta(X) \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial \theta_p}{\partial T} = - \left(\frac{\tau_0}{1-\phi} \right) \frac{\partial Q_n}{\partial \tau} - \frac{N_g N_l}{\tau_0} (\theta_p - \theta_g) + \left(\frac{N_p}{\tau_0} \right) \frac{\partial^2 \theta_p}{\partial X^2} \quad (8)$$

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

$$-\frac{dQ^-}{d\tau} = -2(1-\omega)Q^- - 2b\omega Q^- + 2(1-\omega)\theta_p^4 + 2b\omega Q^+ \quad (10)$$

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

و در نقاط مرزی ناحیه محاسباتی (X_{n+m} و X_{-m}) معادله انرژی بدون بعد به صورت ذیل بدست می آید:

$$\frac{\partial \theta_g}{\partial X} + 2P\delta(\theta_g - \theta_\infty) = 0 \quad (12)$$

۳- شرایط مرزی

دو شرط مرزی ذیل در زمان $T > 0$ برای حل معادله انرژی مربوط به فاز گاز (معادله ۷) استفاده می شود:

$$X = X_{-m} : \quad \theta_g = \theta'_g \quad (13)$$

$$X = X_{n+m} : \quad \frac{\partial \theta_g}{\partial X} = -2P\delta(\theta_g - \theta_\infty) \quad (14)$$

مقدار θ'_g از حل تحلیلی معادله (۱۲) بدست آمده و بصورت ذیل قابل محاسبه است:

$$\theta'_g = \theta_\infty + (1 - \theta_\infty) \exp(-2P\delta X_{-m}) \quad (15)$$

دو شرط مرزی زیر نیز در زمان $T > 0$ برای حل معادله انرژی مربوط به فاز جامد (معادله ۸) مورد استفاده قرار

می گیرد:

$$X = X_1 : \quad \frac{\partial \theta_p}{\partial X} = Nu_p (\theta_p - \theta_g) + R(\theta_p^4 - \theta_i^4) \quad (16)$$

$$X = X_n : \quad -\frac{\partial \theta_p}{\partial X} = Nu_p (\theta_p - \theta_g) + R(\theta_p^4 - \theta_e^4) \quad (17)$$

θ_e و θ_i دمای بدون بعد محیط در ورودی و خروجی کانال می باشد. شرایط مرزی زیر نیز در ابتدا و انتهای لایه متخلخل در زمان $T > 0$ برای محاسبه شار تشعشعی بالا دست و پایین دست به کار می رود:

$$Q^+(X_1) = B'_1; \quad Q^-(X_n) = B'_2 \quad (19)$$

و در نهایت شرایط اولیه برای حل معادلات (۷) و (۸) به صورت زیر اعمال می شوند:

$$T = 0 : \quad \theta_g = 1 \quad ; \quad \theta_p = \theta_\infty \quad (20)$$

۴- روش حل

به منظور تعیین رفتار حرارتی مشعلهای متخلخل، داشتن توزیع درجه حرارت گاز و لایه متخلخل θ_g و θ_p 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 (۷) تا (۱۰) به طور همزمان بدست می آید. برای حل عددی معادلات (۷) و (۸) که به صورت معادله دیفرانسیل جزئی می باشند از روش کرانک-نیکلسون (Crank-Nicolson) برای بدست آوردن فرم اختلاف محدود استفاده می شود. بر این اساس روش مجزاسازی برای هر یک از ترمهای این معادلات به صورت ذیل می باشد:

$$\frac{\partial \theta_g}{\partial T} = \frac{\theta_{g_i}^{n+1} - \theta_{g_i}^n}{\Delta T}$$

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

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

معادلات (۹) و (۱۰) نیز که از نوع معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه یک می باشند به روش رانج کوتای مرتبه چهارم (Runge-Kutta) حل می شوند.

