

## شبیه‌سازی احتراق مدفون در محیط متخلخل به روش FGM

حسین عطوف<sup>۱</sup> و محسن دوازده‌امامی<sup>۲\*</sup>

۱- دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، h.atooof@me.iut.ac.ir

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، mohsen@cc.iut.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۸، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۶/۹/۲۵، پذیرش: ۹۶/۱۱/۲۵)

**چکیده:** در این پژوهش، روشی به نام تولید فلیملت از منیفولد (FGM) معرفی شده است که ترکیبی از دو روش کاهش سینتیک، یعنی روش فلیملت و روش منیفولد است. در این روش، شعله چندبعدی به صورت مجموعه‌ای از شعله‌های یک‌بعدی در نظر گرفته شده است (روش فلیملت) و ساختار شعله توسط تعداد محدودی متغیر کنترلی تعیین می‌شود (روش منیفولد). متغیرهای ترموشیمیایی در یک بانک داده ذخیره شده و در شبیه‌سازی شعله استفاده می‌شوند. در طول شبیه‌سازی، معادله متغیرهای پیشرو نیز حل می‌شود. در این مطالعه، به منظور دقت‌سنجی این روش، از یک مشعل یک‌بعدی شعله پایدار استفاده شده و نتایج حاصل دو شبیه‌سازی جریان واکنشی با روش‌های سینتیک جزئی و روش حاضر مقایسه شده است. در مرحله بعد، روش FGM برای شبیه‌سازی شعله مدفون در محیط متخلخل به کار گرفته شده و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، که شامل نمودارهای دمای دو فاز گاز و جامد است، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از روش FGM در مقایسه با روش سینتیک جزئی تا چه اندازه دارای دقت بوده و زمان انجام شبیه‌سازی احتراق را تا چندین برابر می‌تواند کاهش دهد.

**کلیدواژگان:** محیط متخلخل، شعله پیش‌مخلوط، روش تولید فلیملت از منیفولد

### مقدمه

اهمیت احتراق سوخت‌های فسیلی در زندگی امروز امری واضح و مبرهن است. احتراق سوخت‌های گازی و یا حتی سوخت‌های مایع منبع اصلی تولید انرژی در کاربردهای خانگی و صنعتی است. برای تامین انرژی تولید برق نیز، که منبع تغذیه بسیاری از سامانه‌های مصرف‌کننده انرژی است، از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌شود. سامانه‌های حمل‌ونقل کاملاً وابسته به سوخت‌های فسیلی‌اند. فرایندهایی مانند ذوب شیشه، شکل‌دهی فلزات و صنایعی مانند پتروشیمی، فولاد و بسیاری از صنایع دیگر برای تولید حرارت سوخت‌های فسیلی مصرف می‌کنند.

در کنار مزایای وجود سوخت‌های فسیلی، افزایش تقاضا و کاهش ذخیره سوخت فسیلی و همچنین لزوم کاهش سطح آلودگی‌ها نیاز به بهبودی بیشتر در سیستم‌های احتراق را امری غیر قابل انکار می‌کند. آلاینده‌هایی مانند اکسیدهای نیتروژن (NOx)، دوده و هیدروکربن‌های نسوخته (UHC) در محصولات احتراق وجود دارد. آلاینده‌های حاصل از احتراق مقوله‌ای مهم در کشورهای صنعتی است که منجر به تصویب قوانینی سخت‌گیرانه در بحث کاهش آلاینده‌ها برای تولیدکنندگان و سازندگان در بسیاری از کشورها شده است. انتشار غیرقابل اجتناب گونه‌های مضر ناشی از احتراق نظیر CO<sub>2</sub> سبب گرمایش هوای زمین شده است. این آلاینده‌ها را می‌توان، با بهبود بازده فرایند احتراق و مصرف کمتر سوخت، کاهش داد.

تشکیل آلاینده‌هایی نظیر NOx، SOx، CO و UHC وابسته به نوع سوخت و فرایندهای فیزیکی و شیمیایی است که در طی احتراق اتفاق می‌افتد. تاکنون، شیوه‌های متعددی برای کنترل فرایند آلاینده‌ها و بهبود واکنش احتراق استفاده شده است.

یکی از راهکارهای موثر استفاده از مواد متخلخل در ناحیه احتراق است. استفاده از محیط متخلخل در ناحیه احتراق می‌تواند سازوکار<sup>۱</sup> شیمیایی و فیزیکی احتراق را تغییر دهد. تکنولوژی احتراق در محیط متخلخل (PMC)<sup>۲</sup> مزیت‌های زیادی را در سیستم احتراقی ایفا می‌کند. از جمله برتری‌های مشعل‌های متخلخل نسبت به مشعل‌های معمولی می‌توان به بازده تابشی بالا، کم‌بودن آلودگی ناشی از NO<sub>x</sub>، سرعت شعله بالا، میزان بازه‌پذیری بار<sup>۳</sup> و توان آتش<sup>۴</sup> (حرارتی) زیاد، کاهش حجم مشعل، افزایش محدوده شعله‌وری، توزیع یکنواختی حرارت و کاهش سروصدا اشاره کرد. وجود برتری‌های اشاره‌شده در این مشعل‌ها موجب کاربرد فراوان در صنایع مختلف شده است. هم‌اکنون، مشعل‌های متخلخل تابشی در فرایندهای تولید و ساختی مانند خشک‌کردن چوب و کاغذ، خشک‌کردن رنگ، بازپخت پلاستیک‌ها، صنایع غذایی و پخت نان کاربرد دارد [۱-۳].

برای شبیه‌سازی احتراق، علاوه بر معادلات بقای جرم، تکانه و انرژی، برای هر گونه موجود در واکنش‌ها نیز باید یک معادله بقا حل شود. حل این دستگاه معادلات در مدل‌سازی احتراق امری کلیدی است. هنگامی که تعداد گونه‌ها زیاد می‌شود، نه تنها بر تعداد معادلات می‌افزاید، عبارات چشمه شیمیایی (عبارات مربوط به نرخ تولید/مصرف) در هر معادله گونه نیز شامل تعداد زیادی از واکنش‌گرها خواهد شد. عبارات چشمه شیمیایی که عباراتی بسیار غیرخطی‌اند، کوپلینگ شدیدی بین معادلات مختلف ایجاد می‌کند. علاوه بر این، سهم واکنش‌های متعدد در عبارت چشمه شیمیایی به معنای تاثیر مقیاس‌های زمانی متعدد در آن است. این امر سبب می‌شود که دستگاه معادلات سخت<sup>۵</sup> شده، که برای حل آن باید از مراحل زمانی بسیار کوچک و یا از روش‌های عددی خاصی استفاده کرد. چنین مشکلاتی سبب شده تا شبیه‌سازی‌ها از این روش بیشتر محدود به هندسه‌های ساده شود [۴].

مشکلات مذکور باعث شده تا تلاش برای توسعه روش‌هایی برای کاهش محاسبات و زمان حل آنها برای شبیه‌سازی شعله صورت گیرد. استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر برای حل معادلات حاکم مانند حلگرهای چندشبکه [۵]، محاسبات به صورت موازی [۶] و ریزکردن شبکه به صورت موضعی [۷] از جمله این روش‌هاست. با ظهور رایانه‌های با سرعت زیاد و رشد دانش سینتیک شیمیایی در طول دهه‌های گذشته، توصیف ریاضی جریان‌های احتراقی به صورت جزئی میسر شده است. همانند دیگر زمینه‌های دینامیک سیالات، دینامیک سیالات محاسباتی بخش مهمی از تحقیقات بر روی فرایند احتراق و شاخه‌های مختلف علم احتراق است.

با اینکه حافظه و سرعت رایانه‌های مدرن پیوسته در حال افزایش است، اما هنوز شبیه‌سازی فرایند احتراق با استفاده از مدل‌های سینتیک جزئی در مشعل‌های صنعتی بسیار مشکل است. این مسئله، در مسائلی که دچار اغتشاش بوده و شامل مقیاس‌های زمانی و طولی متعدد است، پیچیده‌تر خواهد شد. به همین دلیل، بررسی پارامترهای موثر در مشعل‌های صنعتی به دلیل هندسه پیچیده میسر نخواهد بود.

