

## بررسی عددی عوامل موثر بر سرعت شعله در مشعل متخلخل

سید عبدالمهدی هاشمی<sup>۱\*</sup>، مصطفی خسروی الحسینی<sup>۲</sup>، مجید نیکفر<sup>۳</sup>، حجت اله ساکت پور آرانی<sup>۴</sup>

دانشگاه کاشان، پژوهشکده انرژی

\*hashemi@kashanu.ac.ir

### چکیده

مشعل متخلخل به دلیل آلودگی کم و مزیت‌های فراوانی از جمله انعطاف پذیری در مصرف سوخت، کارکرد در نسبت هم ارزی کم، راندمان حرارتی بالا و اندازه‌های کوچک آن در چند دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ما در این بررسی، به حل دقیق و عددی معادلات تشعشع و حل توأم معادلات انرژی و وارد کردن این معادلات در کد تغییر یافته Premix که یکی از معروفترین کدهای کاربردی برای مدلسازی احتراق در یک بعد می باشد و توسط کد CHEMKIN II فرا خوانده می شود، پرداخته‌ایم و توزیع دمای گاز و جامد در طول مشعل و همچنین تغییرات انرژی تشعشعی در طول شعله و سرعت شعله با توجه به افزایش نسبت هوای اضافی و تاثیر پارامترهای دیگر روی این نتایج بررسی شده و این نتایج را با نتایج حاصل از حل معادلات تشعشعی با استفاده از روش جهت‌های تفکیک شده (DOM) که تقریب نسبتاً دقیقی از حل کامل معادلات تشعشعی را بدست می دهد، مقایسه شده است و نتایج قابل قبولی بدست آمده است.

واژه‌های کلیدی: احتراق - محیط متخلخل - حل دقیق - شبیه سازی عددی - سرعت شعله

### ۱- مقدمه

یکی از مسائل مهم و مطرح چند دهه اخیر آلودگی محیط زیست است. احتراق سوخته‌های فسیلی یکی از منابع اصلی تولید آلودگی در محیط زیست است. بسیاری از آلودگیها مانند  $(NO, NO_2, N_2O)$  و  $SO_x$  به وسیله احتراق سوخته‌های فسیلی تولید می‌شود. انتشار این آلودگیها به وسیله کاهش مصرف سوخت و با بهبود تجهیزات احتراقی میتواند کاهش یابد. یکی از این تجهیزات احتراقی که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است و نقش قابل ملاحظه‌ای در کاهش آلاینده‌ها می‌تواند داشته باشد، مشعل متخلخل است.

تکنولوژی مشعل متخلخل بر پایه احتراق در داخل محیط متخلخل است. حوزه کارکرد وسیع همراه با توان حرارتی بالا، ابعاد کوچک و نشر کم گازهای آلودگی کننده این تکنولوژی را در صنایعی همچون نیروگاهها و صنعت خودرو و همچنین کاربردهای خانگی گسترش داده است. به علت هدایت گرمایی بالا، دمای احتراق در مقایسه با شعله آزاد به طور قابل توجهی می‌تواند کاهش یابد. تقریباً در تمامی تکنیکهای احتراق از ساختار شعله آزاد<sup>۵</sup> که ضخامت شعله (خصوصاً در حالت پیش مخلوط) بسیار باریک است، استفاده می‌شود. به عنوان نمونه در مشعل بانسن<sup>۶</sup> حداکثر ضخامت جبهه شعله یک میلیمتر است. دلیل این ضخامت نازک ضریب انتقال حرارت هدایتی پایین مخلوط گاز است. گرادیان دمای بالا در این منطقه باریک احتراق

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۲- استادیار، پژوهشگاه شرکت نفت

۳- دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۴- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

<sup>5</sup> Free Flame

<sup>6</sup> Bunsen Burner

باعث انتقال حرارت در خلاف جهت حرکت جریان و در نتیجه رساندن مخلوط احتراق به دمای شعله وری می گردد. به منظور افزایش توان حرارتی و افزایش سرعت شعله در شعله آزاد از روش ایجاد اغتشاش در بالا دست جریان گاز استفاده می شود. این امر باعث ضخیمتر شدن جبهه شعله و افزایش انتقال حرارت می گردد. اما در کنار این بهبود، افزایش اغتشاش باعث چند شاخه ای شدن<sup>۱</sup>، افزایش ناپایداری<sup>۲</sup>، تولید سر و صدا<sup>۳</sup> و افزایش افت فشار می گردد. در مواد متخلخل انتقال حرارت توسط هدایت و تشعشع صورت می پذیرد. بالا دست ناحیه احتراق توسط تشعشع صادر شده از ناحیه پایین دست احتراق و همچنین انتقال حرارت هدایتی داخل ماده متخلخل پیش گرم می شود. حرارت تشعشعی ابتدا باعث گرم شدن جسم جامد و سپس بواسطه انتقال حرارت جابجایی باعث گرم شدن مخلوط گاز می گردد. همچنین بخش ناپیزی از این تشعشع (به دلیل ضریب جذب پایین گاز) مستقیماً سبب گرمایش مخلوط می شود. همچنین نشان داده شده است که سرعت شعله در محیط متخلخل می تواند تا ۱۸ برابر بیشتر از سرعت شعله آزاد جریان آرام باشد [۱].

آزمایشات انجام گرفته توسط بابکین<sup>۴</sup> و همکارانش در سال ۱۹۹۱ مشخص ساخت که برای ایجاد احتراق در ماده متخلخل عدد پکلت باید بزرگتر از ۶۵ باشد:

$$Pe = \frac{S_l d_m c_p \rho}{\lambda} \quad (1)$$

$S_l$  سرعت شعله آرام،  $d_m$  قطر معادل ماده متخلخل،  $c_p$  ظرفیت حرارتی ویژه،  $\rho$  دانسیته و  $\lambda$  ضریب هدایت حرارتی مخلوط گاز است. چنانچه عدد پکلت کوچکتر از ۶۵ باشد شعله خاموش<sup>۵</sup> می گردد [۲]. در اکثر مشعل‌های متخلخل با پیش مخلوط سوخت و هوا، منطقه پیش گرمایش از مواد متخلخلی با قطر حفره های کوچک ساخته می شود، به گونه‌ای که عدد پکلت کمتر از حالت بحرانی ( $Pe < 65$ ) باشد. این منطقه علاوه بر پیش گرمایش مخلوط، باعث جلوگیری از برگشت شعله نیز می شود. پس از این ناحیه، ماده متخلخل دیگری با قطر حفره‌های بزرگتر قرار دارد که اجازه ایجاد فرایند احتراق را می‌دهد. معمولاً در این ناحیه دریچه‌ای برای ایجاد جرقه تعبیه می‌شود. در برخی کاربردهای خاص مانند گرمایش منازل از یک مبدل حرارتی پس از ماده متخلخل بهره گرفته می‌شود. این مبدل حرارتی باعث ایجاد تبادل حرارت بین گازهای خروجی از مشعل و سیال دون لوله های مبدل را فراهم می‌آورد [۳].