جهت داشتن نتایجی که مستقل از تعداد گره های ناحیه محاسباتی باشد، از ۱۴۰ نقطه گره با فاصله یکنواخت مطابق با شکل (۲) 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 می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- در زمان اولیه $T=0$ ، دمای لایه متخلخل در هر یک از نقاط گره طبق شرط مرزی (۲۰) برابر با دمای محیط

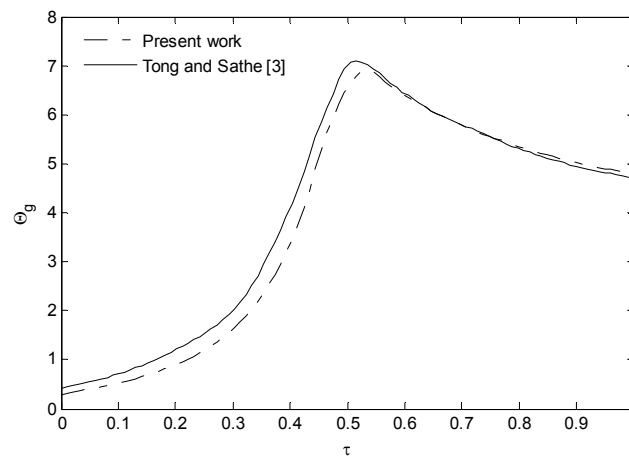
میباشد، بنابراین معادلات (۹) و (۱۰) به روش رانج کوتا به طور همزمان قابل حل می باشند تا مقادیر Q^+ و

Q^- در هر یک از نقاط لایه متخلخل بدست آید.

- ۲- با استفاده از فرم اختلاف محدود مربوط به معادله (۸)، مقادیر θ_p در پله زمانی بعدی محاسبه می شود.
- ۳- معادله (۷) با استفاده از مقادیر θ_p بدست آمده از مرحله قبل حل شده تا مقادیر θ_g در پله زمانی بعدی محاسبه می شود.
- ۴- مراحل ۱ تا ۳ تکرار می شود تا زمانی که سیستم به حالت دائمی برسد.

۵- بررسی صحت نتایج

در این قسمت به منظور بررسی صحت روش بکارگرفته شده در آنالیز حرارتی مشعلهای متخلخل، مقایسه ای بین نتایج عددی ناشی از محاسبات به عمل آمده با نتایج گزارش شده در مرجع شماره [۳] انجام شده است.



شکل ۳- توزیع دمای گاز در طول مشعل

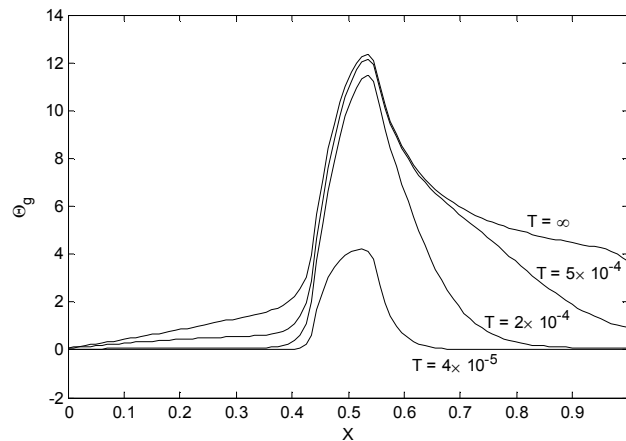
$$\delta = 0.2, \tau_0 = 1, \omega = 0.5, N_g = 8.33, \Gamma = 300, P_e = 54.5, N_l = 2 \times 10^6, \phi = 0.95$$

$$P_1 = 4027, P = 0, P_t = 0, N_p = 666, Nu_p = 5, R = 1.5 \times 10^{-3}, \xi_{fl} = 0.5$$

توزیع درجه حرارت گاز در طول مشعل در حالت دائم طی شکل شماره (۳) نمایش داده شده است. با توجه به این شکل دیده می شود که بیشترین دمای گاز در ناحیه احتراق واقع شده و پس از آن بواسطه 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 بشمار می رود. بهر حال نتایج کار حاضر با نتایج گزارش شده در مرجع [۳] نزدیک بوده اگر چه از دو مدل تشعشعی متفاوت جهت محاسبه شار تشعشعی استفاده شده است.

۶- بحث در نتایج

در شکل (۴) رفتار گذرای دمای گاز در طول لایه متخلخل در پله های زمانی مختلف نشان داده شده است. ناحیه احتراق با ضخامتی معادل ۰/۱ ضخامت کل لایه متخلخل و دقیقاً در وسط لایه مستقر است ($\xi_{fl} = 0.5$). بنابراین همان گونه که انتظار می رود، دمای نقاط میانی که در محدوده ناحیه احتراق قرار دارند در اثر آزاد شدن انرژی حاصل از فرایند احتراق با گذشت زمان به تدریج افزایش می یابد تا به حالت دائمی برسد.