به غیر از مسائل ساده، استفاده از سینتیک‌های واکنشی کامل برای مشعل‌های صنعتی عملاً غیرممکن است. زیرا، برای مثال، تعداد معادلات انتقال موجود در مسئله برای گونه‌های در حال واکنش برای سوخت‌های هیدروکربنی بیش از ۱۰۰ عدد است. همچنین، استفاده از سینتیک شیمیایی سبب می‌شود تا دستگاه معادلات دیفرانسیل سخت شود که نیاز به حلگرهای ضمنی با حجم محاسباتی بالا دارد. بنابراین، بسیاری از مطالعات صرف توسعه روش‌هایی برای کاهش سینتیک‌های پیچیده شده است که این روش‌های کاهش منجر به کاهش زمان محاسبات، بدون از دست دادن دقت زیاد، خواهد شد.

اولین و شاید ساده‌ترین روش کاهش توسط پیترز و راگ [۸] معرفی شد. این روش، که به عنوان تکنیک کاهش متداول شناخته می‌شود، براساس مشاهده واکنش‌های بسیار سریع انجام می‌شود که در آن گونه‌های موجود در این واکنش‌ها در حالت

1. Mechanism  
2. Porous Media Combustion  
3. Turn Down Ratio  
4. Firing Rate  
5. Stiff

شبه‌پایا و یا نیمه‌تعدالی فرض می‌شوند. وقتی که یک گونه به صورت پایا فرض شود، معادله دیفرانسیل متناظر با آن می‌تواند به یک معادله جبری تبدیل شود که این امر زمان محاسبات را کاهش می‌دهد. عیب اصلی این روش این است که برای تشخیص گونه‌های شبه‌پایا نیاز است تا علم گسترده‌ای در رابطه با علم سینتیک وجود داشته باشد، تا محقق بتواند تصمیم بگیرد که کدام گونه در حالت پایا قرار دارد.

بعدها، این مسئله توسط لام و گوسیسی [۹] و ماس و پوپ [۱۰] حل شد. در این راهکارهای کاهش، از روش‌های ریاضی بیشتر بهره گرفته شد که باعث شد تا فرایند کاهش سینتیک به صورت خودکار و بدون نیاز به تجربه زیاد محقق به سینتیک انجام شود. در هر دو روش، واکنش‌های سریع با استفاده از تحلیل ریاضی سیستم واکنشی صورت می‌گیرد و ترکیبی خطی از گونه‌هایی که متناظر با واکنش‌های سریع هستند به صورت پایا فرض می‌شود. در روش ماس و پوپ، واکنش‌های کند و سریع با استفاده از تحلیل مقدار ویژه ژاکوبین<sup>۱</sup> عبارت چشمه شیمیایی از هم جدا می‌شوند، در حالی که لام و گوسیسی روشی مبتنی بر اغتشاش تکین<sup>۲</sup> محاسباتی ارائه کرده‌اند.

در این روش‌ها، در نواحی با دمای پایین فرض پایا فرض دقیقی نیست. در دماهای بالا، بسیاری از واکنش‌ها سریع بوده و فرض تعدالی برای آن‌ها برقرار خواهد بود. در دماهای پایین، تعداد واکنش‌های کند افزایش یافته و گونه‌های شیمیایی کمتری دارای فرض شبه‌پایا خواهند بود. در دماهای پایین، پدیده‌های نفوذ و جابه‌جایی اهمیت بیشتری دارند و ترکیب محلی گونه‌ها با تعادل بین نفوذ و جابه‌جایی و واکنش تعیین می‌شود. البته، یک روش فلیملت ساده‌سازی شده به نام بری-موس-لیبی یا به اختصار BML<sup>۳</sup> [۱۲،۱۱] نیز وجود دارد که در آن نرخ واکنش هر گونه براساس متغیرهای پیشرفت واکنش<sup>۴</sup> و چگالی سطح شعله<sup>۵</sup> به دست می‌آید. این روش تنها برای احتراق مغشوش به کار می‌رود.

روشی جدید که توسط فن اوین و دخویی [۱۳] ارائه شده است، مانند دو روش گفته‌شده، براساس در نظر گرفتن واکنش‌های شیمیایی است، منتها، در این روش، پدیده‌های نفوذ و جابه‌جایی نیز برخلاف روش‌های قبل لحاظ می‌شوند. این روش کاهش، که FGM<sup>۶</sup> نام دارد، ابتدا، برای شعله‌های آرام پیش‌مخلوط توسعه یافت [۱۴] و سپس برای سایر شعله‌ها نیز به کارگیری شده است [۱۵]. اساس ایده روش FGM از روش ILDM<sup>۷</sup> گرفته شده است. در روش ILDM، با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه ژاکوبین محلی عبارت چشمه شیمیایی، واکنش‌های سریع شناسایی می‌شوند. در این روش، صرفاً به مطالعه طبیعت شیمیایی سیستم پرداخته و از دیگر پدیده‌ها، یعنی جابه‌جایی و نفوذ گونه‌ها، در معادله انتقال گونه‌ها صرف نظر شده است. تمامی گونه‌ها را می‌توان به صورت مولفه‌های یک فضای برداری (پایه‌های این فضا) نوشت.

اگرچه روش FGM در مدل‌سازی شعله‌های مختلف اعم از پیش‌مخلوط، غیرپیش‌مخلوط، قسمتی پیش‌مخلوط، آرام و مغشوش به کار رفته است، ولیکن، هنوز این روش به صورت عملی برای مدل‌سازی احتراق در مشعل‌های متخلخل واقعی که شعله بتواند در آن مدفون شود، به کار نرفته است.

هدف اصلی این تحقیق بررسی خصوصیات شعله در داخل محیط‌های متخلخل و بررسی فرایندهای انتقال حرارتی در آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی و با استفاده از روش FGM است. علی‌رغم بررسی این موضوع در تحقیقات متعدد، در این تحقیق، بر این نکته تاکید شده است که شبیه‌سازی احتراق در این محیط‌ها به صورتی انجام شود که با کمترین هزینه محاسباتی همراه شود تا بررسی گفته‌شده برای مشعل‌های با هندسه و مدل‌های شیمیایی مختلف قابل استفاده و در حداقل زمان قابل انجام باشد.

1. Jacobian  
2. Singular Perturbation  
3. Bray-Moss-Libby  
4. Progress variable  
5. Flame surface density  
6. Flamelet Generated Manifold  
7. Intrinsic Low Dimensional Manifolds

## معادلات حاکم

اولین قدم برای استفاده از روش FGM تولید فلیملت است. برای تولید فلیملت یک‌بعدی از این فرض استفاده می‌شود که از تمامی جملاتی که سبب ایجاد اعوجاج در شعله پیش‌مخلوط می‌شوند، مانند انحنا و خمیدگی، در معادلات شعله یک‌بعدی صرف‌نظر می‌شود. با این فرض، معادلات بقای جرم، گونه‌ها و انتالپی برای فلیملت پایا به صورت زیر در می‌آید [۱۶]:

$$\frac{\partial m}{\partial s} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(mY_i)}{\partial s} - \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{\lambda}{Le_i c_p} \frac{\partial Y_i}{\partial s} \right) = \dot{\omega}_i, \quad i = 1, \dots, N_s, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(mh)}{\partial s} - \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial s} \right) = \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{\lambda}{c_p} \sum_{i=1}^{N_s} \left( \frac{1}{Le_i} - 1 \right) h_i \frac{\partial Y_i}{\partial s} \right). \quad (3)$$

