

## اثر دیواره موجدار بر احتراق پیش آمیخته متلاطم متان-هوا در محیط متخلخل

سید علی ناقدی فر<sup>۱\*</sup>، حمید ممهدی هروی<sup>۲</sup> و ایمان زحمتکش<sup>۳</sup>

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مکانیک، مشهد، ایران

(\*سید علی ناقدی فر: ali.naghedifar@yahoo.com)

### چکیده

این مقاله به شبیه سازی عددی احتراق متلاطم متان در یک محیط متخلخل دوبعدی با دیواره موجدار می پردازد. هدف، بررسی تاثیر دیواره موجدار بر احتراق پیش آمیخته در محیط های متخلخل است. برای این منظور، محاسبات برای دیواره های تخت و موجدار انجام شده و نتایج با هم مقایسه می شوند. علاوه بر این، اثر اختلاف فاز دیواره های موجدار بالا و پایین و همچنین تاثیر اندازه دامنه موج سینوسی مورد بررسی قرار می گیرند. نتایج نشان می دهد که موجدار کردن دیواره، افزایش دمای گازهای خروجی و کاهش انتشار CO و هیدروکربن های نسوخته را در پی دارد. در یک دامنه موج یکسان، کمترین انتشار هیدروکربن های نسوخته، CO و NO در اختلاف فاز ۹۰ درجه رخ می دهد و در اختلاف فاز یکسان، با افزایش دامنه، انتشار CO و هیدروکربن های نسوخته کاهش یافته و دما و انتشار NO افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: دیواره موجدار - محیط متخلخل - احتراق پیش آمیخته - حل عددی

### ۱- مقدمه

مدل سازی عددی، ابزاری مهم در طراحی و بهینه سازی احتراق صنعتی و تجهیزات آن است. برخی از کاربردهای آن عبارتند از بهینه سازی فرآیند احتراق، افزایش بازده انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای. به علت افزایش جهانی استفاده از سوخت های فسیلی، کنترل انتشار آلاینده ها به هدفی کلی و مهم تبدیل شده است. در ده سال اخیر، شاهد توسعه تحقیقات عددی به منظور بررسی فرآیندهای احتراق با استفاده از سوخت های متفاوت، باهوا و یا اکسیژن خالص و یا ترکیبی از هر دو به عنوان اکسیدکننده بوده ایم. مطالعات مذکور در هندسه های گوناگون با توجه به تجهیزات صنعتی احتراق، اطلاعاتی را شامل دما، سرعت و غلظت گونه ها فراهم نموده اند [۱]. علی رغم تحقیقات وسیع در زمینه منابع انرژی های نو، احتراق به عنوان روش متداول تولید انرژی در بسیاری صنایع اعم از تولید فلزات، همچنان کاربرد دارد [۲]. به منظور افزایش بازده فرآیند احتراق و کاهش آلاینده های ناشی از آن، تمرکز اصلی بر طراحی مشعل قرار داده شده است. از جمله انتخاب های مناسب برای بهبود کیفیت احتراق، مشعل های متخلخل هستند. توجه ویژه به مشعل های متخلخل به دلیل مزیت هایی از قبیل بازده تابشی بالا، کاهش انتشار NOx، سرعت بالای شعله، کاهش حجم مشعل، افزایش محدوده شعله وری، توزیع یکنواخت حرارت و کاهش سروصدا و کارایی در نسبت های هم ارز پایین است [۳ و ۴].

توسط وو و همکاران [۵] تحقیقاتی در زمینه مقایسه شعله بنزن به عنوان شعله معمولی و شعله در محیط متخلخل انجام شده است. آنها با مقایسه این دو شعله برای اجاق خانگی نتیجه گرفتند که بازده و انتشار گونه های آلاینده در شعله متخلخل بر خلاف شعله بنزن، از شرایط مرزی ظرف سرد روی شعله، تاثیر بسیار کمی می پذیرد.

یکی از عوامل موثر بر احتراق در محیط های متخلخل شرایط مرزی است. محمدی و حسین پور [۶] به بررسی سینتیک شیمیایی و دمای دیواره بر عملکرد مشعل در محیط متخلخل پرداخته اند. همچنین حسین پور و حدادی [۷] اثر پارامترهای شعله

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مکانیک، مشهد، ایران

۲-استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مکانیک، مشهد، ایران

۳-استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مکانیک، مشهد، ایران



یک را بعدیبر تولید آلاینده‌ها بررسی نمودند.

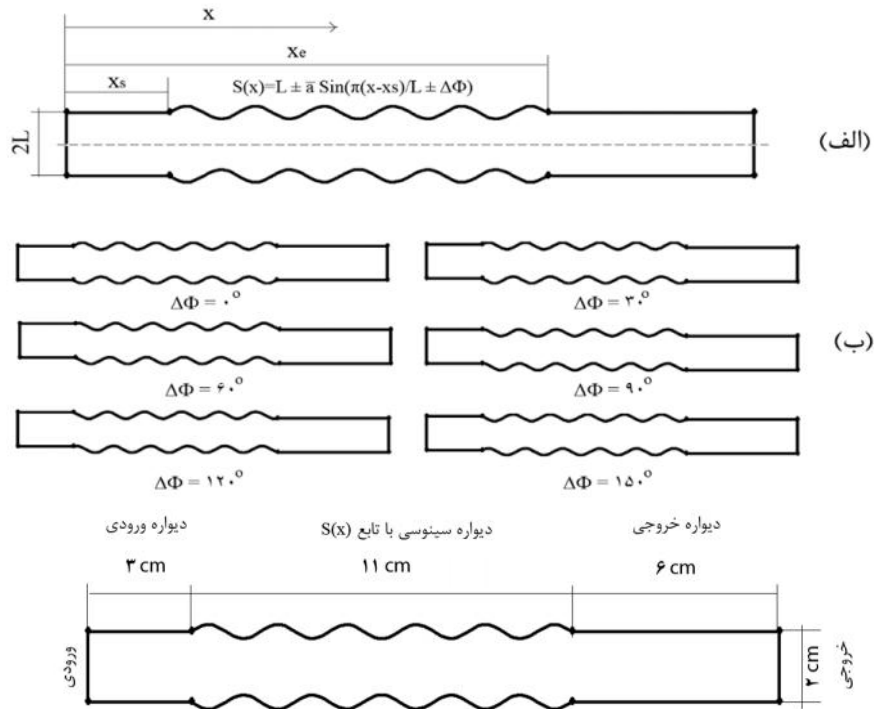
برخی از مقالات به بررسی آزمایشگاهی شرایط مرزی شعله در محیط متخلخل پرداخته‌اند. علاوه بر وو و همکاران [۵] که ظرف سرد را به عنوان شرایط مرزی بررسی کرده‌اند، می‌توان به بررسی شرایط مرزی دمایی توسط جورجویچ و همکاران [۸] اشاره کرد. آنها بیان کردند که می‌توان با تغییر شرایط مرزی دمایی، تولید  $\text{NO}_x$  را کنترل کرد. همچنین بار و الزی [۹] تاثیر بازگردش گرما (Heat Recirculation) و انتقال حرارت را بر شعله در محیط متخلخل بررسی کردند. آنها با بررسی شعله یک بعدی وابسته به زمان، بازده تشعشعی در خروجی را ارائه کرده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد با افزایش نسبت هم ارزی عملکرد بازگردش گرما کاهش می‌یابد.