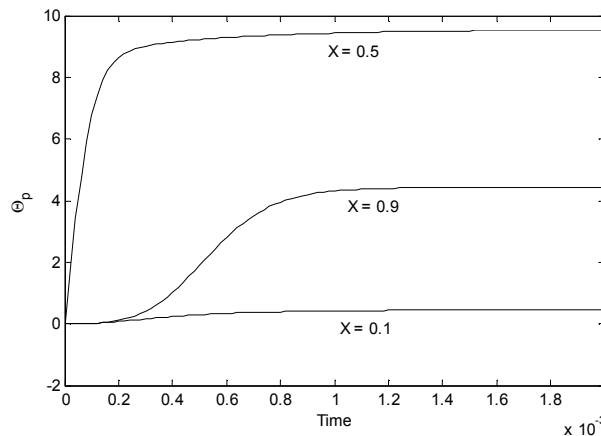


شکل ۴- تغییرات زمانی دمای گاز در طول لایه متخلخل

$$\delta = 0.2, \tau_0 = 1, \omega = 0.8, N_g = 1.42, \Gamma = 1700, P_e = 70, N_l = 28800, \phi = 0.835$$

$$P_1 = 1.45 \times 10^4, P = 0.34, P_t = 4.7, N_p = 2.22, Nu_p = 30, R = 0.29, \xi_{fl} = 0.5$$

حرارت تولید شده در ناحیه احتراق در اثر انتقال انرژی جابه جایی بین گاز و محیط متخلخل به فاز جامد منتقل می شود که باعث بالا رفتن دمای فاز جامد می شود. 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 جابه جایی با فاز جامد و انرژی تابش شده از محیط متخلخل به تدریج افزایش می یابد که فرایند پیش گرم شدن مخلوط ورودی سوخت و هوا را باعث می شود. 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 می یابد.



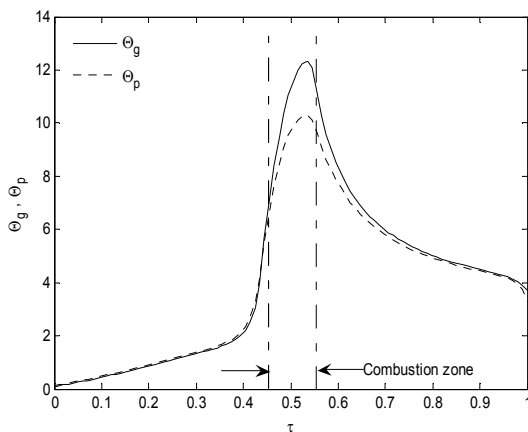
شکل ۵- تغییرات زمانی دما در نقاط مختلف لایه متخلخل

$$\delta = 0.2, \tau_0 = 1, \omega = 0.8, N_g = 1.42, \Gamma = 1700, P_e = 70, N_l = 28800, \phi = 0.835$$

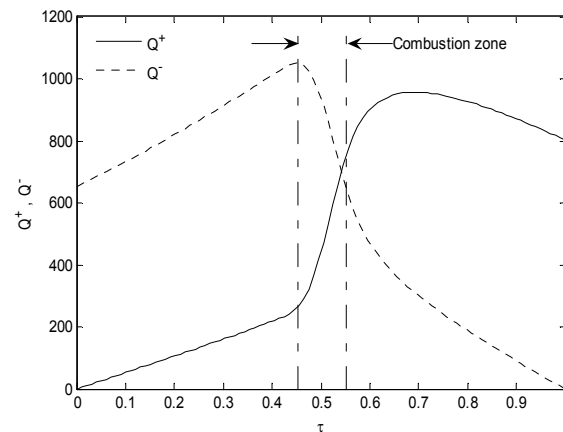
$$P_1 = 1.45 \times 10^4, P = 0.34, P_t = 4.7, N_p = 2.22, Nu_p = 30, R = 0.29, \xi_{fl} = 0.5$$

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 جابه جایی بین گاز و محیط متخلخل افزایش می یابد. در نقاط میانی به علت قرار گرفتن در ناحیه احتراق، دما به سرعت با گذشت زمان افزایش می یابد 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 بدلیل انتقال انرژی جریان سیال از ناحیه احتراق، دما به میزان متوسطی نسبت به نقاط ابتدایی و میانی افزایش می یابد. جهت نمایش رفتار حرارتی مشعلهای متخلخل، تعیین توزیع درجه حرارت گاز، محیط متخلخل و همچنین توزیع شار تشعشی ضروری است. در شکل شماره (۶) نحوه تغییرات این متغیرهای وابسته در طول مشعل متخلخل و در حالت رسیدن به شرایط دائم ترسیم شده است. همانطور که در شکل (۶-الف) دیده می شود انرژی آزاد شده از فرآیند احتراق باعث می شود که بیشترین درجه حرارت گاز و لایه متخلخل در ناحیه احتراق واقع شود بطوریکه پس از آن درجه حرارت کاهش می یابد. بدلیل زیاد بودن ضریب انتقال حرارت جابه جایی، دمای گاز و لایه متخلخل به یکدیگر نزدیک می باشد.