در این روابط،  $Y_i$  و  $h$  به ترتیب نسبت جرمی گونه‌های واکنشی و انتالپی کل است.  $\lambda$ ،  $c_p$  و  $Le_i$  خواص سیال بوده و به ترتیب معرف ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت حرارتی مخلوط و عدد لوییس هر گونه واکنشی است.  $m$  برابر حاصل ضرب چگالی در سرعت بوده و مقدار ویژه مسئله است. با استفاده از شروط مرزی (۴) و حل معادلات (۱) تا (۳)، فلیملت یک‌بعدی ساخته شده و در فضای برداری گونه‌ها تشکیل یک منحنی را می‌دهند که می‌توان آن را به عنوان منی‌فولد<sup>۱</sup> یک‌بعدی تلقی کرد.

$$Y_i(s \rightarrow -\infty) = Y_{i,-\infty}, \quad h(s \rightarrow -\infty) = h_{-\infty}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial Y_i}{\partial s}(s \rightarrow \infty) = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial s}(s \rightarrow \infty) = 0 \quad (5)$$

پس از حل معادلات بالا، مقادیر گونه‌ها به همراه دما در یک بانک اطلاعاتی به صورت تابعی از متغیر فضا،  $s$ ، ذخیره می‌شود. حال، اگر گونه‌ای شیمیایی پیدا شود که به صورت یکنوا با افزایش متغیر فضا تغییر کند، می‌توان تمامی گونه‌ها را برحسب آن گونه بیان کرد. در این صورت، به این گونه متغیر پیشرو اطلاق می‌شود، زیرا پیشرفت واکنش را می‌توان با تغییر آن رصد کرد. با این توصیف، چون تمام گونه‌ها تنها تابعی از یک متغیر پیشرو هستند، روش FGM به صورت یک‌بعدی است. دلیل این تغییر متغیر آن است که در شبیه‌سازی در هندسه واقعی متغیر فضا وجود ندارد و باید از یک متغیر جایگزین، که پیشرفت واکنش را تعیین می‌کند، استفاده کرد. انتخاب گونه شیمیایی مناسب، به عنوان متغیر پیشرو، بستگی به نوع مخلوط سوختنی دارد. همچنین، این گونه باید چنان انتخاب شود که در جدول فلیملت به صورت اکیداً افزایشی (از محصولات نهایی) و یا اکیداً کاهش‌دهنده (از واکنش‌دهنده‌ها) باشد. به طور مثال، انتخاب  $O_2$  و یا  $CO_2$  برای احتراق متان و هوا مناسب است، ولی انتخاب OH به تنهایی مناسب نیست، چون این رادیکال در طی واکنش هم تولید و هم مصرف می‌شود. البته، برای تخمین بهتر گونه‌ها در میدان، متغیر پیشرو می‌تواند به صورت ترکیب خطی چند گونه نیز انتخاب شود که در مجموع خاصیت افزایش و یا کاهش داشته باشند. نکته مثبت آن است که حتماً گونه‌ای یافت می‌شود که اکیداً یکنوا باشد.

حال، اگر برای تولید فلیملت، مقدار انتالپی در ورودی تغییر کند (تغییر  $h_{-\infty}$  در رابطه (۴))، تمامی متغیرها، علاوه بر متغیر پیشرو، تابعی از انتالپی هم خواهند بود. به این لحاظ، روش به صورت FGM دوبعدی در می‌آید. این تولید کتابخانه برای مسائلی است که مقدار انتالپی کل، به دلیل اثرات دیواره و مانند آن، در میدان تغییر می‌کند، به این صورت که به ازای هر مقدار ورودی  $h$ ، یک فلیملت جدید تشکیل می‌شود. پس از ایجاد بانک اطلاعاتی، می‌توان آن را با یک کد CFD استاندارد متصل کرد. یعنی، علاوه بر اینکه کد معادلات بقای جرم و تکانه سیال نیوتنی و معادله حالت (روابط (۶) تا (۸)) را حل می‌کند، معادلات انتقال متغیر پیشرو را نیز حل کند.

بقای جرم:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (6)$$

تکانه:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}) \quad (7)$$

معادله حالت سیال:

$$p = \rho RT \quad (8)$$

چون متغیر پیشرو از جنس گونه شیمیایی است، لذا، معادله انتقال پیشرو شبیه معادله انتقال یک گونه شیمیایی است.

$$\frac{\partial(\rho c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} c) = \dot{\omega}_c + \nabla \cdot \left( -\frac{\lambda}{Le_c c_p} \nabla c \right) \quad (9)$$

معادله انتالپی کل نیز به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود. در این رابطه، به دلیل اینکه انتالپی محسوس و انتالپی تشکیل همزمان در انتالپی کل قرار دارد، لذا این معادله شامل عبارت چشمه نیست.

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} h) - \nabla \cdot \left( \frac{\lambda}{c_p} \nabla h \right) = \nabla \cdot \left( \frac{\lambda}{c_p} \sum_{i=1}^{N_s} \left( \frac{1}{Le_i} - 1 \right) h_i \nabla Y_i \right) \quad (10)$$

در روابط بالا، بردار سرعت با  $\mathbf{v}$ ، مقدار فشار با  $p$ ، مقدار دما با  $T$ ، متغیر پیشرو با  $c$  و خواص مواد شامل چگالی با  $\rho$  و لزجت گاز با  $\mu$  و ثابت گاز با  $R$  و نهایتاً زمان با  $t$  نشان داده شده‌اند.

بنابراین، با استفاده از مقادیر ظرفیت حرارتی، لزجت، چگالی، عبارت چشمه شیمیایی و مقدار متغیر پیشرو، که در جدول فلیمنت ذخیره شده‌اند، مقادیر محلی متغیرهای پیشرو (که در اینجا تنها یکی از گونه‌ها و مقدار انتالپی است) در میدان حل به دست می‌آید. با استفاده از این مقادیر، می‌توان، از جدول فلیمنت، مقادیر گونه‌های دیگر و نیز دما را در کل میدان محاسبه کرد. در این حالت، روش FGM دوبعدی ایجاد شده است. این دو بعد متناظر با دو متغیر پیشرو، یعنی یکی از گونه‌ها و مقدار انتالپی، است. برای جستجوی مقادیر مورد نیاز، از یک میانمایی خطی دوبعدی استفاده شده است.

خصوصیت مهم این روش آن است که هم برای جریان آرام و هم برای جریان مغشوش قابل استفاده بوده و اثرات نفوذ و جابه‌جایی در آن لحاظ شده است (با توجه به رابطه (۹)). پیش‌تر، روش فلیمنت برای جریان‌های پیش‌مخلوط مغشوش مورد استفاده قرار می‌گرفت که براساس این روش مقدار هر گونه شیمیایی صرفاً به صورت ترکیب خطی مواد سوخته شده به دست می‌آید. یعنی:

$$Y = c Y_b + (1-c) Y_u \quad (11)$$

که در آن  $Y_b$  مقدار گونه در سمت مواد سوخته،  $Y_u$  مقدار گونه در سمت مواد نسوخته و  $c$  معرف متغیر پیشروی است. این روش با نام روش BML [۱۸،۱۷] شناخته می‌شود که صرفاً برای جریان‌های مغشوش مورد استفاده است.