تعداد مقالاتی که به احتراق در محیط متخلخل با رویکرد دو بعدی یا سه بعدی پرداخته‌اند زیاد نیست. محمد و همکاران [۱۰] یک حل عددی برای محیط دو بعدی با سینتیک یک مرحله‌ای ارائه کرده‌اند، آنها تاثیر تغییر هندسه، اندازه خلل و فرج‌ها، ضریب رسانش حرارتی، سرعت شعله و نرخ هوای اضافی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در تحقیقی دیگر که توسط مالیکو و همکاران [۱۱] منتشر شده است، تاثیر نرخ هوای اضافی، رسانش ماده جامد و ضریب انتقال حرارت جابجایی، بر میزان گونه‌های آلاینده بررسی شده است. در تحلیلی سه بعدی، ژو و همکاران [۱۲] دریافتند که نتایج مدل سه بعدی و دو بعدی، نظیر توزیع دما و سرعت در مشعل، با هم مطابقت دارند.

در این مقاله از مدل دو بعدی و سینتیک شیمیایی چهار مرحله‌ای احتراق متان، استفاده شده است. معادلات نویر-استوکس و معادلات انرژی و گونه‌های شیمیایی، به کمک روش حجم محدود منفصل و حل شده‌اند. برای ارتباط سرعت و فشار از الگوریتم SIMPLE استفاده شده است.

## ۲- مشخصات محیط متخلخل

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، میدان محاسباتی شامل یک محیط متخلخل شبه مستطیلی است که در



شکل ۱- شمای کلی محیط متخلخل

ورودی و خروجی دارای دیواره‌هایی تخت بوده و در بخش میانی آن، دیواره بلند موجدار قرار گرفته است. در اینجا، تابع سینوسی دیواره، از رابطه  $S(x) = L \pm a \sin(\pi(x - x_s)/L \pm \Delta\Phi)$  پیروی می‌کند که برخی از متغیرهای به کار رفته در آن، در شکل ۲ (الف) معرفی شده‌اند. در این رابطه،  $a$  اندازه دامنه موج سینوسی بوده که در مقاله حاضر برای آن، دو مقدار  $0.2 \text{ cm}$  و  $0.5 \text{ cm}$  در نظر گرفته شده است. در طرح‌های مختلفی از دیواره‌های موجدار که در این مقاله بررسی می‌شوند، دیواره‌های موجدار بالا و پایین می‌توانند نسبت به یکدیگر دارای اختلاف فاز  $(\Delta\Phi)$  نیز باشند. طرح‌های مربوطه در شکل ۲ (ب) آورده شده‌اند که متناظر با  $a = 0.2 \text{ cm}$  می‌باشند. مشابه این شش حالت، شش حالت دیگر نیز برای  $a = 0.5 \text{ cm}$  در نظر گرفته می‌شود تا تاثیر اندازه دامنه موج سینوسی نیز قابل تجزیه و تحلیل باشد. برای این که تاثیر دیواره موجدار مشخص شود، علاوه بر ۱۲ طرح ذکر شده، دو نمونه محیط متخلخل مستطیلی نیز با ابعاد  $21 \times 2 \text{ cm}$  و  $25/1 \times 2 \text{ cm}$  مورد مطالعه قرار می‌گیرد. انتخاب طول‌های ۲۱ و  $25/1$  سانتی متری بدان علت بوده که طول قوس قسمت‌های سینوسی در اندازه‌های موج  $0.2 \text{ cm}$  و  $0.5 \text{ cm}$  به ترتیب ۱۲ cm و  $16/1 \text{ cm}$  بدست آمده که از جمع آنها با طول دهانه‌های تخت ورودی و خروجی به این اعداد رسیده‌ایم. بدین ترتیب، هنگام مقایسه نتایج دیواره‌های موجدار و تخت در هر دو موج مورد بررسی، طول محفظه احتراق ثابت در نظر گرفته شده تا خطایی ناشی از اختلاف طول فضای احتراق به وجود نیاید.

در جدول ۱ مشخصات فاز جامد محیط متخلخل آمده است:

جدول ۱ - مشخصات محیط جامد

۲۷۱۹	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
۸۷۱	حرارت مخصوص ( $\text{J/kg.K}$ ) ( $C_p$ )



۲۰۲/۴	ضریب رسانش حرارتی (W/m.K)
۰/۷	تخلخل (Porosity)

### ۳- معادلات حاکم

برای جریان سیال تک فاز غیر قابل تراکم واکنش پذیر در یک محیط متخلخل همسانگرد می توان با روش میانگین حجمی به معادلات حاکم زیر دست یافت:

#### ۱-۳ معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \phi V) = 0 \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $\rho_f$  چگالی سیال،  $\phi$  تخلخل و  $t$  زمان است.