ایده استفاده از مواد متخلخل به اوایل قرن بیستم بر می‌گردد. در سال ۱۹۷۴ واینبرگ نشان داد که می‌توان از حرارت محصولات احتراق برای پیش گرمایش مخلوط سوخت و هوا استفاده نمود و در نتیجه دمای آدیاباتیک شعله را افزایش داد [۴]. در خلال سال‌های ۱۹۷۹ تا ۱۹۸۱ تاکنو و ساتو [۵] نشان دادند که این ایده را می‌توان توسط هدایت حرارتی درون یک مشعل متخلخل برآورده نمود و از آن به بعد تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه آغاز گردید.

برای اولین بار در سال ۱۹۸۸ یاشیزاوا و همکارانش مدل یک بعدی از احتراق درون ماده متخلخل ارائه دادند که در آن مطالعه تشعشع هدف اصلی بود. او فرض کرده است که گاز عامل غیر تشعشعی است، از ترم تفرق تابش جسم متخلخل صرفنظر شده است، خواص فیزیکی و ترمودینامیکی ثابت اند، حرکت گاز به اندازه ای آرام است که می‌توان از افت فشار درون ماده متخلخل صرفنظر نمود، واکنش احتراق به صورت تک مرحله ای است، گاز محترق شده با جسم جامد متخلخل به تعادل گرمایی رسیده و از یک معادله انرژی برای هر دو استفاده گردیده است. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که پروفیل دما، شار انرژی تشعشعی و دیگر خصوصیات حرارتی قویاً با ضریب جذب، ضخامت اپتیکی ماده متخلخل و موقیت مکانی احتراق وابسته است. همچنین مشخص گردید که انتقال حرارت هدایت در جهت خلاف حرکت جریان باعث افزایش آنتالپی احتراق می‌گردد و بالانس محلی و کلی انرژی نمایانگر اهمیت انتقال حرارت تشعشع در رفتار سیستم می‌باشد [۶].

<sup>1</sup> Quenching

<sup>2</sup> Stabilization

<sup>3</sup> Noise

<sup>4</sup> Babkin

<sup>5</sup> Quenching

در یک تحقیق آزمایشگاهی، بابکین و همکارانش سرعت شعله پیش مخلوط متان- هوا و پروپان- هوا را در چهار نوع ماده متخلخل اندازه گیری نمودند. همچنین اثر پارامترهای فشار، درصد هوای اضافی و قطر حفره های ماده متخلخل مورد ارزیابی قرار گرفته و در پایان برازشی برای عدد پکلت به صورت  $Re = C.Pe^3$  ارائه گردیده است. برای محاسبه رینولدز از اختلاف سرعت حرکت شعله درون ماده متخلخل و سرعت شعله جریان آزاد استفاده گردیده است و عدد پکلت بر مبنای سرعت شعله جریان آزاد بدست آمده است [۲].

در تحقیق دیگری سینگ و کاویانی به بررسی تئوری وابسته برای مدلسازی بستر متخلخل پرداختند. در این مقاله نشان داده شده است که خواص وابسته تشعشی برای کره‌های کدر توسط خواص غیر وابسته آنها با استفاده از مقیاس فاصله اپتیکی قابل محاسبه است. ضریب مقیاس فوق‌الذکر مستقل از ضریب جذب و به صورت تابعی از درجه تخلخل بدست آمده است. همچنین نشان داده شده است که تعریف چنین ضریب مقیاس ساده‌ای برای اجسام غیر کدر امکان‌پذیر نیست. با استفاده از ترکیب این خواص در روش محاسباتی<sup>۱</sup> DOM تطابق خوبی بین نتایج مدلسازی و حل مونت کارلو بدست آمد [۷].

استفاده از سینتیک کامل احتراق در مدلسازی مشعل متخلخل توسط هسو و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق مکانیزم تک مرحله‌ای با مکانیزم چند مرحله‌ای احتراق درون ماده متخلخل بررسی شده است. مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی در خصوص توزیع دما، نرخ آزادسازی انرژی و کل انرژی آزاد شده، نشان داده است که مدل تک مرحله‌ای دارای دقت پایینی است ولی در حالت احتراق رقیق می‌توان به دقت نتایج اعتماد نمود. در تخمین NO توسط مدلسازی عددی انجام گرفته انحراف قابل توجهی مشاهده می‌گردد که بر طبق گفتار محققین به دلیل استفاده از ضریب انتقال حرارت جابجایی ثابت و عدم توجه به توربولانس است [۸]. در تحقیق دیگری محققین فوق‌الذکر به بررسی اثر تخلخل و دیگر خصوصیات محیط متخلخل پرداختند [۹]. وجه تمایز این تحقیق نسبت به تحقیقات قبلی استفاده از مکانیزم کامل احتراق و تعیین خواص ترموفیزیکی فاز جامد به صورت دقیق می‌باشد. مشاهده گردیده است که اثر پیش گرمایش با افزایش انتقال حرارت جابجایی و هدایت فاز جامد افزایش می‌یابد. انتقال حرارت جابجایی با افزایش تعداد سلولها به ازای هر واحد طول ماده متخلخل افزایش می‌یابد در حالی که ضریب جذب با افزایش اندازه سلولها و کاهش دانسیته آنها کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده گردیده است که نسبت اختلاط در احتراق رقیق تا میزان ۰/۳۶ می‌تواند پایین آورده شود. دمای آدیاباتیک شعله با توجه به اثر پیش گرمایش بین ۱ تا ۱۰ درصد بیشتر از دمای آدیاباتیک شعله آزاد بدست آمده است. این موضوع تفاوت قابل توجهی با تحقیقات قبلی که از مکانیزم تک مرحله‌ای استفاده می‌کردند، دارد. (این تحقیقات دمای آدیاباتیک شعله را بین ۴۰ تا ۵۰ درصد بیشتر از دمای آدیاباتیک شعله آزاد تخمین می‌زدند).

یکی دیگر از مدلسازی‌های عددی یک بعدی انجام شده به منظور تعیین عملکرد احتراق درون ماتریس فلزی توسط لئوناردی انجام شده است [۱۰]. این مدل از مکانیزم چند مرحله‌ای استفاده می‌کند. ماده متخلخل به صورت جسم خاکستری در نظر گرفته شده است و معادله انتقال حرارت تشعشع توسط روش DOM حل گردیده است. معادلات به صورت کوپل حل شده و موقعیت شعله توسط آنها تعیین می‌گردد. پایداری شعله تحت تاثیر بار حرارتی و همچنین افت حرارت مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصله با مقادیر تجربی مقایسه گردیده است. راندمان تشعشی هنگامی که شعله به خارج از سطح ماده متخلخل رانده می‌شود افت محسوسی را نشان می‌دهد.

از آنجا که مدلسازی یک بعدی شعله نسبتاً به صورت موضوعی کلاسیک درآمده است از اینرو در این تحقیق سعی شده است با انتخاب کد مناسبی آن را برای مدلسازی احتراق در محیط متخلخل توسعه داد. کدهای موجود برای مدلسازی شعله آزاد را می‌توان به دو دسته تجاری و آکادمیک تقسیم نمود. مطالعه‌ای تطبیقی برای هریک از کدهای آکادمیک صورت پذیرفته است که در نهایت کد CHEMKIN انتخاب گردیده است.