## روش حل و اعتبارسنجی FGM برای شعله آرام آزاد

برای حل معادلات (۱) تا (۳)، از کد متن‌باز فلیمنت مستر<sup>۱</sup> [۱۹] استفاده شده است. این کد می‌تواند، با استفاده از روش نیوتون، سینتیک شعله پیش‌مخلوط غیرکششی را در یک بعد با استفاده از شبکه انطباقی<sup>۲</sup> حل کند. براساس سینتیک وارد شده به این کد که باید به فرمت کمکین<sup>۳</sup> باشد، جدول فلیمنت تولید می‌شود. این بانک اطلاعاتی شامل تمام نسبت جرمی گونه‌ها به همراه انتالپی کل، دما، چگالی، لزجت، ضریب هدایت، چشمه شیمیایی هرگونه و غیره است که برحسب  $s$  (متغیر فضا) بیان می‌شود. برای حل جریان سیال به همراه معادلات انتقالی متغیرهای پیشرو، یعنی معادلات (۶) تا (۱۰)، از کد متن‌باز اپن‌فوم<sup>۴</sup> [۲۰] استفاده شده است. این کد، که به زبان ++C و به صورت شی‌گرا نوشته شده است، برای حل عددی معادلات حاکم بر فرایندها

1. FlameMaster  
2. Adaptive  
3. CHEMKIN  
4. OpenFOAM

به کار می‌رود. فرایند حل جریان احتراقی توسط روش FGM به این شکل است که ابتدا در پیش‌پردازش، بانک اطلاعاتی فلیملت با کد فلیم‌مستر تولید می‌شود. در مرحله پردازش، باید یکی از گونه‌های مناسب به‌عنوان متغیر پیشرو انتخاب شود. سپس، در کد این‌فوم هندسه به‌همراه شبکه محاسباتی تولید و مقدار متغیر پیشرو در میدان حل مقدار اولیه می‌گیرد. با استفاده از یک تابع میان‌بند خطی، براساس مقدار متغیر پیشرو، مقادیر اولیه چگالی، ضریب هدایت حرارتی، گرمای حرارتی ویژه و چشمه شیمیایی در هریک از سلول‌هایی محاسباتی از درون جدول فلیملت میان‌بندی می‌شود. سپس، معادلات جریان سیال و پس از آن معادله انتقال متغیر پیشرو حل می‌شود. این مراحل تا همگرایی کامل میدان جلو می‌رود. پس از ارضای شرایط همگرایی، در مرحله پس‌پردازش، براساس مقدار متغیر پیشرو در میدان، دیگر گونه‌ها نیز از جدول فلیملت درون‌بندی می‌شود. شکل ۱ به‌صورت فلوجارت نحوه شبیه‌سازی احتراق آرام را با استفاده از FGM نشان می‌دهد.

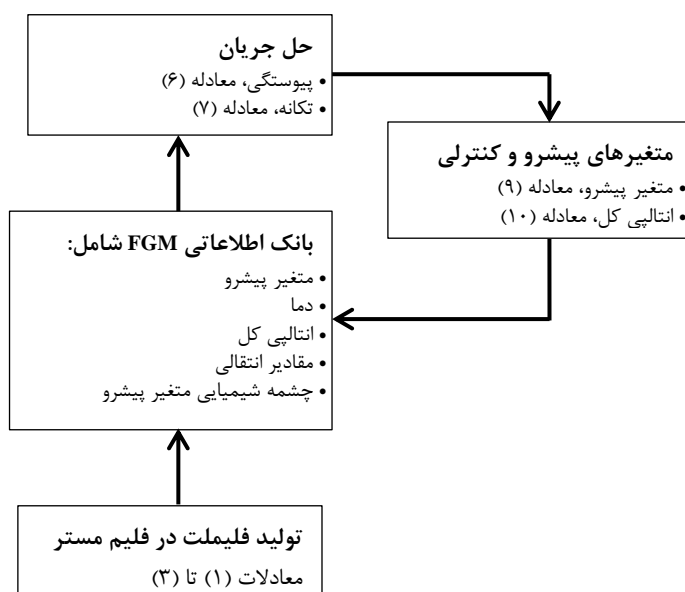


Figure 1- Lamiar combustion simulation process bu using FGM

شکل ۱- نحوه شبیه‌سازی احتراق آرام با FGM

به منظور محک‌زنی روش FGM به‌صورت اولیه و ساده، از یک محفظه احتراق یک‌بعدی با شعله پایدار استفاده شده است تا مقایسه این شعله با روش سینتیک جزئی بررسی شود. در این مورد، آزمایش مخلوط هوا و متان با نسبت هم‌ارزی واحد وارد یک محفظه غیرآدیاباتیک یک‌بعدی می‌شود. خروجی مشعل در نقطه  $x=0$  قرار گرفته و ناحیه مشعل که  $x < 0$  است در معرض دمای  $300\text{K}$  قرار گرفته است. شبکه به‌نحوی انتخاب شده است که حداقل  $10$  سلول در ناحیه واکنش قرار گیرد. شکل ۲ توزیع<sup>۱</sup> متغیر پیشرو، که در اینجا  $\text{CO}_2$  انتخاب شده، و دما را به‌ازای سرعت ورودی  $0.25\text{m/s}$  و مخلوط ورودی استوکیومتری با دمای  $300\text{K}$  نشان می‌دهد. مقادیر محاسبه‌شده با سینتیک جزئی (GRI1.2 که  $19$  گونه و  $84$  واکنش دارد [۲۱]) به‌صورت دوایر توپر و مقادیر محاسبه‌شده با روش FGM به‌صورت خط پیوسته مشخص شده‌اند. در این حلگر، که پایه حلگرهای این تحقیق به‌حساب می‌آید، فرض شده است که عدد لوییس (نسبت نفوذ حرارتی به نفوذ جرمی گونه) برابر واحد باشد. می‌توان مشاهده کرد که روش FGM توافق بسیار خوبی با روش سینتیک جزئی دارد. نکته قابل ذکر این است که علاوه بر اینکه زمان مورد نیاز برای حل در روش FGM به‌مراتب کاهش می‌یابد، شبکه محاسباتی مورد نیاز در ناحیه واکنش در روش FGM را

می توان بزرگتر در نظر گرفت. زیرا، خواص مورد نیاز برای حل معادلات از جدول فلیمیت میانبایی می شود. کاهش زمان محاسبات با استفاده از روش FGM در این شبیه سازی یک بعدی نسبت به روش سینتیک جزئی از مرتبه ۵ است.

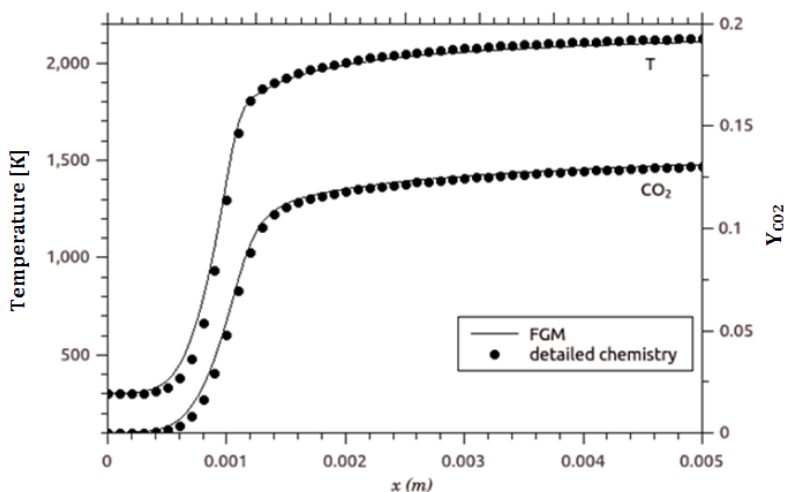


Figure 2- Profiles of progress variable and temperature in a flame-stabilized burner

شکل ۲- توزیع دما متغیر پیشرو و دما در یک مشعل یک بعدی با شعله پایدار

### احتراق در محیط متخلخل

در این بررسی نتایج تجربی مشعل متخلخل طراحی شده توسط دوازده امامی و همکاران [۲۳، ۲۲]، برای بررسی رفتار شعله در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف و نیز در نرخ آتش‌های متعدد، مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعه آزمایشگاهی مذکور برای ترکیب مختلف سرامیک‌های فومی از جنس SiC به لحاظ ضخامت صورت پذیرفته است. این مطالعات به دو صورت بررسی گذرا و پایا بوده که در آن‌ها حرکت و یا محل قرارگیری شعله با استفاده از ترموکوپل‌های به کار رفته در بدنه مشعل رصد شده است. بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داد که برای برخی حالات تنها شعله پایا در مشعل وجود دارد و در بیشتر موارد، شعله به ناحیه بالادست مشعل نفوذ و یا برگشت می‌کند. علت برگشت شعله وجود رژیم‌های زیرآدیاباتیک<sup>۱</sup> [۲۵، ۲۴] و استفاده از سرامیک‌هایی در ناحیه بالادست مشعل است که موج احتراقی می‌تواند در آن‌ها حرکت کند [۲۶-۲۹]. به دلیل ماهیت پایابودن معادلات به کار رفته در کار حاضر تنها شعله پایای پدیدآمده در مشعل، شبیه‌سازی شده است. بر این اساس، در ادامه، فرایند احتراق در این مشعل با نسبت هم‌ارزی واحد برای مخلوط گاز طبیعی و هوا و در توان کاری ۲kW مورد مطالعه قرار می‌گیرد. طرحواره مشعل مورد بررسی در شکل ۳ نشان داده شده است.