#### ۲-۳ معادله اندازه حرکت

معادله اندازه حرکت خطی به شکل زیر است [۱۴]:

$$\phi \rho_f \frac{\partial V}{\partial t} + \phi \rho_f V \cdot \nabla V = -\phi \nabla P + \phi \mu \nabla^2 V - (\nabla P)_p \quad (2)$$

که در آن،

$$(\nabla P)_p = \left( \frac{\mu}{K_1} + \frac{\rho_f}{K_2} |V_s| \right) V_s \quad (3)$$

در اینجا،  $P$  فشار،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $K_1$  ضریب نفوذپذیری و  $K_2$  ضریب اتلاف اینرسی است. آخرین جمله معادله (۲) بیانگر افت فشار ناشی از لزجت و نیروی پسای اینرسی است که به وسیله محیط جامد به سیال وارد می شود.  $K_1$  و  $K_2$  می توان از روابط زیر بدست آورد که در آنها،  $d_p$  قطر متوسط ذرات در محیط متخلخل می باشد.

$$K_1 = \frac{d_p^2}{150} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^1}, \quad K_2 = \frac{d_p}{1.75} \frac{\phi^3}{(1-\phi)} \quad (4)$$

#### ۳-۳ معادله انرژی

در بعضی از نقاط محیط متخلخل، دمای سیال و ماتریس جامد به صورت محلی با هم برابر نخواهند بود. از این رو، لازم است معادلات انرژی فازهای جامد و سیال از یکدیگر جدا شوند. معادلات مربوطه به صورت زیرند [۱۵]:

$$\phi \rho_f c_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \phi \rho_f c_{p,f} V \cdot \nabla T_f = \phi \nabla \cdot (\lambda_f \nabla T_f) + h_v (T_s - T_f) - \phi \sum_{k=1}^{N_{sp}} \omega_k M_k h_k \quad (5)$$

$$(1-\phi) \rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-\phi) \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) - h_v (T_s - T_f) - \nabla \cdot q_r \quad (6)$$

که در آن،  $\rho_f$  و  $\rho_s$  چگالی سیال و جامد است. منظور از  $T$  دما،  $C_p$  حرارت مخصوص، رسانش حرارتی،  $h_v$  ضریب انتقال حرارت حجمی  $N_{sp}$  تعداد گونه های شیمیایی،  $\omega_k$  نرخ تولید هر گونه،  $M_k$  جرم مولکولی،  $h_k$  انتالپی آن گونه و  $q_r$  شار حرارتی تشعشعی است. در اینجا،  $h_v$  از رابطه زیر به دست می آید:

$$h_v = h A_{f,s} \quad (7)$$

که در آن،  $h$  ضریب انتقال حرارت جابجایی و  $A_{f,s}$  سطح مشترک بین سیال و جامد در واحد حجم محیط متخلخل است.

#### ۴-۳ معادله گونه های شیمیایی

معادلات حاکم بر انتقال گونه‌های شیمیایی به صورت زیر است [۱۶]:

$$\rho_f \frac{\partial y_k}{\partial t} + \rho_f V \cdot \nabla y_k = \rho_f \nabla \cdot (D_{km} \nabla y_k) + \dot{\omega}_k M_k \quad (8)$$

$$K \in [1, N_{sp} - 1]$$

$$\sum_{k=1}^{N_{sp}} y_k = 1 \quad k = N_{sp}$$

### ۳-۵- مدل‌سازی جریان متلاطم

در این مطالعه از مدل  $k$ - $\epsilon$  پداس و دی لموس [۱۷] برای در نظر گرفتن اثرات تلاطم جریان استفاده شده است. در این مدل، انتگرال حجمی بر روی کمیت‌های محلی تلاطم بر روی یک حجم پایه‌ای نمونه (r.e.v.) سیال، گرفته شده است. معادله‌های انتقال انرژی جنبشی تلاطم و نرخ پراکندگی تلاطم به صورت زیرند:

$$\rho_f \left[ \frac{\partial (\phi k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi V k) \right] = \nabla \cdot \left[ \left( \mu_{lam} + \frac{\mu_{turb}}{\sigma_k} \right) \nabla (\phi k) \right] - \rho_f \overline{\phi k \epsilon} : \nabla (\phi V) + c_{k2} \rho_f \phi \frac{k |\nabla \phi V|}{\sqrt{K_1}} - \rho_f \phi \epsilon \quad (9)$$

که در آن،

$$\mu_{turb} = C_{\mu} \rho_f \frac{k^2}{\epsilon} \mu_{eff} = \mu_{turb} + \mu_{lam}$$

$$\bar{D} = \frac{1}{2} \{ \nabla (\phi V) + [\nabla (\phi V)]^T \} \quad (10)$$

$$-\rho_f \overline{\phi k \epsilon} = 2 \mu_{turb} \bar{D} - \frac{2}{3} \phi \rho_f k \mathbf{I}$$

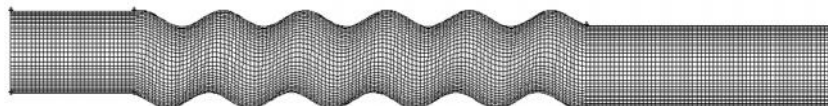
در اینجا،  $\mu_{turb}$  و  $\mu_{lam}$  به ترتیب لزجت متلاطم و آرام‌اند و  $k$  انرژی جنبشی تلاطم است. پارامترهای  $\sigma_k$ ،  $c_{2\epsilon}$ ،  $c_{1\epsilon}$ ،  $\mu$  و  $\epsilon$  ثابت‌های استاندارد مدل  $k$ - $\epsilon$  هستند.

### ۴- شرایط مرزی

در ورودی، مخلوط پیش آمیخته متان-هوا در شرایط استوکیومتری و با سرعت ۱/۵ m/s وارد می‌شود. دمای مخلوط ورودی ۳۰۰ K است. در خروجی، فشار برابر فشار محیط استاندارد یعنی ۱۰۱ kPa در نظر گرفته شده است. دیواره‌ها آدیاباتیک بوده و شرایط غیر لغزشی حاکم است.