<sup>1</sup> Discrete Ordinate Method

## ۲- معادلات حاکم و فرضیات مدل

در این قسمت مدل سازی مشعل متخلخل در یک بعد توسط معادلات بقایی برای حالتی که عدم تعادل حرارتی بین فاز جامد و گاز در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی بکار رفته در مدل سازی و طریقه محاسبه خواص ترمودینامیکی و انتقالی نیز مورد اشاره قرار گرفته است و در نهایت طریقه حل عددی معادلات آورده شده است.

### ۱-۲ معادلات حاکم

معادلات حاکم برای حالت پایا و فشار ثابت شعله یک بعدی عبارتند از:

$$\text{Continuity: } \dot{M} = \rho uA \quad (2)$$

$$\text{Energy: } \dot{M} \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \lambda A \frac{dT}{dx} + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \rho Y_k V_k c_{pk} \frac{dT}{dx} + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k h_k W_k = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx} (\lambda_s \frac{dT_s}{dx}) + H_v (T_g - T_s) - \frac{dq_r}{dx} = 0$$

$$\text{Species: } \dot{M} \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx} (\rho A Y_k V_k) - A \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad (k=1, \dots, K) \quad (4)$$

$$\text{Equation of State: } \rho = \frac{p\bar{W}}{RT} \quad (5)$$

در روابط فوق  $x$  بیانگر مختصات می باشد و  $\dot{M}$  دبی جرمی را که مستقل از جهت مختصات است، نشان می دهد. همچنین  $T$  دما،  $Y_k$  جزء جرمی  $k$  امین گونه شیمیایی،  $P$  فشار،  $u$  سرعت جریان  $\rho$  دانسیته،  $W_k$  جرم مولکولی  $k$  امین جزء،  $\bar{W}$  جرم مولکولی متوسط مخلوط،  $\lambda$  ضریب هدایت حرارتی مخلوط،  $c_p$  ظرفیت حرارتی در فشار ثابت مخلوط،  $c_{pk}$  ظرفیت حرارتی در فشار ثابت جزء  $k$  ام،  $\dot{\omega}_k$  نرخ مولی تولید جزء  $k$  ام به ازای حجم (مول به سانتیمتر مکعب به ازای ثانیه)،  $h_k$  آنتالپی جزء  $k$  ام،  $V_k$  سرعت دیفیوژن جزء  $k$  ام و  $A$  مساحت مقطع عبور جریان می باشد. [۱۱] و [۱۲].

### ۲-۲ فرضیات

نکته ای که می بایست به آن توجه نمود حد خاموشی شعله می باشد. معمولاً این حد توسط عدد پکلت (رابطه ۱) تعریف می گردد. حد این عدد از روی آزمایشات تجربی بدست آمده است که عدد ۶۵ مورد توافق محققین قرار گرفته است [۱۳] بنابراین می بایست خواص ماده متخلخل از لحاظ درصد تخلخل به گونه ای انتخاب گردد که با توجه به خصوصیات مخلوط سوخت و اکسیدکننده، امکان ایجاد احتراق را فراهم نماید. معمولاً در مشعل متخلخل به دلیل لزوم پایداری شعله در ناحیه ای خاص و جلوگیری از بازگشت شعله، ماده متخلخل مشعل چند لایه ای انتخاب می شود. ماده متخلخل اول دارای حفره های کوچک است تا از بازگشت شعله جلوگیری نماید و تنها باعث پیش گرمایش گردد. ماده متخلخل بعدی محل ایجاد احتراق است. می توان مواد متخلخل دیگری در ادامه مشعل در نظر گرفت که با توجه به مقتضیات طراحی می تواند برای افزایش راندمان تشعشی و یا انتقال حرارت به سیال ثانویه (مبدل حرارتی) تعیین گردد. در مجموع فرضیات بکار رفته برای حل معادلات حاکم عبارتند از:

گاز عامل غیر تشعشی است. ماده متخلخل به صورت همگن است. ماده متخلخل توانایی جذب، صدور و تفرق تشعشع حرارتی را داراست. در مدل سازی یک بعدی از اثر مرزهای جانبی صرف نظر شده است. خواص فیزیکی و ترموفیزیکی محیط متخلخل مانند ضریب هدایت حرارتی یا قطر حفره ها ثابت اند. ماده متخلخل غیر کاتالیستی است. حرکت گاز به صورت جریان آرام در

نظر گرفته شده است و از گردابه‌های حاصل از حفره‌های محیط متخلخل صرفنظر شده است. واکنش احتراق با استفاده از سینتیک‌های کامل احتراقی مدل شده است. گاز محترق شده با ماتریس متخلخل به تعادل گرمایی نرسیده و بنابراین نیاز به حل دو معادله انرژی برای هر فاز به صورت جداگانه است.

### ۲-۳ تعیین خواص گاز و ضرایب انتقال حرارت

نرخ تولید و مصرف ترکیبات شیمیایی واکنش بر مبنای مدل آرنیوس مدل شده است. ضرایب مورد استفاده برای این مدل‌سازی از بانک‌های اطلاعاتی موجود در مراجع مختلف بدست می‌آید. لازم به ذکر است که ثابت پیشرفت تمامی واکنش‌های احتراق را می‌توان به فرم معادله (۶) نوشت. به عنوان مثال در واکنش‌های پایانی  $E_A$  برابر صفر قرار داده می‌شود یا در حالتی که گونه سومی در واکنش شرکت دارد از آن به صورت  $M$  در واکنش استفاده می‌شود. در این حالت نیازی به تعریف  $M$  در گونه‌های شیمیایی نمی‌باشد و فقط ضرایب  $A$ ،  $\beta$  و  $E_A$  را می‌بایست برای آن تعریف نمود.

$$K_f = AT^\beta \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) \quad (6)$$

برای تعیین دیگر خواص فیزیکی از برازش‌های چند جمله‌ای استفاده شده است [۱۴]. ضریب هدایت حرارتی محیط متخلخل به جنس ماده متخلخل و دمای آن وابسته است. در بین فوم‌های سرامیکی زیرکونیا دارای ضریب هدایت حرارتی بین  $W/m-K$  تا  $2K$  می‌باشد و تغییرات کمی نسبت به افزایش درجه حرارت نشان می‌دهد [۱۵]. یکی از عوامل تاثیرگذار بر تعیین ضریب هدایت حرارتی آرایش ماتریس متخلخل یا چگونگی قرارگرفتن حفره‌های خالی درون محیط متخلخل می‌باشد. تحقیقات متنوعی برای تعیین ضریب انتقال حرارت جابجایی انجام پذیرفته است. در مرجع [۱۶] مروری بر آنها گردآوری شده است. در این کار حاضر از روابط ارائه شده در مرجع [۱۷] استفاده شده است.

### ۲-۴ حل معادلات تشعشی

برای حل معادلات تشعشی از دو روش جهت‌های تفکیک شده<sup>۱</sup> یا DOM و روش مستقیم حل معادلات استفاده شده است. روش DOM نیز تقریب نسبتاً دقیقی از حل کامل RTE را بدست می‌دهد که به دلیل دقت و سرعت محاسبات در مسائل احتراق کاربرد گسترده‌ای یافته است.