(ب) توزیع شار حرارتی تابشی



(الف) توزیع دمای گاز و لایه متخلخل

شکل ۶- توزیع دما و شار حرارتی تابشی در مشعل

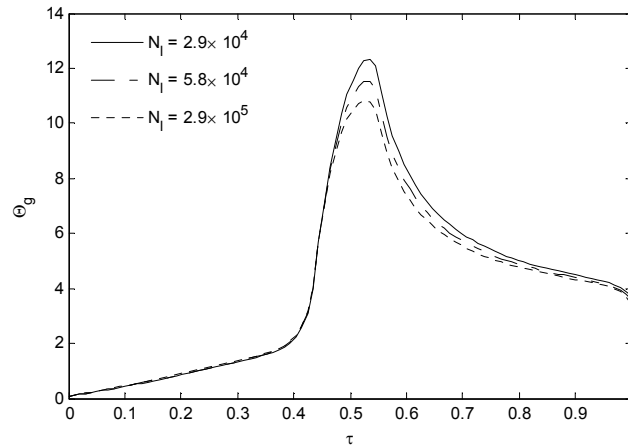
$$\delta = 0.2, \tau_0 = 1, \omega = 0.8, N_g = 1.42, \Gamma = 1700, P_e = 70, N_l = 28800, \phi = 0.835$$

$$P_1 = 1.45 \times 10^4, P = 0.34, P_t = 4.7, N_p = 2.22, Nu_p = 30, R = 0.29, \xi_{fl} = 0.5$$

در مورد شارهای تشعشی Q^+ و Q^- نیز در شکل (۶-ب) دیده می شود که بیشترین مقدار این پارامترها در ناحیه ای خارج از محدوده احتراق واقع شده و بواسطه این که هیچ منبع تشعشی در خارج از لایه متخلخل وجود ندارد مقادیر Q^- در انتهای لایه و Q^+ در ابتدای لایه معادل با صفر می باشند که بعنوان شرط مرزی در حل معادلات تشعشی استفاده شده اند. مقدار پارامتر Q^+ در انتهای لایه ($x = x_p$) معرف شار تشعشی خروجی از مشعل (radiant output) بوده بطوریکه هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد مشعل متخلخل توانسته است مقدار بیشتری از انرژی حاصل از احتراق را بصورت تشعشع روانه سیستم حرارتی نماید. در مقابل مقدار پارامتر Q^- در ابتدای مشعل ($x = 0$) را می توان در زمره انرژی اتلافی دانست چرا که استفاده موثری از این انرژی تابیده شده بعمل نمی آید. به ویژه در حالاتی که اثرات تشعشی گاز کم بوده و قدرت جذب انرژی تشعشی توسط جریان گاز قابل صرفنظر کردن باشد.

یکی از پدیده های مهم انجام شده در مشعلهای متخلخل، مکانیزم انتقال حرارت جابه جایی بین جریان گاز و محیط متخلخل است. جهت بررسی بیشتر تاثیر این پدیده بر کارایی مشعلهای متخلخل، در شکل (۷) توزیع دمای گاز در طول مشعل به ازای سه مقدار مختلف پارامتر بدون بعد N_l رسم شده است. دیده می شود که در صورت داشتن ضریب انتقال حرارت جابه جایی بیشتر، درجه حرارت ماکزیمم گاز پایین آمده به طوریکه در این حالت مشعل متخلخل توانسته است به مقدار بیشتری انرژی حرارتی را به محیط متخلخل منتقل کند و بنابراین انرژی تشعشی بیشتری توسط این محیط تولید