### ۵- مدل عددی

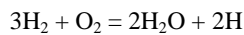
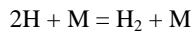
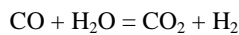
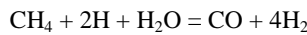
برای حل عددی، از روش حجم محدود در محیط دوبعدی استفاده شده است. ۱۴ نمونه محیط متخلخل با هندسه‌های متفاوت در نرم افزار Gambit<sup>TM</sup> [۱۸] ایجاد شده و نتایج حل عددی با نرم افزار ANSYS Fluent<sup>TM</sup> [۱۹] به دست آمده است. این ۱۴ نمونه محیط متخلخل شامل ۱۲ محیط با دیواره موجدار است که با تغییر دامنه موج در دو مقدار  $\bar{a} = 0/2 \text{ cm}$  و  $\bar{a} = 0/5 \text{ cm}$  به ازای اختلاف فازهای  $\phi = 0$ ،  $\phi = 30$ ،  $\phi = 60$ ،  $\phi = 90$ ،  $\phi = 120$  و  $\phi = 150$  حاصل شده است. همچنین، ۲ نمونه محیط تخت ایجاد گشته است. به منظور بررسی استقلال از شبکه، نتایج برای یک نمونه ۶۳۰۰ سلولی با نتایج شبکه بندی با ۱۴۰۰۰ سلول مقایسه گردیده است. فشار و سرعت با روش SIMPLE مرتبط شده‌اند. شرط همگرایی با دقت  $1 \times 10^{-5}$  در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ نمونه‌ای از شبکه بندی محیط، برای حل عددی آمده است:



## ۶- مکانیزم احتراق

### ۶-۱- مکانیزم احتراق متان

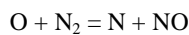
ژو و پیرا [۲۰] چهار سینتیک شیمیایی الف) مکانیزم کامل با ۴۹ گونه و ۲۲۷ واکنش، ب) مکانیزم کاهش یافته اسکاتل (Skeletal Mechanism) با ۲۶ گونه و ۷۷ واکنش، ج) مکانیزم کاهش یافته ۴ مرحله‌ای با ۹ گونه، و د) معادله کلی (Global Reaction) را برای احتراق پیش آمیخته متان در محیط متخلخل مقایسه کرده و نتیجه گرفته‌اند که از این میان، مکانیزم کاهش یافته ۴ مرحله‌ای جواب‌های قابل قبول را در عین هزینه کم محاسباتی بدست می‌دهد. لذا در این مقاله نیز از مکانیزم کاهش یافته ۴ مرحله‌ای استفاده شده است. این مکانیزم توسط گلاربورگ و همکاران [۲۱] توسط روش اسکاتل با فرض حالت پایدار و نیمه-پایدار ارائه شده است. این مکانیزم توسعه داده شده است به طوری که NO و HCN را به عنوان گونه‌های واکنش‌پذیر مستقل، شامل باشد. مکانیزم یاد شده در زیر آمده است:



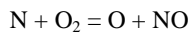
سری واکنش‌های فوق برای احتراق متان و هوا ارائه شده است. در زیر مکانیزم تشکیل اکسید نیتروژن حرارتی آورده می‌شود.

### ۶-۲- مکانیزم تشکیل NO<sub>x</sub>

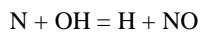
برای تشکیل NO<sub>x</sub> حرارتی از مکانیزم توسعه یافته زلدوویچ استفاده شده است [۲۲]:



(۱۲)



واکنش سوم برای تشکیل NO<sub>x</sub> حرارتی به صورت زیر است:



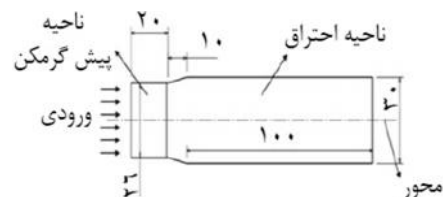
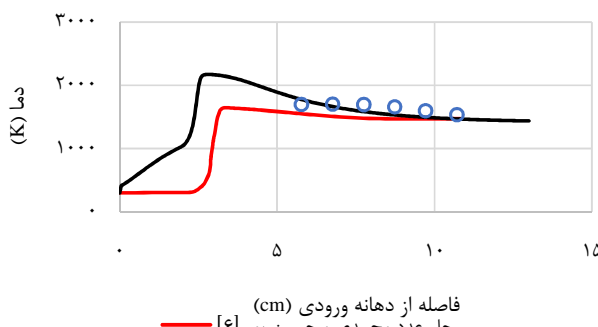
(۱۳)

که مقادیر ضرایب نرخ واکنش از نتایج تحقیق هنسون و سلیمیان [۲۲] استخراج شده است.

## ۷- نتایج و بحث

### ۷-۱- ارزیابی صحت روش عددی

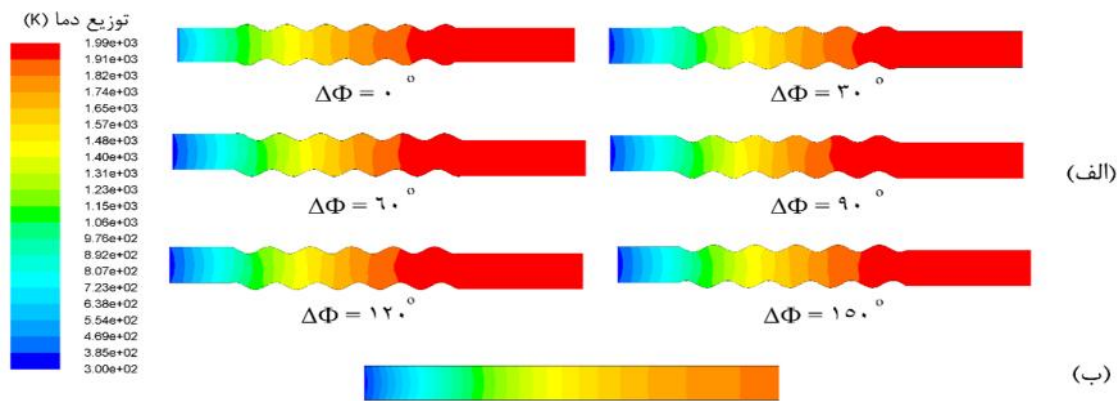
با توجه به عدم وجود نتایج آزمایشگاهی برای شعله با دیواره موجدار، روش عددی، برای هندسه‌ای دیگر مورد ارزیابی قرار