### ۲-۴-۱ روش جهت‌های تفکیک شده (DOM)

روش DOM بر مبنای انفصال و تکرار RTE روی زوایای فضایی در جهت‌های مشخص  $M$  می‌باشد. مقدار  $M$  رابطه مستقیمی با مرتبه تقریب  $N$  دارد:  $M=2^d N(N+2)/8$  که در آن  $d$  ابعاد مسئله را مشخص می‌نماید. اگر از تقریب DOM استفاده گردد، انتگرال موجود در روابط به مجموع جبری با ضرایب وزنی مشخصی در زوایای فضایی تفکیک شده تبدیل می‌شود همچنین کسینوس‌های این زوایا در ترم سمت چپ ظاهر می‌گردند:

$$\mu_i \cdot \nabla I(r, \hat{s}_i) = k_a I_b(r) - \beta I(r, \hat{s}_i) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \sum_{j=1}^n w_j I(r, \hat{s}_j) \Phi(r, \hat{s}_i, \hat{s}_j) \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, p$$

کسینوس جهات  $\hat{s}_i$  که با  $\mu_i$  با نشان داده شده و همچنین ضریب وزنی  $w_j$  با توجه به تعداد تقسیمات در نظر گرفته شده برای زوایای فضایی محاسبه می‌شوند. استفاده از ضریب وزنی جملاتی را که به صورت انتگرال می‌باشند به حاصل مجموع تبدیل می‌کند. در مراجع مختلف برای ضرایب وزنی  $w_j$  تعاریف متنوعی ارائه شده است که در مجموع همه آنها سعی در

<sup>1</sup> Discrete Ordinate Method

افزایش دقت معادله انتگرالی دارند. مجموع ضرایب وزنی روی جهت‌های تفکیک شده برابر یک است و حاصل ضرب آن در تابع فاز  $\bar{\Phi}$  برابر  $4\pi$  استرادیان است. در تحقیق حاضر ضرایب وزنی از مرجع [۱۸] استخراج شده است همچنین به جهت افزایش دقت در اکثر محاسبات از تفکیک مرتبه هشت (S8) استفاده شده است. در معادلات تشعشعی خواص تشعشعی ماده متخلخل از روابط تجربی بدست می‌آید. این خواص که شامل  $\beta$  ضریب میرایی یا خاموشی<sup>۱</sup>،  $k_a$  ضریب جذب<sup>۲</sup>،  $\sigma_s$  ضریب تفرق<sup>۳</sup> و تابع فاز  $\bar{\Phi}$  می‌شود وابسته به جنس و نوع ماده متخلخل می‌باشند. معمولاً می‌توان با توجه به اینکه طول موج شار تشعشعی بسیار کوچکتر از قطر متوسط حفره‌های ماده متخلخل است، از تئوری مجانب‌های هندسی اپتیکی روابطی را بین ضرایب فوق‌الذکر و قطر حفره‌ها و تخلخل مشعل متخلخل بدست آورد [۱۹]. ضمناً  $\beta = k_a + \sigma_s$  است.

همانگونه که در معادلات قبل مشاهده می‌گردد دو ضریب تفرق ( $\sigma_s$ ) و ضریب خاموشی ( $\beta$ ) می‌تواند بر شار تشعشعی موثر باشد. در مواد متخلخل این دو ضریب نمی‌توانند مستقل از یکدیگر انتخاب گردند و می‌بایست با استفاده از مدل‌های تجربی یا برازش‌های ارائه شده در مراجع مختلف بدست آیند. روابط (۸) و (۹) به عنوان برازش نتایج تجربی برای فومهای سیلیکا و زیرکونیا ارائه گردیده است [۲۰].

$$\beta = (3/d_p)(1-\phi) \quad (۸)$$

$$\sigma_s = (2-\varepsilon)(3/2d_p)(1-\phi) \quad (۹)$$

در تحقیق حاضر محیط متخلخل همگن فرض شده است و برای آن تابع فاز حالت ایزوتروپیک بکار رفته است [۲۱]. با قرار دادن پارامترهای خواص تشعشعی ماده متخلخل در معادله (۷)، و استفاده از انفصال ترمهای دیفرانسیلی در مکان، یک سری معادلات جبری با توجه به درجه تقریب DOM بدست خواهد آمد که با حل آنها می‌توان شار تشعشعی را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$q(r) = \int_{4\pi} I(r, \hat{s}) \hat{s} d\Omega \cong \sum_{i=1}^n w_i I_i(r) \hat{s}_i \quad (۱۰)$$

در حل معادله (۷) نکته قابل توجه آن است که برای تعیین  $I_b$  در حجم کنترل نیازمند توزیع دما می‌باشیم که خود مجهول مسئله است. بنابراین باید از یک روش تکرار خاص استفاده می‌گردد.

## ۲-۴-۲ روش حل معادلات تشعشعی از روش مستقیم

هدف اصلی این تحقیق، حل معادلات تشعشع به روش مستقیم (دقیق) و جایگزینی این معادلات در کد اصلی Premix و بررسی پارامترهای مهم مربوط به مشعل متخلخل می‌باشد بنابراین در این قسمت به شرح معادلات و روش و الگوریتم حل می‌پردازیم. اخیراً روش مستقیم برای حل معادله تبادل حرارت تشعشعی توسط دیامانتی و همکاران پیشنهاد شده است [۱۲]. برای مدلسازی انتقال حرارت تشعشع و تعیین ترم  $\frac{dq_r}{dx}$  ابتدا باید شدت تشعشع<sup>۴</sup> به کمک رابطه انتقال تشعشع (RTE) محاسبه گردد. این رابطه عبارت است از:

$$\frac{dI(\vec{r}, \hat{s})}{dx} = -\beta(\vec{r})I(\vec{r}, \hat{s}) + \kappa(\vec{r})I_b(\vec{r}) + \frac{\sigma_s(\vec{r})}{4\pi} \int_{4\pi} I(\vec{r}, \hat{s}') \phi(\hat{s}', \hat{s}) d\Omega' \quad (۱۱)$$

<sup>1</sup> Extinction

<sup>2</sup> Absorption

<sup>3</sup> Scattering

<sup>4</sup> Radiation intensity

که در آن  $I(\vec{r}, \hat{s})$  شدت تشعشع در راستای  $\vec{r}$  و زاویه فضایی  $\hat{s}$  می باشد. در رابطه (۱۱) اولین ترم در سمت راست بیانگر تلفات شدت تشعشع بواسطه جذب و یا تفرق رو به خارج می باشد. عبارت دوم و سوم از سمت راست معادله، افزایش شدت تشعشع بواسطه صدور یا تفرق رو به داخل را نشان می دهند. استفاده از رابطه RTE به دلیل اینکه محیط متخلخل از لحاظ تشعشعی فعال می باشد اجتناب ناپذیر است. به این معنی که بخشی از شار تشعشعی وارد شده به آن جذب، بخش دیگر بازتابیده می شود و بخشی نیز در طول مسیر حرکت شار دچار تفرق می گردد.