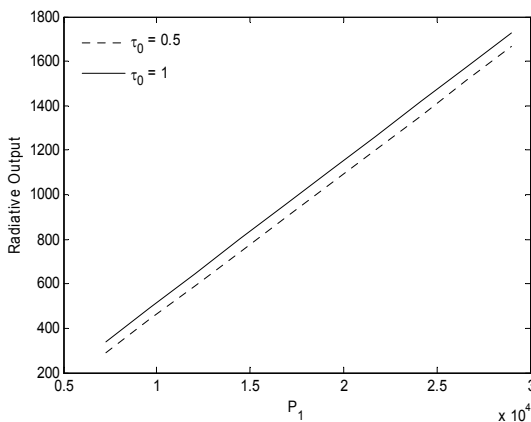
می شود. لازم به ذکر است که کاهش درجه حرارت ماکزیمم در مشعلها، یکی از راهکارهایی است که می تواند منجر به کاهش تولید آلاینده ها در فرآیند احتراق شود.



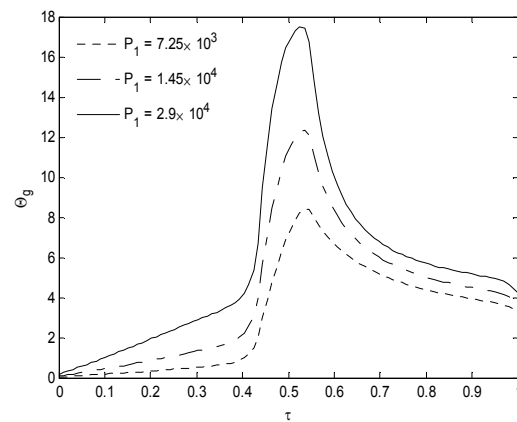
شکل ۷- اثر ضریب انتقال حرارت جابه جایی بر توزیع دمای گاز در داخل مشعل

$$\delta = 0.2, \tau_0 = 1, \omega = 0.8, N_g = 1.42, \Gamma = 1700, P_e = 70, \phi = 0.835, P_1 = 1.45 \times 10^4$$

$$P = 0.34, P_t = 4.7, N_p = 2.22, Nu_p = 30, R = 0.29, \xi_{fl} = 0.5$$



(ب) تابش خروجی به ازای دو ضخامت اپتیکی متفاوت



(الف) توزیع درجه حرارت گاز در داخل مشعل

شکل ۸- اثر پارامتر بدون بعد P_1 بر توزیع دمای گاز و شار تابشی خروجی مشعل

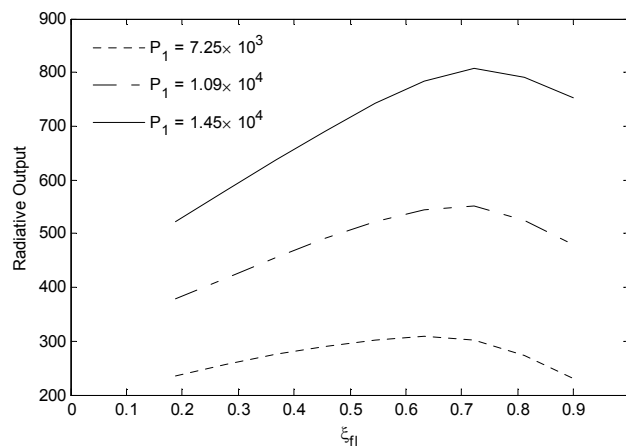
$$\delta = 0.2, \tau_0 = 1, \omega = 0.8, N_g = 1.42, \Gamma = 1700, P_e = 70, N_l = 28800, \phi = 0.835$$

$$P = 0.34, P_t = 4.7, N_p = 2.22, Nu_p = 30, R = 0.29, \xi_{fl} = 0.5$$

در شکل شماره (۸) اثر شدت تولید حرارت (\dot{Q}) از طریق مقادیر مختلف پارامتر بدون بعد P_1 بر مشعل متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۸-الف) توزیع درجه حرارت گاز در طول مشعل و به ازای سه مقدار مختلف پارامتر P_1 را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود با افزایش شدت تولید حرارت و در نتیجه افزایش P_1 ، درجه حرارت ماکزیمم 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 می شود.

در شکل (۸-ب) 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 می یابد و در نتیجه مشعل توان خروجی بیشتری خواهد داشت. که البته در مورد مشعلهایی با ضخامت اپتیکی بیشتر، این افزایش چشمگیرتر می باشد.