گرفته است. بدین منظور محیطی مطابق آنچه که در شکل ۴ آمده، تهیه شده است، سپس دما بر روی محور مرکزی با نتایج آزمایشگاهی دراست و تریمیمس [۲۳] و حل عددی محمدی و حسین پور [۶] مقایسه گردیده است. شکل ۵ نمایانگر این نتایج می‌باشد:

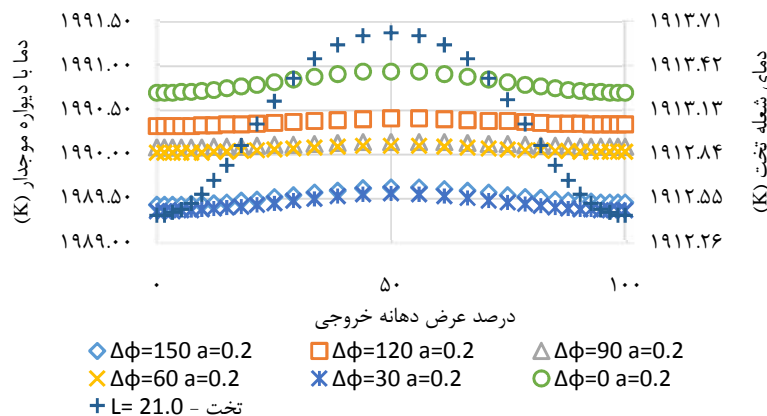
### ۲-۷- نتایج حل عددی

برای حل عددی، از روش حجم محدود در محیط دوبعدی استفاده شده است. ۱۴ نمونه محیط متخلخل با هندسه‌های متفاوت در نرم افزار Gambit<sup>TM</sup> [۱۸] ایجاد شده و نتایج حل عددی با نرم افزار ANSYS Fluent<sup>TM</sup> [۱۹] به دست آمده است. در شکل ۶ کانتور دما در اختلاف فازهای مختلف برای  $\bar{a} = 0.2$  آمده که با نتیجه شعله در محیط متخلخل با دیواره تخت (شکل ۶ ب) مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود دمای سیال خروجی در نمونه‌های با دیواره موجدار حدود  $80\text{ K}$  بیشتر از نمونه تخت است. همچنین مشاهده می‌شود در محیط با دیواره موجدار، نرخ تغییرات دما سریع‌تر بوده و دما



شکل ۶ - (الف) توزیع دما برای دیواره موجدار با  $\bar{a} = 0.2$  در اختلاف فازهای مختلف  
(ب) توزیع دما برای هندسه با دیواره تخت

زودتر به مقدار نهایی خود می‌رسد، در مقابل می‌توان گفت تغییرات دما در محیط تخت، به آرامی صورت گرفته و تقریباً خطی است. همچنین مشاهده می‌شود در یک دامنه ثابت، اختلاف فاز تاثیر ناچیزی بر تغییرات دما دارد. در شکل ۷ توزیع دما در دهانه خروجی برای  $\bar{a} = 0.2$  در اختلاف فازهای گوناگون با محیط تخت مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که اختلاف فاز در دامنه یکسان تاثیر ناچیزی بر دمای گازهای خروجی دارد ولی موجدار کردن دیواره نسبت به محیط تخت باعث افزایش دما به اندازه  $80\text{ K}$  می‌گردد، همچنین مشهود است که توزیع دمای گازهای خروجی در نمونه‌های موجدار نسبت به عرض دهانه یکنواخت بوده ولی در نمونه تخت، در مرکز دهانه خروجی دما بیشتر، و با نزدیک شدن به دیواره‌ها دما کاهش می‌یابد، لذا می‌توان یکنواخت بودن دمای گازهای خروجی را به عنوان مزیت مشعل با دیواره موجدار

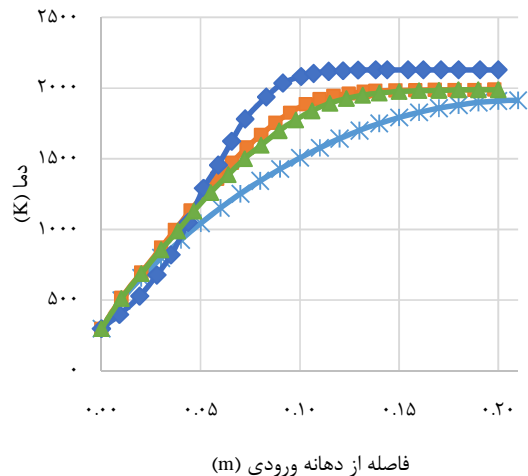




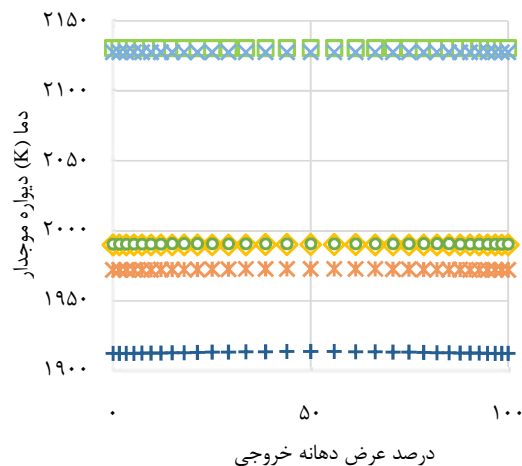
برشمرده، زیرا عدم تمرکز دما در یک ناحیه، احتمال آسیب دیدگی تجهیزات مرتبط با شعله را کاهش می‌دهد. یکسان بودن تعداد تکرار تابع سینوسی دیواره در اختلاف فازهای مختلف، باعث می‌شود که دهانه خروجی دقیقاً در مقابل دهانه ورودی قرار نگیرد، لذا با اینکه عرض دهانه خروجی یکسان است ولی مختصات آن در اختلاف فازهای مختلف، متفاوت است، بنابراین از درصد برای بیان عرض دهانه خروجی استفاده شده است.