ابتدا با ساده سازی معادله RTE (معادله ۱۱) می توان گرادیان شار تشعشعی را بدست آورد که روابط آن به صورت زیر می باشد [۲۲]:

$$\frac{dq_r}{d\tau} = (1 - \omega)(4\pi I_b - G) \quad (12)$$

$$G(\tau) = 2J_{\text{left}}E_2(\tau) + 2J_{\text{right}}E_2(\tau_L - \tau) + 2\pi \int_0^\tau S(\tau')E_1(\tau - \tau') d\tau' + 2\pi \int_\tau^{\tau_L} S(\tau')E_1(\tau' - \tau) d\tau' \quad (13)$$

$$S(\tau) = (1 - \omega)I_b + \frac{\omega}{4\pi}G(\tau), \quad I_b = \frac{\sigma}{\pi}T_s^4, \quad E_n(x) = \int_1^\infty \frac{e^{-xt}}{t^n} dt$$

که در معادلات بالا  $\tau$  عمق اپتیکی و برابر  $\tau = x \times \kappa$  می باشد که  $\kappa$  ضریب میرایی<sup>۱</sup>،  $\omega$  ضریب تفرق البدو<sup>۲</sup>،  $S$  منبع تشعشعی،  $E_n$  انتگرال نمایی،  $J_{\text{left}}$  و  $J_{\text{right}}$  مرزهای چپ (سرد) و راست (گرم) می باشد که برابر  $\sigma T_\infty^4$  می باشد.

## ۲-۵ روش حل معادلات در مدل سازی یک بعدی

برای حل معادلات حاکم از کد *PREMIX* که یکی از مدول های کد معروف *CHEMKIN* می باشد استفاده شده است [۲۳]. این کد برای مدل سازی شعله آزاد پیش آمیخته یک بعدی به کار می رود. با تغییراتی که در کد مذکور اعمال شده است ابتدا معادلات بقای گونه های شیمیایی با در نظر گرفتن پروفیل اولیه دمایی که به عنوان حدس اولیه داده شده است، حل می گردد. در این حالت فرض شده است دمای گاز و جامد در هر نقطه یکسانند. در مرحله دوم معادله انرژی با استفاده از تقریب اولیه بدست آمده از مرحله قبل در خصوص گونه های شیمیایی مورد حل قرار خواهد گرفت. در این مرحله معادلات بقای گونه های شیمیایی، بقای انرژی فاز گاز و بقای انرژی فاز جامد بدون در نظر گرفتن ترم انتقال حرارت تشعشعی مورد حل قرار خواهد گرفت. پس از همگرایی این مرحله، مرحله سوم با محاسبه گرادیان تشعشع که از حل معادله انتقال تشعشع محاسبه شده و قرار دادن آن در معادله بقای انرژی فاز جامد شروع خواهد گرفت. با همگرایی این مرحله جواب نهایی کد بدست خواهد آمد. در روش حل معادله انفصالی انتقال تشعشع می توان آن را به صورت صریح یا ضمنی در نظر گرفت. به بیان دیگر در روش صریح ابتدا ترم تشعشع بدست می آید و سپس آن را در معادله انرژی فاز جامد قرار می دهیم. بدیهی است در این روش فرض می شود میدان دمای ماتریس جامد مشخص است و با استفاده از آن ترم تشعشع بدست آمده است. بر طبق تجربه انجام گرفته همگرایی این روش حل بسیار کند بوده و از لحاظ زمان انجام محاسبات بسیار وقت گیر است. بنابراین در کد از روش ضمنی استفاده شده است به این معنی که تمامی ترمهای مجهول به صورت همزمان مورد محاسبه قرار می گیرند. تغییرات انجام گرفته در کد *PREMIX* عبارتند از: اضافه نمودن خواص محیط متخلخل (فاز جامد)، محاسبه ضرایب انتقال حرارت محیط متخلخل مانند ضرایب انتقال حرارت تشعشعی و ضریب انتقال حرارت حجمی در حالتی که این ضرایب ثابت نیستند، اضافه نمودن معادلات انتقال حرارت تشعشع و حل آنها با توجه به الگوریتم بخش قبل، اصلاح معادلات بقای ذرات و پیوستگی (در نظر

<sup>1</sup> Extinction

<sup>2</sup> Scattering Albedo

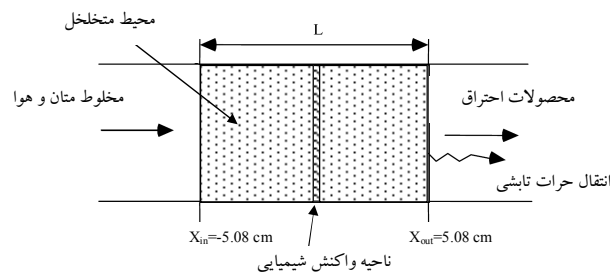
گرفتن تخلخل در آنها، اصلاح معادله بقای انرژی فاز گاز (اضافه نمودن ترم انتقال حرارت جابجایی و در نظر گرفتن تخلخل)، اضافه نمودن معادله بقای انرژی فاز جامد، اضافه نمودن و یا اصلاح شرایط مرزی، حل معادلات اضافه شده با استفاده از زیر برنامه *TWOPNT* به صورت ضمنی [۲۴].

### ۳- مشعل متخلخل مورد استفاده در مدل سازی

یک نمونه مشعل متخلخل تک لایه‌ای که برای آن نتایج تجربی جهت مقایسه صحت نتایج عددی موجود بود، انتخاب گردیده و مبنای تمام محاسبات قرار گرفته است (شکل ۱). این مشعل از جنس زیرکونیا و به ضخامت ۱۰/۱۶ سانتیمتر می‌باشد. خواص ماتریس متخلخل در جدول (۱) آورده شده است. از آنجا که در تحقیقات انجام شده بر پایه این مشعل ضریب انتقال حرارت حجمی و ضریب هدایت به صورت ثابت در نظر گرفته شده است در اینجا نیز مبنای اولیه همان مقادیر ثابت می‌باشد [۲۵] و [۲۶].

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی ماتریس متخلخل مورد استفاده در مدل

$\beta = 270 \text{ m}^{-1}$	$\rho_s = 5.56 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$\sigma_s = 216 \text{ m}^{-1}$	$\lambda_s = 1.2 \text{ W/m-K}$
$H_v = 10^8 \text{ W/m}^3 - K$	$c_{p,s} = 824 \text{ J/kg-K}$	$\phi = 0.87 \text{ for } 3.9PPC \text{ PSZ}$	



شکل ۱- شماتیک مشعل متخلخل مورد نظر در محاسبات

در شبیه‌سازی یک بعدی احتراق می‌توان دبی مخلوط احتراق را در ورودی مشخص در نظر گرفت یا اینکه دمای یک نقطه در راستای حرکت جریان را مشخص و ثابت فرض نمود و برپایه آن دبی مخلوط احتراق را محاسبه کرد. در مدل‌سازی حاضر دمای نقطه‌ای از ناحیه پیش‌گرمایش ثابت و برابر ۱۰۷۵ کلوین فرض شده است. این دما به عنوان شاخصی از ناحیه شروع واکنش شیمیایی انتخاب شده است.