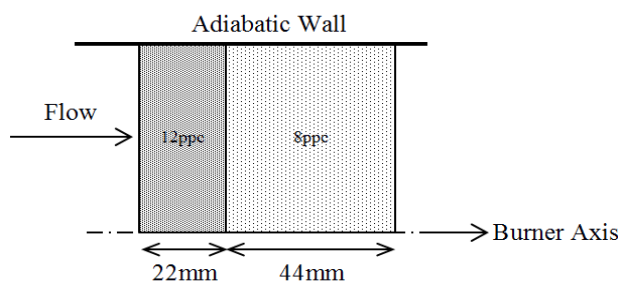


Figure 3- Schematic of the studied porous burner

شکل ۳- طرحواره مشعل متخلخل مورد مطالعه

1. Sub-adiabatic

خصوصیات این مشعل نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خواص محیط متخلخل مورد استفاده در شبیه‌سازی یک‌بعدی

Table 1- Porous burner properties in 1D simulation

| Parameters             | Upstream            | Downstream           |
|------------------------|---------------------|----------------------|
| Pore Size              | 12ppc               | 4ppc <sup>1</sup>    |
| Mean Pore Diameter     | 0.08cm              | 0.1725cm             |
| Porosity               | 0.85                | 0.9                  |
| Extinction Coefficient | 5.6cm <sup>-1</sup> | 1.73cm <sup>-1</sup> |
| C                      | 0.456               | 0.146                |
| m                      | 0.7                 | 0.96                 |

مقدار ضریب انتقال حرارت هدایتی در محیط متخلخل سرامیکی  $\lambda_s$  از جنس SiC از رابطه (۱۲) محاسبه شده است [۳۰] که  $T_s$  دمای جامد است.

$$\lambda_s = 141 - 0.0714T_s \quad (12)$$

برای مقدار ضریب انتقال حرارت موثر در فاز جامد برای اثر تابش از تخمین هدایت حرارتی روزلاند بهره گرفته شده است. به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی در مورد ضرایب  $C$  و  $m$  برای محاسبه ضریب انتقال حرارت حجمی، که در رابطه (۱۲) داده شده است، این مقادیر براساس روابط ارائه شده برای سرامیک‌های فومی از جنس آلومینا تخمین زده شده است [۳۱].

$$Nu_v = h_v d^2 / \lambda_g = C Re^m \quad (13)$$

نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده نشان داد که شعله‌ای که در مشعل ایجاد شده است به صورت کاملاً تخت است [۳۱]. این پدیده به خاطر سرعت نسبتاً پایین ورودی (که در ادامه اشاره خواهد شد) و نیز توزیع سرعت یکنواخت ورودی است. بنابراین، فرضیات اصلی استفاده شده در این مسئله شامل موارد زیر است:

- جریان سیال و انتقال حرارت به صورت یک‌بعدی فرض شده است.
- جریان آرام فرض شده است.
- از تابش گاز صرف نظر شده است.
- برای تابش جسم جامد از تخمین دیفیوژن روزلاند استفاده شده است.
- محیط متخلخل غیرکاتالیستی است.
- از اثرات دوفور<sup>۲</sup> و سورت<sup>۳</sup> صرف نظر شده است.
- مقدار پراکنش حرارتی و جرمی ناچیز فرض شده است.
- عدد لوییس برای تمامی گونه‌ها واحد است.
- از اثرات شناوری صرف نظر شده است.
- تراکم‌پذیری لحاظ نشده است و فاز گاز، ایدئال است.
- از GRI1.20 [۲۱] به عنوان سینتیک واکنشی در این شبیه‌سازی استفاده شده است.
- مشعل متقارن محوری است.

در اینجا از روش FGM دوبعدی، یعنی با دو متغیر کنترلی، استفاده شده است. شرط مرزی ورودی به صورت مقادیر معلوم سرعت و دما و مقادیر معلوم برای متغیرهای کنترلی (یک متغیر پیشروی واکنشی و دیگری انتالپی) است. دمای ورودی برای گاز برابر ۳۰۰ K است. مقدار دمای جامد با استفاده از تبادل حرارتی این فاز با خارج از مشعل و دمای گاز به دست می‌آید [۳۲].

1. Pores Per Centimeter  
2. Dufour  
3. Soret



در مرز خروجی، فرض شده است که جامد با ضریب انتشار واحد با یک جسم سیاه با دمای  $300\text{ K}$  تبادل حرارت می‌کند (همانند شرط مرزی ورود). برای متغیرهای کنترلی و دمای فاز گاز در این مرز گرادبان صفر در نظر گرفته شده است. برای حل این مسئله، از  $20$  عدد فلیملت برای تشکیل منیفولد استفاده شده است. این فلیملتها در نسبت هم‌ارزی  $1/0$  با استفاده از شرط مرزی دمای ورودی از  $240\text{ K}$  تا  $1100\text{ K}$  تولید شده‌اند. برای تولید فلیملتها با انتالپی ورودی پایین‌تر، شرط مرزی دما بر روی  $240\text{ K}$  نگه داشته شده و ترکیب مخلوط ورودی فلیملت با اضافه کردن  $\text{H}_2\text{O}$  و  $\text{CO}_2$  به نحوی تغییر می‌کند که تعداد عنصرها ثابت می‌ماند. این کار تا جایی انجام می‌شود که احتراق در مخلوط میسر نباشد. در این مسئله، تنها دو فلیملت به این روش تولید شده است. اگر در حین شبیه‌سازی مشعل متخلخل نیاز به انتالپی کمتر از سردترین فلیملت<sup>۱</sup> باشد، مقادیر مورد نیاز از درون‌یابی در ناحیه با انتالپی پایین (شکل ۴) استفاده می‌شود. در حین انجام شبیه‌سازی، مقدار انتالپی حتی ممکن است پایین‌تر از "سردترین" فلیملت قرار گیرد. در این ناحیه، مقدار هر متغیر از میانبایی مقادیر متناظر در سردترین فلیملت، مقادیر تعادلی (که با  $\eta=1$  نمایش داده شده)، مخلوط نسوخته (که با  $\eta=0$  نمایش داده شده) و مقدار متغیر در کمترین میزان انتالپی (نقطه A) به دست می‌آید.