در شکل ۸ تاثیر دامنه موج بر دما بررسی شده است. با مشاهده این شکل می‌توان نتیجه گرفت که در یک دامنه موج ثابت، تغییر فاز تاثیری ناچیز (در حدود ۲K) بر دمای خروجی دارد ولی با مقایسه دو دامنه موج در یک اختلاف فاز یکسان، نتیجه می‌شود که دما در  $a = 0.5 \text{ cm}$  حدود ۱۵K افزایش یافته است. محیط ۲۵/۱ سانتی‌متری با دیواره تخت دارای دمای خروجی بیشتر نسبت به محیط با دیواره تخت ۲۱ سانتی‌متری است. با مقایسه دمای گازهای خروجی محیط ۲۵/۱ سانتی‌متری با دیواره تخت و دمای خروجی در محیط با دیواره موجدار، می‌توان نتیجه گرفت که حداقل دمای گازهای خروجی محیط موجدار از حداکثر دمای گازهای خروجی محیط تخت بیشتر است.

توزیع دما بر روی خط مرکزی در طول محیط متخلخل، برای نمونه‌های موجدار  $a = 0.3 \text{ cm}$ ،  $a = 0.2 \text{ cm}$  و  $a = 0.1 \text{ cm}$  و نمونه تخت در شکل ۹ آورده شده است. مشاهده می‌شود که دمای خط مرکزی در محیط با دیواره موجدار، با نرخ سریع‌تری افزایش می‌یابد و دمای گازهای خروجی بیشتر است. همچنین برای  $a = 0.5 \text{ cm}$  نرخ افزایش دما نسبت به  $a = 0.2 \text{ cm}$  بیشتر بوده و در  $a = 0.5 \text{ cm}$



شکل ۹ - دمای خط مرکزی



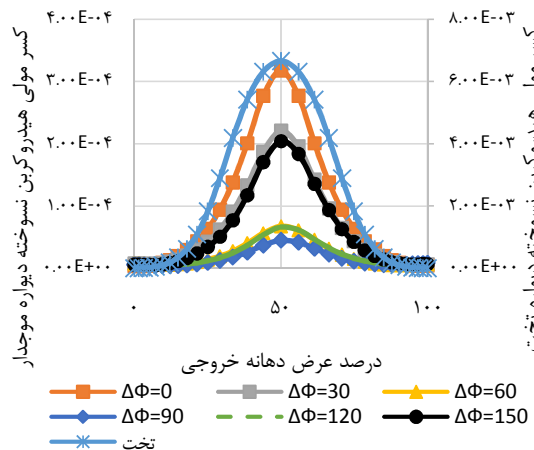
شکل ۸ - توزیع دما در خروجی (K)

سیال‌زودتر به دمای نهایی خود می‌رسد. مشهود است که تا فاصله ۵cm از دهانه ورودی در  $a = 0.2 \text{ cm}$  دمای خط مرکزی بیشتر از  $a = 0.5 \text{ cm}$  است ولی از این فاصله به بعد دما در  $a = 0.5 \text{ cm}$  بیشتر شده است. دمای نهایی  $a = 0.2 \text{ cm}$  بین دمای نهایی محیط تخت و  $a = 0.5 \text{ cm}$  قرار می‌گیرد.

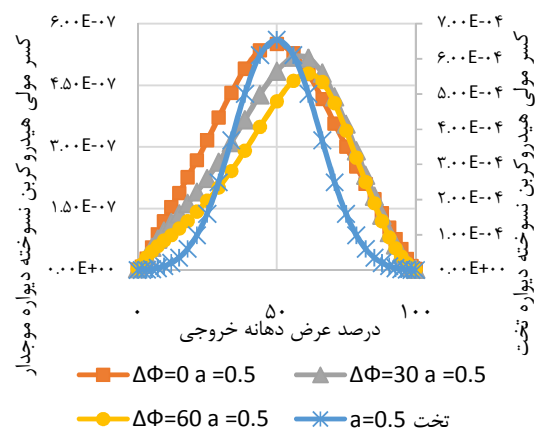
در شکل ۱۰ کسر مولی هیدروکربن نسوخته در عرض دهانه خروجی، برای دیواره موجدار در دامنه  $a = 0.2 \text{ cm}$  و محیط با دیواره تخت  $L = 21 \text{ cm}$  مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که کمترین انتشار هیدروکربن نسوخته در اختلاف فاز ۹۰ درجه، و بیشترین انتشار در اختلاف فاز صفر رخ می‌دهد، حتی در حالت اخیر هم انتشار هیدروکربن نسوخته ۰/۱ دیواره تخت است، کسر مولی هیدروکربن نسوخته در مرکز دهانه خروجی بیشترین مقدار را داراست و با نزدیک شدن به دیواره‌های بالا و پایین کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده نمود تاثیر اختلاف فاز بر روی کسر مولی هیدروکربن نسوخته زیاد است و بیشترین انتشار (به ازای  $\phi = 0$ ) حدود ۳ برابر کمترین مقدار انتشار (به ازای  $\phi = 90$ ) می‌باشد.