### ۴- نتایج

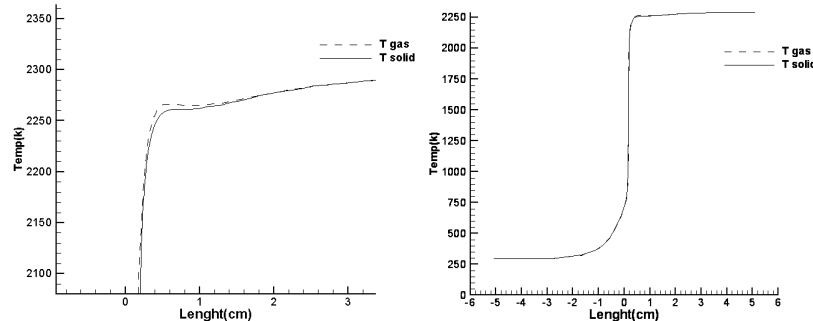
در این قسمت برخی خصوصیات احتراق درون محیط متخلخل که در حالت یک بعدی نیز می‌توان به آنها پرداخت، آورده شده‌اند ابتدا به بررسی توزیع پروفیل دمای گاز و جامد و مقایسه آنها با هم و همچنین مقایسه توزیع دمایی با استفاده از حل معادلات تشعشی با روش DOM و حل دقیق پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱- توزیع دما

در شکل (۲) چگونگی توزیع دمای گاز و دمای جامد در طول مشعل آورده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده میشود، دمای جامد در قسمت بالادست واکنش بالاتر از دمای گاز می‌باشد. همچنین دمای گاز و جامد در ناحیه احتراقی تقریباً بر هم منطبق می‌باشند و بعد از این ناحیه (در ناحیه پایین دست واکنش) دمای گاز از دمای جامد تجاوز میکند. همانطور که گفته شد، یکی از مهمترین مزایای استفاده از مشعلهای متخلخل برتری آنها در پیش‌گرمایش سوخت و هوا قبل از

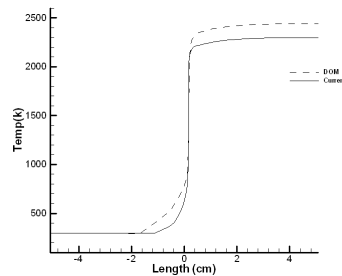


احتراق می‌باشد. این پیش‌گرمایش عمدتاً توسط انتقال حرارت تشعشی در ماتریس متخلخل و انتقال آن به فاز گاز توسط انتقال حرارت جابجایی و بخشی نیز توسط انتقال حرارت هدایت در طول ماتریس متخلخل انجام می‌شود.

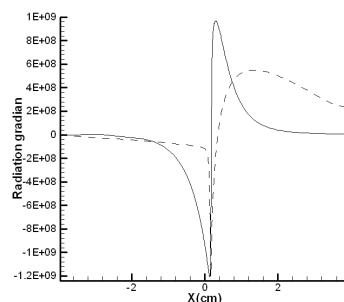


شکل ۲- مقایسه دمای فاز گاز و جامد همراه با بزرگنمایی

از آنجا که ضریب انتقال حرارت جابجایی بالا است، درجه حرارت محلی ماتریس متخلخل به جز ناحیه کوچکی در دمای پایین قبل از احتراق، برابر دمای فاز گاز می‌باشد. بنابراین در پروفیل دمایی قسمتهای بعدی از نشان دادن دمای ماتریس متخلخل صرف نظر شده است. شکل (۳) دمای فاز جامد را برای دو روش مستقیم و DOM نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود که دمای بعد از احتراق در روش مستقیم کمتر از دمای بدست آمده از روش DOM می‌باشد که این اختلاف دمایی به دلیل اختلاف موجود در مقدار گرادیان تشعشی حاصل از این دو روش می‌باشد. در شکل (۴) تغییرات گرادیان شار تشعشی در طول مشعل برای دو روش آورده شده است. همانگونه که از شکل (۴) مشاهده می‌شود در قسمت ورودی به دلیل دمای پایین ماتریس متخلخل، شار تشعشی به سمت صفر میل کرده است. ماکزیمم شار تشعشی در ناحیه احتراق مشعل متخلخل به دلیلی گرادیان شدید دما، رخ داده است. نکته قابل توجه نزدیک بودن منحنیهای دمایی حاصل از دو روش مقایسه شده می‌باشد که با توجه به دقت بالای روش تقریبی جهت‌های تفکیک شده (DOM) از نوع مرتبه هشت (S8)، قابل پیش بینی بود. ولی در هر صورت این اختلاف موجود نیز به دلیل تقریب موجود در روش DOM می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه توزیع دما با استفاده از حل دقیق معادلات تشعشی و روش تقریبی DOM

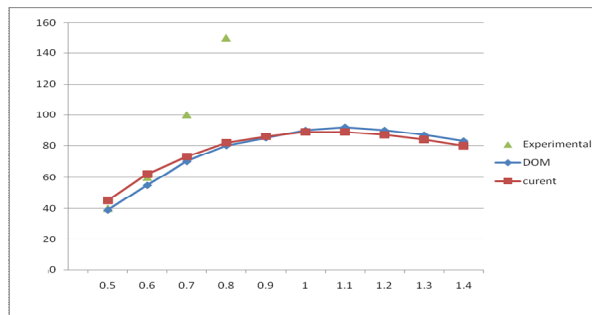


شکل ۴- تغییرات گرادیان شار تشعشع در طول مشعل (خط چین روش دقیق و خط ممتد روش DOM می‌باشد)

## ۴-۲- سرعت اشتعال

یکی از پارامترهایی که در اکثر تحقیقات مورد بررسی قرار می‌گیرد و در عملکرد مشعل متخلخل موثر می‌باشد، سرعت سوزش  $s$  است. این سرعت به صورت سرعت ورود مخلوط اولیه به ماتریس متخلخل در حالتی که دمای اولیه آن افزایش نیافته است، تعریف می‌گردد. در شکل (۵) سرعت اشتعال در مشعل متخلخل مورد تحقیق برای نسبت اختلاطهای مختلف نشان داده شده است. مقایسه سرعت سوزش حاصل از روش دقیق و روش DOM تطابق خوبی بین آنها را به استثنای ناحیه احتراق رقیق نشان می‌دهد. در ناحیه احتراق رقیق سرعت سوزش روش دقیق بیشتر از روش DOM بدست آمده است. علت این اختلاف را می‌توان در تفاوت پروفیل دما در دو روش در حالت اختلاط رقیق دانست.

نکته قابل توجه در این شبیه‌سازی‌ها، اختلاف مشهود بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی است. از جمله عوامل این عدم تطابق، می‌توان به عدم قطعیت در خواص ترموفیزیکی و ضرایب انتقال حرارت حجمی بین فاز جامد و گاز اشاره نمود. به عنوان مثال در تحقیق حاصل از ضریب انتقال حرارت حجمی ثابت استفاده شده است در حالی که در عمل این ضریب با تغییر سرعت و دمای محلی گاز تغییر می‌نماید.