شکل ۹- تابش خروجی از مشعل بر حسب موقعیت شعله و به ازای سه مقدار مختلف پارامتر بدون بعد P_1

$$\delta = 0.2, \tau_0 = 1, \omega = 0.8, N_g = 1.42, \Gamma = 1700, P_e = 70, N_l = 28800, \phi = 0.835$$

$$P = 0.34, P_t = 4.7, N_p = 2.22, Nu_p = 30, R = 0.29$$

یکی از پارامترهای مهم در مشعلهای متخلخل موقعیت استقرار شعله، ξ_{fl} می باشد. جهت مطالعه اثر این پارامتر، در شکل (۹) شار تابشی خروجی از مشعل بر حسب موقعیت شعله و به ازای مقادیر مختلف پارامتر بدون بعد P_1 رسم شده است. دیده می شود که در ابتدا با پیشروی موقعیت شعله به جهت پایین دست مقدار شار تابشی خروجی افزایش یافته بطوریکه بیشترین مقدار آن در موقعیتی نزدیک مقطع خروجی اتفاق می افتد ولی با پیشروی بیشتر در جهت پایین دست شار تشعشی خروجی از مشعل کاهش می یابد. چرا که در این نواحی ضخامت کمتری از محیط متخلخل که دارای درجه حرارت بالایی می باشد در امر صدور انرژی تشعشی شرکت دارد. لذا جهت داشتن $Q_{max}^+(\tau_0)$ برای هر مشعل یک موقعیت بهینه جهت استقرار شعله وجود داشته که البته در نزدیکی مقطع خروجی مشعل واقع شده است. در شکل (۹) این موقعیت به ازای سه مقدار پارامتر P_1 در حدود $\xi_{fl} \approx 0.7$ قرار دارد.

۷- نتیجه گیری کلی

در کار حاضر جهت تعیین مشخصه های حرارتی مشعلهای متخلخل در حالت گذرا به روش عددی معادلات انرژی و شار تشعشی 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 تشعشی نیز از مدل دو شار حرارتی استفاده شده است. چرا که این مدل در عین سادگی دارای دقت قابل قبولی بوده و در مقایسه با دیگر مدل های تشعشی نیازمند محاسبات کمتری می باشد. با حل این معادلات توزیع درجه حرارت و همچنین چگونگی تغییرات شار تشعشی در داخل مشعل متخلخل بدست آمده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که ضریب انتقال حرارت جابه جایی و شدت تولید حرارت نقش بسزایی در چگونگی عملکرد

مشعلهای متخلخل داشته بطوری که استفاده از مشعلهای متخلخل با ضریب بالای انتقال حرارت جابه جایی، شدت تولید حرارت زیاد و ضخامت اپتیکی بالا عملکرد مشعل را بهبود می بخشد. همچنین در مورد هر مشعل موقعیت بهینه ای جهت استقرار شعله وجود داشته تا این که بیشترین شار تشعشعی خروجی از مشعل تولید شود. انطباق بین کار حاضر با نتایج بدست آمده توسط دیگر محققین که از مدل‌های تشعشعی متفاوتی استفاده نموده اند رضایت بخش می باشد.

مراجع

- 1- Echigo, R., "Effective energy conversion method between gas enthalpy and thermal radiation and application to industrial furnaces," Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf., München, Vol. 6, pp. 361-366, 1982.
- 2- Echigo, R., Yoshizawa, Y., Hanamura, K., and Tomimura, T., "Analytical and experimental studies on radiative propagation in porous media with internal heat generation," Proc., 8th Int. Heat Transfer Conf., Vol. 2, pp 827-832, 1986.
- 3- Tong, T., and Sathe, S., "Heat transfer characteristics of porous radiant burners," Trans. Of ASME, J. Heat Transfer, Vol. 113, pp 423-428, 1991.
- 4- Brenner, G., Pickenacker, K., Pickenacker, O., Trimis, D., Wawrzinek, K., and Weber, T., "Numerical and experimental investigation of matrix-stabilized methane/air combustion in porous inert media," Combust. Flame, Vol. 123, pp 201-213, 2000.
- 5- 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.
- 6- Talukdar, P., and Mishra, S., "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.
- 7- Wang, K.Y., and Tien, C.L., "Thermal insulation in flow systems : combined radiation and convection through a porous segment," J. Heat Transfer, Vol. 106, pp 453-459, 1984.
- 8- Gandjalikhan Nassab, S., "A Transient heat transfer characteristics of an energy recovery system using a porous medium," Proc. Instn. Mech. Engrs, J. Power and Energy, Vol. 216, part A, pp 387-394, 2002.