شکل ۱۱ کسر مولی هیدروکربن نسوخته را در عرض دهانه خروجی برای دامنه موج  $a = 0.5 \text{ cm}$  و محیط با دیواره تخت



شکل ۱۰ - کسر مولی هیدروکربن نسوخته خروجی در مقایسه با محیط تخت ( $a = 0.5$ )



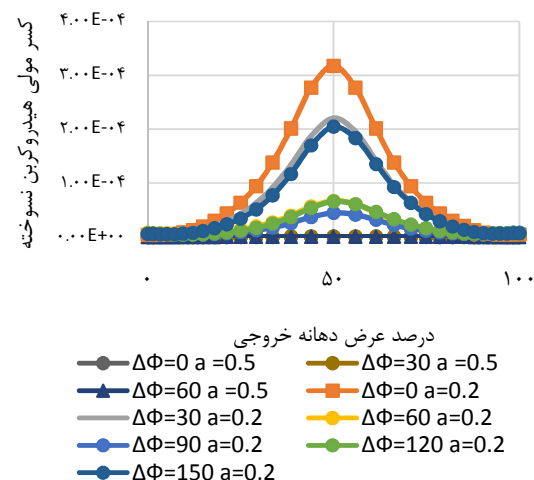
شکل ۱۱ - کسر مولی متان نسوخته خروجی در مقایسه با محیط تخت مربوطه ( $a = 0.5$ )

در شکل ۱۱ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش اختلاف فاز، محل حداکثر مقدار هیدروکربن نسوخته از نقطه میانی دهانه خروجی به نزدیکی دیواره بالایی منحرف می‌شود. همچنین در این حالت با موجدار کردن دیواره، انتشار هیدروکربن نسوخته نسبت به دیواره تخت کاهش می‌یابد.

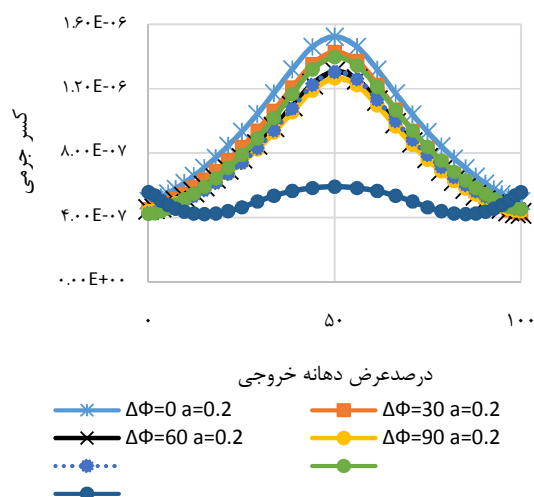
در شکل ۱۲ تاثیر دامنه موج بر انتشار هیدروکربن نسوخته مقایسه شده است. می‌توان نتیجه گرفت با افزایش دامنه موج، مقدار کسر مولی هیدروکربن نسوخته کمتر می‌شود. نتایج حل عددی نشان می‌دهند که در یک دامنه موج ثابت، کمترین انتشار هیدروکربن نسوخته در اختلاف فاز  $90^\circ$  درجه حاصل می‌شود و هرچه اختلاف فاز بیشتر یا کمتر شود، افزایش انتشار هیدروکربن نسوخته در خروجی را در پی خواهد داشت.

در شکل ۱۳ کسر جرمی NO برای  $a = 0.2 \text{ cm}$  در عرض دهانه خروجی آمده است. مشاهده می‌شود که در محیط با دیواره موجدار کسر جرمی NO در مرکز دهانه خروجی حداکثر مقدار خود را داراست و به سمت دیواره‌ها کاهش می‌یابد ولی در خروجی محیط با دیواره تخت توزیع NO در عرض دهانه تقریباً یکنواخت است. همچنین می‌توان دریافت که موجدار کردن دیواره انتشار NO را تا دو برابر افزایش می‌دهد. در اختلاف فاز صفر درجه بیشترین انتشار NO و در اختلاف فاز  $90^\circ$  درجه کمترین انتشار رخ می‌دهد و هرچه اختلاف فاز بیشتر یا کمتر گردد، انتشار NO بیشتر خواهد بود.

در شکل ۱۴ مقادیر انتشار NO در دو حالت  $a = 0.2 \text{ cm}$  و  $a = 0.5 \text{ cm}$  مقایسه شده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت در

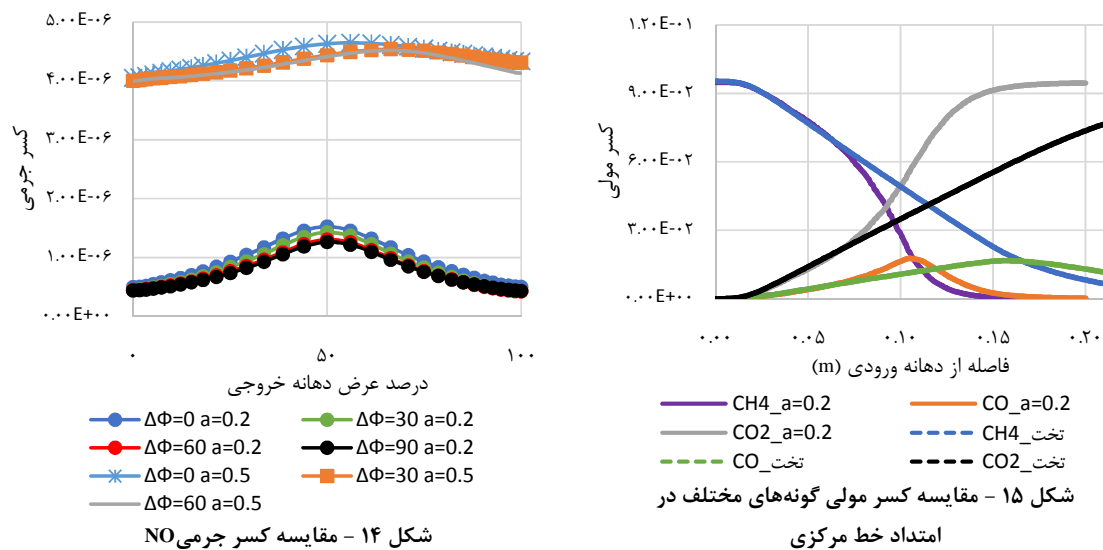


شکل ۱۲ - مقایسه کسر مولی هیدروکربن نسوخته خروجی در دو دامنه موج مختلف



اختلاف فاز یکسان افزایش دامنه موجب افزایش انتشار NO می شود، همچنین تاثیر افزایش دامنه موج از تاثیر اختلاف فاز چشمگیرتر است لذا حداقل انتشار گاز NO در  $a = 0.5 \text{ cm}$  از حداکثر مقدار آن در  $a = 0.2 \text{ cm}$  بیشتر است.