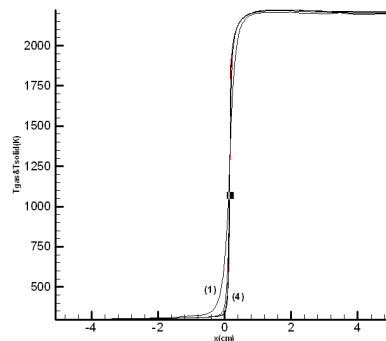
شکل ۵- مقایسه توزیع سرعت با استفاده از حل دقیق معادلات تشعشعی و روش تقریبی DOM و روش تجربی

## ۵- تاثیر ضرایب انتقال حرارت بر شبیه‌سازی عملکرد مشعل متخلخل

### ۵-۱- تاثیر ضریب انتقال حرارت حجمی بر سرعت شعله و توزیع دمایی

در مدل پایه مشعل متخلخل ضریب انتقال حرارت حجمی ثابت و برابر  $10^8 \text{ W/m}^3 - K$  در نظر گرفته شده است. روابط تجربی متعددی با توجه به نوع ماده متخلخل برای سرامیک‌های رشته‌ای مورد استفاده در مشعل‌ها پیشنهاد شده است که در اینجا برخی از این پیشنهادات مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدیهی است در عمل ضریب انتقال حرارت حجمی نمی‌تواند ثابت باشد و به سرعت عبور جریان و درجه حرارت آن وابسته است. همچنین مشاهده میشود، با افزایش  $H_v$  درجه حرارت محلی گاز کاهش و درجه حرارت محلی جامد در ناحیه احتراق افزایش می‌یابد. دلیل تغییرات درجه حرارت را می‌توان بهبود انتقال حرارت جابجایی از فاز گاز به فاز جامد دانست. افزایش درجه حرارت جامد در ناحیه احتراق باعث افزایش درجه حرارت فاز جامد در ناحیه پیش‌گرمایش به دلیل افزایش نرخ انتقال حرارت هدایتی و تشعشعی می‌گردد. به بیان دیگر در ناحیه پیش‌گرمایش به دلیل وجود انتقال حرارت هدایتی و تشعشعی درجه حرارت جامد بیش از گاز است و افزایش انتقال حرارت جابجایی در ناحیه احتراق این اختلاف را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر با افزایش  $H_v$  درجه حرارت جامد و گاز به یکدیگر نزدیکتر خواهند شد و در حد  $H_v \geq 10^8 \text{ W/m}^3 - K$  این دو دما یکی خواهند بود. نتایج تجربی نیز این پیش‌بینی را تایید می‌نماید. در شکل (۶) به دلیل تغییرات اندک دمای گاز با افزایش ضریب انتقال حرارت حجمی فقط یکی از این منحنی-

ها رسم شده است و از رسم بقیه آنها صرفنظر شده است و دمای فاز جامد نیز به ترتیب برای حالت‌های (۱) تا (۴) (مطابق جدول ۲) رسم شده است.



شکل ۶- پروفیل دمای فاز جامد در حالت‌های مختلف ضریب انتقال حرارت حجمی برای روش دقیق

جدول ۲- افزایش ضریب انتقال حرارت حجمی به صورت ضرایبی از مقدار پایه  $10^4$  و تاثیر آن بر سرعت اشتعال

حالت	1	2	2'	3	4	5
$H_v \left( W / m^3 - K \right)$	$10^6$	$10^7$	$1.5e7$	$5e7$	$10^8$ (مدل پایه)	$10^9$
سرعت اشتعال (RTE) (cm/s)	103	128.3	135	138.5	139	139
سرعت اشتعال (DOM) (cm/s)	96	114.2	122.5	124.4	125	125

چنانچه از ضریب انتقال حرارت ثابت در مدلسازی استفاده گردد، با افزایش میزان آن، سرعت اشتعال نیز افزایش خواهد یافت. چنانچه مقدار  $H_v$  به اندازه کافی بزرگتر از مقدار  $10^6$  انتخاب گردد (مثلا صد برابر)، سرعت اشتعال به مقدار حدی در حدود  $139$  سانتیمتر بر ثانیه خواهد رسید.

#### ۲-۴- تاثیر تغییر خواص تشعشعی ماتریس متخلخل

انتقال حرارت تشعشعی یکی از موثرترین شیوه‌های انتقال حرارت در مشعل‌های متخلخل می‌باشد. در مدلسازی انتقال حرارت تشعشع دو نکته قابل بررسی می‌باشد. این نکات عبارتند از نحوه حل معادلات انتقال تشعشع و ضرایب تشعشعی مانند ضریب تفرق و جذب. با توجه به اهمیت روش حل معادلات تشعشعی، این تحقیق که روش حل دقیق برای مدلسازی یک بعدی انتقال حرارت تشعشع استفاده شده است جواب‌های قابل قبولی ارائه خواهد داد.

دو ضریب تفرق ( $\sigma_s$ ) و ضریب خاموشی ( $\beta$ ) می‌تواند بر شار تشعشع موثر باشد. در مواد متخلخل این دو ضریب نمی‌توانند مستقل از یکدیگر انتخاب گردند. نسبت  $\omega = \frac{\sigma_s}{\beta}$  به عنوان ضریب تفرق آلبدو شناخته می‌شود و در جدول ۳ آورده شده است.

در جدول ۳ نتایج با استفاده از روابط فوق در مدل پایه مشعل متخلخل نشان داده شده است. همانگونه که قبلا نیز اشاره گردید در استفاده از این روبرط مهمترین پارامتر عدم قطعیت قطر متوسط حفره‌ها است. ضریب صدور ماتریس متخلخل نیز از خواص ارائه شده برای زیرکونیا معادل  $0.31$  در نظر گرفته شده است که البته مقدار آن به دلیل فرض همدمای بودن محیط خارج مشعل با گازهای خروجی از آن تاثیری در محاسبات ندارد. در جدول ۳ در حالت ۱ تا ۴ ضریب تفرق آلبدو ( $\omega$ ) ثابت

1. Scattering Albedo

بوده و ضرایب خاموشی ( $\beta$ ) افزایش یافته است و در حالات بعدی با ضریب خاموشی حالت پایه ضریب تفرق البدو افزایش یافته است.

جدول ۳ - تاثیر تغییر ضرایب تفرق و خاموشی زیر کونیا بر سرعت اشتعال

حالت ۱	مدل پایه (حالت ۲)	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵	حالت ۶	حالت ۷	حالت ۸	حالت ۹	
150	270	350	500	270	270	270	270	270	$\beta$
120	216	280	400	189	202.5	216	229.5	243	$\sigma_s$
0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	$\omega$
137.7	124.4	124.2	124	131.4	128.6	124.4	119.7	114.7	سرعت اشتعال DOM (cm/s)
149.1	139.5	137.5	134.8	144.6	141.4	139.5	136.8	134.6	سرعت اشتعال (RTE)(cm/s)

درحالتی که ضریب تفرق افزایش یابد یا مثلاً برابر یک شود (جذب وجود نداشته باشد) شعله به سمت پایین دست هدایت می‌شود و دمای پیک افزایش می‌یابد که به دلیل کاهش پیشگرم شدن کمتر گازهای ورودی می‌باشد. با توجه به جدول ۳ با افزایش ضریب خاموشی و ثابت بودن ضریب تفرق البدو، سرعت اشتعال کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش ضریب البدو و ثابت ماندن ضریب خاموشی، سرعت اشتعال کاهش می‌یابد. بنابراین ضرایب خاموشی و تفرق هر دو بر سرعت اشتعال تاثیرگذار هستند. همانگونه که مشاهده می‌گردد تغییرات خواص تشعشی تاثیر اندکی بر مشخصه‌های مشعل متخلخل دارد. در تمامی محاسبات فرض شده است تفرق ایزوتروپیک درون محیط متخلخل وجود دارد. برخی محققین به بررسی مدل‌های ارائه شده برای تفرق غیر ایزوتروپیک پرداخته‌اند که نتایج آن تاثیرپذیری مشخصه‌های محیط متخلخل را با نوع مدل تفرق تشعشع نشان می‌دهد [۲۷].

### ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق یک مشعل متخلخل به صورت عددی و یک بعدی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، به حل دقیق و عددی معادلات تشعشع و حل توأم معادلات انرژی و وارد کردن این معادلات در کد تغییر یافته Premix که توسط کد CHEMKIN II فرا خوانده می‌شود، پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد دمای جامد در قسمت بالادست واکنش بالاتر از دمای گاز می‌باشد و در پایین دست واکنش دمای گاز از دمای جامد بیشتر است. ماکزیمم شار تشعشی در ناحیه احتراق مشعل متخلخل رخ می‌دهد. سرعت سوزش حاصل از روش دقیق و روش DOM تطابق خوبی دارد اما در هر دو روش این پارامتر اختلاف زیادی با نتایج تجربی دارد. با افزایش ضریب انتقال حرارت حجمی، درجه حرارت محلی گاز کاهش و درجه حرارت محلی جامد در ناحیه احتراق افزایش می‌یابد و سرعت اشتعال نیز افزایش خواهد یافت. درحالتی که ضریب تفرق افزایش یابد یا مثلاً برابر یک شود (جذب وجود نداشته باشد) شعله به سمت پایین دست هدایت می‌شود و دمای پیک افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب خاموشی و ثابت بودن ضریب تفرق البدو، سرعت اشتعال کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش ضریب البدو و ثابت ماندن ضریب خاموشی، سرعت اشتعال کاهش می‌یابد. بنابراین ضرایب خاموشی و تفرق هر دو بر سرعت اشتعال تاثیرگذار هستند. تغییرات خواص تشعشی تاثیر اندکی بر مشخصه‌های مشعل متخلخل دارد.

### مراجع

- Howell, J., Hall, M., Ellzey, L., "Combustion of Hydrocarbon Fuel within Porous Inert Media", Prog. Energy Combustion Sci., Vol. 22, PP. 121-145, 1996.

- 2- Babkin, S. V., Korzhavin, A. A. and Bunev, A. V., "Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media" Combustion and Flame, vol. 87, pp. 182-190, 1991.
- 3- Brenner, G., Pickenacker, K., Pickenacker, O., Trimis, D., Wawrzinker K., Weber, T., "Numerical and Experimental Investigation of Matrix Stabilized Methane / Air Combustion in Porous Inert Media", Combustion & Flame, Vol. 123, PP. 201-213, 2000
- 4- Weinberg, F. J., "Combustion temperatures: the future" Nature, vol. 233, pp. 239-241, 1971.
- 5- Takeno, T. and Sato, K. "A theoretical and experimental study on an excess enthalpy flame, combustion in reactive systems", the Seventh International Colloquium on Gas dynamics, Honolulu (Ed. J. P. Boris), vol. 76, pp. 596-610, 1981.
- 6- Yoshizawa, Y., Sasaki, K. and Echigo, R., "Analytical study of the structure of radiation controlled flame" International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 31, pp. 311-319, 1988.
- 7- Singh, P. B. and Kaviany, M., "Modeling radiative heat-transfer in packed-beds", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 35, pp. 1397-1405, 1992.
- 8- Hsu, F. P. and Matthews, D. R., "The Necessity of Using Detailed Kinetics in Models for Premixed Combustion within Porous-Media", Combustion and Flame, vol. 93, pp. 457-466, 1993.
- 9- Hsu, F. P., Howell, R. J. and Matthews, D. R., "A Numerical Investigation of Premixed Combustion within Porous Inert Media", Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, vol. 115, pp. 744-750, 1993.
- 10- Leonardi, A. S., Viskanta, R. and Gore, P. J., "Analytical and experimental study of combustion and heat transfer in submerged flame metal fiber burners/heaters" Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, vol. 125, pp. 118-125, 2003.
- 11- Turns, S., "An Introduction to Combustion", Mc Graw Hill, second edition, 2000
- 12- Kee, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, J., Coltrin, M. E., Miller, J. A., "A Fortran Computer Code
- 13- Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties" Sandia National Laboratories Report SAND86-8246 (1986).
- 14- Trimis, D. and Durst, F., "Combustion in a porous medium – advances and applications", Combust. Sci. and Tech., 121, 153-168, 1996
- 15- Amiri, A., and Vafai, K., "Analysis of Dispersion Effects and Non-thermal Equilibrium", Non-darcian, Variable Porosity, Incompressible Flow Through Porous Media, Int. J. Heat Mass Transfer, 37: 939-954, 1994
- 16- Pickencker, O., Pickencker, K., Wawrzin, K., et al; "Innovative Ceramic materials for Porous Radiant Burners"; Interceram, Vol. 48, PP. 326-329, 1999.
- 17- Kaviany, M.; "Principles of Heat Transfer in Porous Media"; Second Edition, (Second Printing); Springer-Verlag, New York; 1999.
- 18- Fu, X., Viskanta, R. and Gore, J. P.; "Measurement and correlation of volumetric heat transfer coefficients of cellular ceramics"; Experimental Thermal and Fluid Sci.; Vol. 17, PP. 285-293, 1998.
- 19- Modest, M. F., "Radiative Heat Transfer", New York: McGraw-Hill, 1993
- 20- Baillis, D. and Sacadura, J. F., "Thermal radiation properties of dispersed media: theoretical prediction and experimental characterization", J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 67, 327-363, 2000
- 21- Malico, I. and Pereira, J. C., "Numerical Study on the Influence of Radiative Properties in Porous Media Combustion", J. Heat Transfer, 123, 951-957, 2001
- 22- Hendricks, T. J. and Howell, J. R., "Absorption / scattering coefficients and scattering phase functions in reticulated porous ceramics", J. Heat Transfer, 118, 79-87, 1996
- 23- Modest, M. F., "Radiative Heat Transfer", New York: McGraw-Hill, 1993
- 24- Kee, R., Grcar, J., Smooke, M. and Miller, J., "A FORTRAN program for modeling steady laminar one dimensional premixed flames" Technical Report SAND85-8240, Sandia National Laboratories, 1985
- 25- Khosravi, M., "Numerical solution of radiation equation with DOM method in one dimensional porous burner", 2003
- 26- Zhou, X. Y. and Pereira, J. C., "Comparison of four combustion models for simulating the premixed combustion in inert porous media", Fire and Materials, 22, 187-197, 1998
- 27- Hsu, P. F. and Matthews, R. D., "The Necessity of using Detailed Kinetics in Models for Premixed Combustion within Porous Media", Combustion and Flame, 93, 457-466, 1993