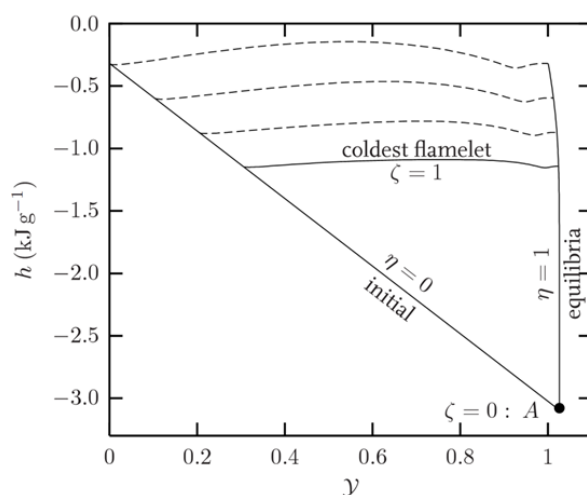


Figure 4- Low-enthalpy region

شکل ۴- ناحیه با انتالپی پایین

شکل ۵ منیفولد تولیدشده برای عبارت چشمه شیمیایی برای متغیر پیشرو و نیز مقدار گونه  $\text{CO}$  براساس فلیملتها تولیدشده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵، مقدار چشمه شیمیایی، که در محاسبه متغیر پیشرو در میدان حل به کار می‌رود، با افزایش مقدار انتالپی، افزوده شده و بازه گسترده‌تری از مقدار متغیر پیشرو را دربر می‌گیرد. نکته حائز اهمیت در مقدار گونه  $\text{CO}$  این است که به دلیل سرعت تشکیل پایین‌تر این گونه نسبت به دیگر گونه‌های واکنشی، علی‌رغم اعمال شرط مرزی گرادبان صفر برای همه گونه‌ها در خروجی فلیملتها (PV<sup>۱</sup> برابر یک) در کد فلیلمستر، این گونه نمی‌تواند به تعادل برسد. برای حل عددی مسئله، از  $400$  سلول یک‌بعدی به‌عنوان شبکه مورد نظر برای حل استفاده شده است. شبکه محاسباتی به‌نحوی بر روی شبکه انتخاب شده است که در ناحیه جبهه شعله، که بیشترین مقدار چشمه شیمیایی است، شبکه متراکم شود. سرعت و دمای مخلوط هوا و سوخت ورودی در مشعل شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر  $10\text{ cm/s}$  و  $300\text{ K}$  است. با توجه به اینکه مخلوط هوا و متان، که در اینجا به‌عنوان جایگزین برای گاز طبیعی انتخاب شده است (گاز طبیعی مورد استفاده دارای

1. Coldest flamelet  
2. Progress Variable

حدود ۹۰ درصد متان است)، در نسبت هم‌ارزی واحد دارای سرعت شعله‌ای حدود ۴۵ cm/s است، در این مشعل یک رژیم زیرآدیباتیک اتفاق می‌افتد [۳۳]. بنابراین، باید در این حالت، برای ایجاد پایداری شعله، مقدار انتقال حرارت به خارج از مشعل به اندازه‌ای باشد که بتواند به حرارت تولیدشده از مخلوط غلبه کند و شعله برگشت نکند. در اینجا نیز، برای سردکردن ناحیه احتراق از شار حرارتی خروجی در دیواره‌های مشعل استفاده شده است [۳۴].

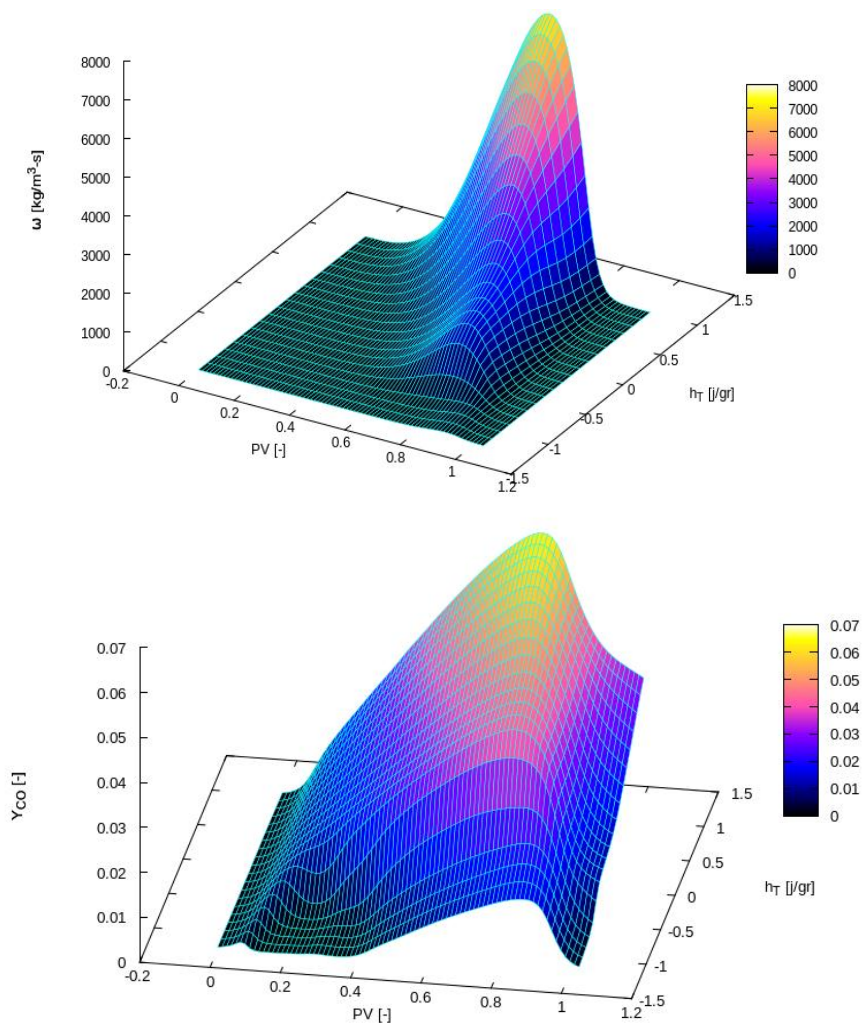


Figure 5- Manifolds of CO concentration and chemical source term

شکل ۵- منیفولدهای مربوط به مقدار عبارت چشمه شیمیایی و گونه شیمیایی CO (PV نشان‌دهنده متغیر پیشروی و  $h_T$  نماینده انتالپی کل است).

پس از در نظر گرفتن مقدار اولیه برای متغیر پیشروی در ناحیه پایین دست مشعل شبیه‌سازی آغاز می‌شود و تا همگرایی کامل ادامه می‌یابد. زمان محاسباتی اجرای شبیه‌سازی یک‌بعدی انجام‌شده، از شروع اجرا تا همگرایی کامل، در حدود ۲۰۰۰ ثانیه با استفاده از یک پردازشگر ۲/۱۳ GHz از نوع اینتل است. این در حالی است که اگر این شبیه‌سازی با استفاده از روش سینتیک جزئی صورت پذیرد، در حدود یک روز نیاز به زمان دارد. به بیان دیگر، در این شبیه‌سازی افزایش سرعت محاسبات در حدود ۵۰ برابر بوده است. این امر نشان می‌دهد که با استفاده از این روش می‌توان مطالعات پارامتری را بسیار سریع‌تر از روش‌های متداول مانند سینتیک جزئی انجام داد.

نمودارهای دمای مشعل و انتالپی کل و عبارت چشمه شیمیایی بر روی محور مشعل در شکل ۶ نشان داده شده است.

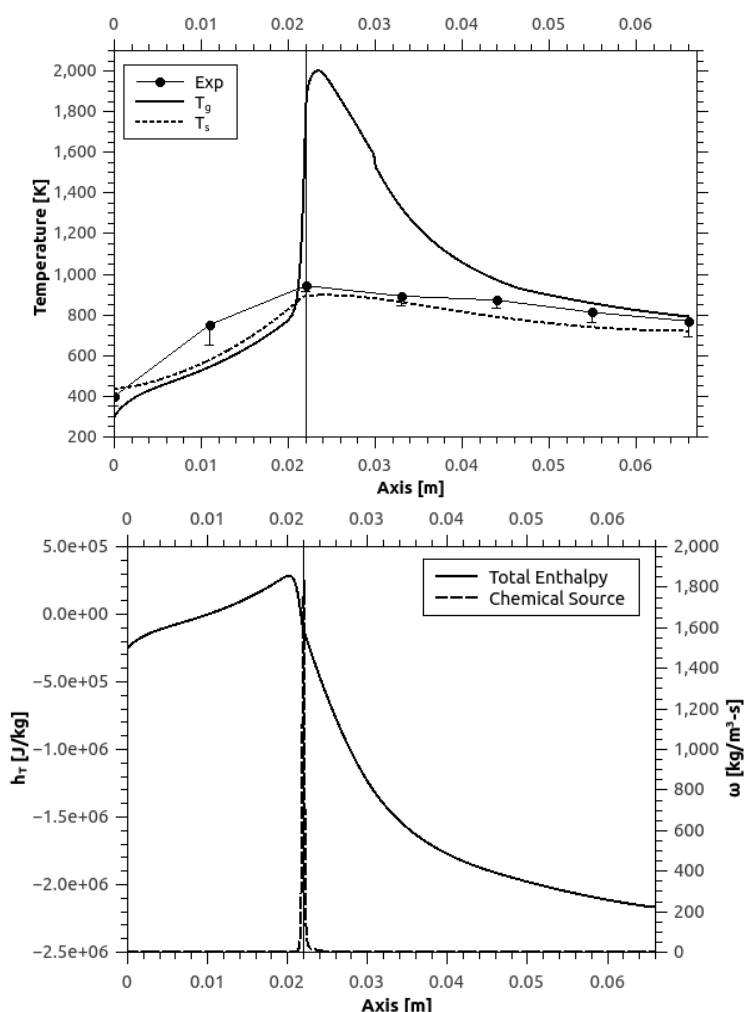


Figure 6- Profiles of solid and gas temperature, total enthalpy and chemical source term of progress variable for the simulated porous burner. Vertical line shows the interface of two porous beds

شکل ۶- نمودارهای دمای مشعل و انتالپی کل و عبارت چشمه شیمیایی بر روی محور مشعل: خط عمودی نشان دهنده مرز میان دو نوع محیط متخلخل

نمودارهای دما تطابق مناسبی را با نتایج حاصل از آزمایش دارد. این نمودار نشان می‌دهد که با استفاده از محیط‌های متخلخل محدوده انجام واکنش وسیع‌تر از حالتی است که احتراق در یک مخلوط گازی صورت گیرد. کاهش دمای جامد و به تبع آن، دمای فاز گاز به دلیل انتقال حرارت حجمی قرار داده شده در مسئله و نیز انتقال حرارت تابشی به بیرون از محیط‌های متخلخل است. دمای اندازه‌گیری شده نزدیک به دمای جامد است، زیرا محل نصب ترموکوپل‌ها در قسمت بیرونی مشعل و چسبیده به بدنه خارجی سرامیک‌هاست. بنابراین، انتظار می‌رود که دمای جامد پیش‌بینی شده به دمای جامد در آزمایش تمایل داشته باشد.

افزایش مقدار انتالپی کل در ناحیه پیش‌گرمایش، یعنی در سرامیک بالادستی، به دلیل بیشتر بودن دمای جامد از دمای گاز در این ناحیه است که ناشی از هدایت و تابش از ناحیه پایین‌دست به این ناحیه است. پس از انجام واکنش، در ناحیه‌ای که میزان چشمه شیمیایی بیشینه است، دمای گاز بیش از دمای جامد شده، ولی، در همان حال، از میزان انتالپی کل گاز کاسته

می‌شود. مقدار انتالپی در خروجی مشعل حتی کمتر از انتالپی ورودی (که در حدود  $2/5 \text{ J/g}$  است) شده است. بیشترین میزان انتالپی مربوط به نقطه‌ای است که دمای جامد و گاز تداخل کرده‌اند، یعنی بر روی مزر بین دو محیط متخلخل. از ابتدای ورود مخلوط به محیط متخلخل، دمای فاز جامد بیش از دمای گاز است. لذا، انتظار می‌رود، هرچه مخلوط به سمت پایین دست حرکت می‌کند، بر انتالپی آن افزوده شود. زمانی که واکنش صورت می‌گیرد، دمای فاز گاز از فاز جامد پیشی گرفته و از این نقطه به بعد، از مقدار انتالپی کل کاسته می‌شود.

در شکل ۷، نمودارهای مقدار گونه CO و HC (مجموع کل هیدروکربن‌ها)، که اصولاً به‌عنوان مقادیر تعیین‌کننده در آلاینده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد، نشان داده شده است. نتایج آزمایشگاهی حاصل از اندازه‌گیری مقدار CO نشان می‌دهد که در خروجی مشعل این مقدار حدوداً برابر  $0/025$  است [۳۳]. این در حالی است که نتایج عددی مقداری حدود ۲ برابر این مقدار را ارائه کرده است. با توجه به شکل ۵، که نشان می‌دهد مقدار این گونه شیمیایی در انتهای فلیلمت به تعادل نرسیده است، می‌توان استنباط کرد که استفاده از فلیلمت پایا نمی‌تواند گونه‌هایی که دارای سرعت تشکیل و یا نابودی کمتری نسبت به دیگر گونه‌ها هستند را به‌خوبی پیش‌بینی کند و نیاز به روش‌های دیگری نظیر اضافه‌کردن یک بعد دیگر به جدول فلیلمت در روش FGM برای افزایش دقت روش است. یعنی، به‌جای میانمایی با استفاده از متغیر پیشرو و متغیر کنترلی برای یافتن هر خاصیت و یا مقدار، از ۳ متغیر برای میانمایی بهره گرفته شود.

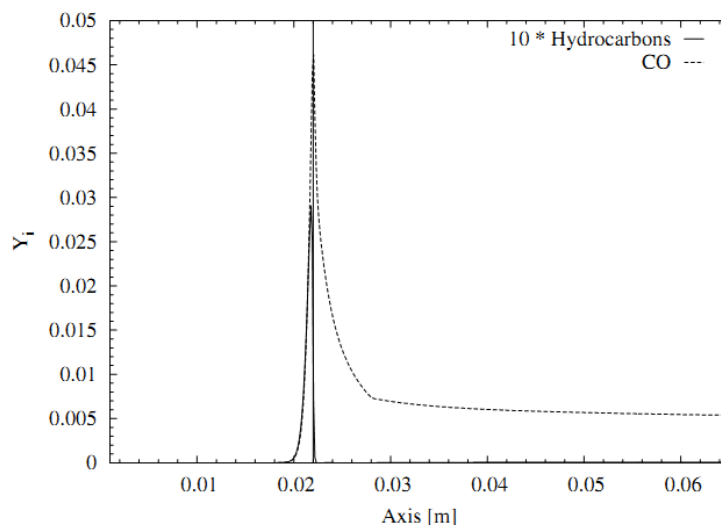


Figure 7- CO and HC concentration profiles  
 شکل ۷- نمودارهای گونه‌های CO و HC بر روی محور

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روش FGM به‌عنوان روشی برای مدل‌سازی احتراق پیش‌مخلوط در داخل محیط‌های متخلخل معرفی شد. برای حل جریان احتراقی با روش FGM، ابتدا، فلیلمت‌هایی با شروط مرزی مختلف تولید شده و مقدار هر گونه و یا خاصیت به‌عنوان منیفولدهای مختلف در یک بانک داده به‌صورت جدول ذخیره می‌شود. در این مطالعه، کلیه داده‌های جدول به‌صورت تابعی از یک یا دو متغیر تعریف شدند. در این مطالعه، به‌منظور صحت‌سنجی، نتایج حاصل از روش FGM با دو متغیر پیشرو برای مشعل شعله پایدار با نتایج حاصل از روش سینتیک جزئی مقایسه و دقت آن سنجیده شد. استفاده از روش FGM زمان محاسبات را حداقل ۵۰ برابر کاهش می‌دهد. روش FGM برای مدل‌سازی احتراق در یک مشعل متخلخل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی شامل نمودارهای دما، انتالپی و گونه‌های شیمیایی مختلف است. نمودارهای دما تطابق

مناسبی را با نتایج حاصل از آزمایش دارد و دمای جامد پیش‌بینی شده نزدیک به دمای آزمایش است. مقدار CO به‌دست آمده از آزمایش کمتر از مقداری است که از شبیه‌سازی به‌دست آمده است که به‌دلیل به تعادل نرسیدن گونه در مکانیزم در صورت استفاده از فلیملت پایاست. به‌طور کلی، می‌توان گفت روش FGM نه‌تنها دارای سهولت اعمال در جریان‌های واکنشی است، بلکه دارای دقت کافی در مقایسه با روش سینتیک جزئی است و نیز زمان اجرای محاسبات را تا حد زیادی کاهش داده و مطالعات پارامتری را میسر می‌سازد.

## منابع

1. M. Abdul Mujeebu, M. Z. Abdullah, M. Z. A. Bakar and A. A. Mohamad, "Development of premixed burner based on stabilized combustion within discrete porous medium," *Journal of Porous Media*, 14, 2011, pp. 909-917.
2. S. Wood and A. T. Harris, "Porous burners for lean-burn applications," *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 2008, pp. 667-684.
3. J. R. Howell, M. J. Hall and J. L. Ellzey, "Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media," *Progress in Energy and Combustion Science*, 22, 1996, pp. 121-145.
4. J. H. M. Ten Thije Boonkkamp and L. P. H. De Goey, "A flamelet model for premixed stretched flames," *Combustion Science and Technology*, 149, 1999, pp. 183-200.
5. C. C. Douglas, A. Ern and M. D. Smooke, "Multigrid solution of flame sheet problems on serial and parallel computers," *Parallel Algorithms and Applications*, 10, 1997, pp. 225-236.
6. D. Thévenin, F. Behrendt, U. Maas, B. Przywara and J. Warnatz, "Development of a parallel direct simulation code to investigate reactive flows," *Computers & Fluids*, 25, 1996, pp. 485-496.
7. B. A. V. Bennett and M. D. Smooke, "Local rectangular refinement with application to axisymmetric laminar flames," *Combustion Theory and Modelling*, 2, 1998, pp. 221-258.
8. N. Peters, "Laminar flamelet concepts in turbulent combustion," *Symposium (International) on Combustion*, 21, 1988, pp. 1231-1250.
9. S. H. Lam and D. A. Goussis, *Conventional Asymptotics and Computational Singular Perturbation for Simplified Kinetics Modelling*, Springer Verlag, 1991.
10. U. Maas and S. B. Pope, "Laminar flame calculations using simplified chemical kinetics based on intrinsic low-dimensional manifolds," *Symposium (International) on Combustion*, 25, 1994, pp. 1349-1356.
11. P. A. Libby and K. N. C. Bray, "Implications of the laminar flamelet model in premixed turbulent combustion," *Combustion and Flame*, 39, 1980, pp. 33-41.
12. K. N. C. Bray and J. B. Moss, "A unified statistical model of the premixed turbulent flame," *Acta Astronautica*, 4, 1977, pp. 291-319.
13. J. A. van Oijen and L. P. H. de Goey, "Modelling of Premixed Laminar Flames using Flamelet-Generated Manifolds," *Combustion Science and Technology*, 161, 2000, pp. 113-137.
14. J. A. van Oijen, *Flamelet-Generated Manifolds: Development and Application to Premixed Laminar Flames*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, 2002.
15. P. Pantangi, A. Sadiki, J. Janicka, M. Mann, A. Dreizler, "LES of premixed methane flame impinging on the wall using non-adiabatic flamelet generated manifold (FGM) approach," *Flow, Turbulence and Combustion*, 92, 2014, pp. 805-836.
16. J. A. van Oijen and L. P. H. de Goey, "Modelling of premixed counterflow flames using the flamelet-generated manifold method," *Combustion Theory and Modelling*, 6, 2002, pp. 463-478.
17. K. N. C. Bray and P. A. Libby, *Recent Developments in the BML Model of Premixed Turbulent Combustion*, Academic Press, New York, 1994.
18. E. Schneider, A. Maltsev, A. Sadiki and J. Janicka, "Study on the potential of BML-approach and G-equation concept-based models for predicting swirling partially premixed combustion systems: URANS computations," *Combustion and Flame*, 152, 2008, pp. 548-572.
19. H. Pitsch, FlameMaster v3. 1: A C++ computer program for 0D combustion and 1D laminar flame calculations, 1998.
20. H. G. Weller, G. Tabor, H. Jasak, C. Fureby, "A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques," *Computers in Physics*, 12, 1998, pp. 620-631.
21. M. Frenklach, H. Wang, M. Goldenberg, G. P. Smith, D. M. Golden, C. T. Bowman, R. K. Hanson, W. C. Gardiner and et al., *{GRI}-Mech: an optimized detailed chemical reaction mechanism for methane combustion*, Gas Research Institute Topical Report, Report No. GRI-95/0058, November 1, 1995.

22. M. D. Emami, H. Atoof and M. R. Rezaeibakhsh, "An Experimental Study of Flashback Phenomenon in a Two-Layer Porous Media," *Journal of Fuel and Combustion*, 5, 2012, pp. 31-42.
23. M. D. Emami, H. Atoof and M. R. Rezaeibakhsh, "Flashback phenomenon in a two-layer porous media: an experimental study," *Journal of Porous Media*, 19, 2016, pp. 1-28.
24. W. M. Mathis and J. L. Ellzey, "Flame stabilization, operating range, and emissions for a methane/air porous burner," *Combustion Science and Technology*, 175, 2003, pp. 825-839.
25. B. J. Vogel and J. L. Ellzey, "Subadiabatic and superadiabatic performance of a two-section porous burner," *Combustion Science and Technology*, 177, 2005, pp. 1323-1338.
26. S. A. Hashemi and H. Atoof, "An Experimental Study of the Effect of Thickness and Porosity on the Performance of a Porous Metal Radiation Burner," *Journal of Fuel and Combustion*, 2, 2009, pp. 11-23.
27. S. A. Hashemi, J. Amani and H. Atoof, "Experimental study of flame stability in SiC porous media," *AmirKabir University of Technology Journal*, 43, 2010, pp. 59-70.
28. V. S. Babkin, A. A. Korzhavin and V. A. Bunev, "Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media," *Combustion and Flame*, 87, 1991, pp. 182-190.
29. Y. M. Laevskii and V. S. Babkin, "Stabilized gas combustion wave in an inert porous medium," *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 44, 2008, pp. 502-508.
30. M. Farzaneh, M. Shafiey, R. Ebrahimi and M. Shams, "Numerical investigation of premixed combustion in a porous burner with integrated heat exchanger," *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 48, 2012, pp. 1273-1283.
31. L. B. Younis and R. Viskanta, "Experimental determination of the volumetric heat transfer coefficient between stream of air and ceramic foam," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36, 1993, pp. 1425-1434.
32. M. Maerefat, M., Khosravy el-Hossaini and K. Mazaheri, "Numerical Modeling of Two-Dimensional Cylindrical Porous Radiant Burners With Sidewall Heat Losses," *Journal of Porous Media*, 14, 2011, pp. 317-327.
33. M. Davazdah Emami, H. Atoof and M. R. Rezaeibakhsh, "Flashback Phenomenon in a two-layer porous media: an experimental study," *Journal of Porous Media*, 19, 2016, pp. 1-28.
34. J. A. Van Oijen, F. A. Lammers, L. P. H. De Goey, "Modeling of complex premixed burner systems by using flamelet-generated manifolds," *Combustion and Flame*, 127, 2001, pp. 2124-2134.

## English Abstract

### Submerged Flame in Porous Media: A Numerical Study using FGM

Hossein Atoof<sup>1</sup> and Mohsen Davazdah Emami<sup>2\*</sup>

1- Mechanical Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, h.atooof@me.iut.ac.ir

2- Mechanical Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, mohsen@cc.iut.ac.ir

\*Corresponding author

(Received: 2017.09.30, Received in revised form: 2017.12.16, Accepted: 2018.02.14)

In this study a new method for computing reacting flow in porous media is presented, which can be considered as a combination of two existing reduced chemistry approaches, i.e. the flamelet and manifold approach, to speed up flame calculations. This method, referred to as the Flamelet-Generated Manifold (FGM), shares the idea with the flamelet approaches that a multi-dimensional flame may be considered as a set of one-dimensional flames. The thermo-chemical variables are stored in a database, which can be used in subsequent flame simulations. During flame simulation, conservation equations have to be solved for the controlling variables only. Test results of a two-dimensional methane/air flame shows that detailed chemistry computations are reproduced very well using FGM with only one progress variable, apart from the enthalpy to account for energy losses. Using the FGM method, the computation time has been reduced several times that demonstrates the enormous potential of this method. In addition, submerged flames within a porous medium are simulated to show the applicability of the presented method in predicting reacting flow in variable enthalpy problems. The predicted solid and gas temperatures are comparable with experimental values that demonstrates the ability of the FGM method.

**Keywords:** Porous media, premixed combustion, FGM method