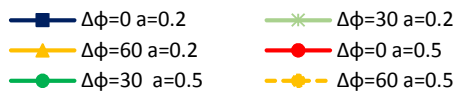
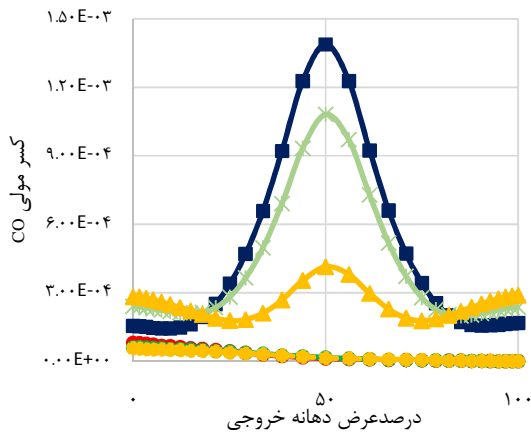
نتایج حل عددی نشان می دهد که مقدار NO تولید شده در مشعل با دیواره تخت، کمتر از مشعل با دیواره موجدار است اما این را نمی توان به عنوان مزیتی برای شعله تخت در نظر گرفت چرا که با توجه به شکل های ۴ و ۵ دمای حداکثر این شعله در حدود  $1913 \text{ K}$  می باشد لذا با توجه به نتایج کار خوشحال و همکاران [۲۴] که تولید NO را نسبت به دما بررسی کرده اند این نتیجه دور از انتظار نیست. دمای کم شعله تخت نشان از بازده گرمایی کم آن است. بازده گرمایی کم را از مقایسه مقدار انتشار هیدروکربن نسوخته نیز می توان نتیجه گرفت زیرا کسر مولی هیدروکربن نسوخته خروجی شعله تخت از بیشترین مقدار شعله با دیواره موجدار، حدود ۱۰ برابر بیشتر است. لذا با موجدار کردن دیواره می توان با طول کوره برابر، عملکرد حرارتی بهتری را انتظار داشت.



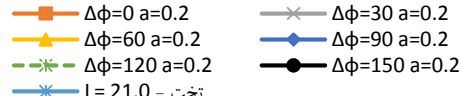
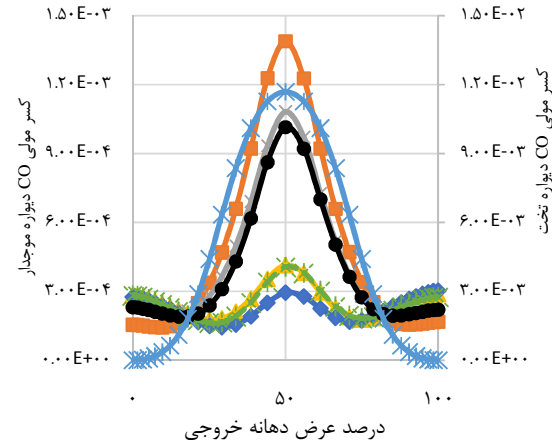
در شکل ۱۵ تغییرات کسر مولی گونه های مختلف در امتداد خط میانی، برای محیط تخت و محیط با دیواره موجدار با دامنه موج  $0.2$  و اختلاف فاز  $90$  آورده شده است، می توان مشاهده کرد که متان در دیواره موجدار با نرخ سریع تر مصرف شده و در خروجی نیز به مقدار ناچیزی هیدروکربن به صورت نسوخته باقی می ماند، همچنین در محیط با دیواره موجدار، گاز CO اکسید گردیده و در خروجی، نسبت به حالت تخت مقدار اندکی دارد، از طرفی می دانیم که بخش زیادی از گرمای آزاد شده از احتراق متان ناشی از تبدیل  $\text{CO}$  به  $\text{CO}_2$  است پس یکی از دلایل دمای کمتر در محیط تخت می تواند همین عامل باشد.

شکل ۱۶ کسر مولی گاز CO در عرض دهانه خروجی برای فازهای مختلف در  $a = 0.2 \text{ cm}$  نشان می دهد. همچنین در این شکل کسر مولی گاز CO در عرض دهانه خروجی برای دیواره تخت  $L = 0.21 \text{ m}$  آورده شده است، می توان نتیجه گرفت کسر مولی گاز CO برای دیواره تخت حدود ۱۰ برابر بیشتر از حداکثر مقدار آن در دیواره موجدار ( $a = 0$ ) است. در یک دامنه ثابت، در اختلاف فاز  $90$  درجه، کمترین انتشار گاز CO صورت می گیرد. همچنین مشاهده می شود کسر مولی CO در مرکز دهانه حداکثر بوده و به سمت دیواره های دهانه خروجی کاهش می یابد. در فواصل  $20\%$  و  $80\%$  عرض دهانه خروجی دو نقطه عطف وجود دارد که به ازای تمامی اختلاف فازها مشهود است. در این دو نقطه مقادیر حداکثر کسر مولی عوض می شود، توضیح اینکه در فاصله صفر تا  $20\%$  عرض دهانه، حداکثر کسر مولی CO مربوط به اختلاف فاز  $90$  درجه است این در حالی است که در فاصله  $20$  تا  $80$  درصدی، حداقل کسر مولی CO در این اختلاف فاز رخ می دهد و نهایتاً در  $80\%$  تا  $100\%$  حالتی مشابه  $20\%$  اولیه به وجود می آید.

در شکل ۱۷ کسر مولی گاز CO در خروجی برای دو دامنه مختلف مقایسه شده است لذا نتیجه می شود که در یک



شکل ۱۷ - مقایسه کسر مولی گاز CO در خروجی برای دو دامنه مختلف



شکل ۱۶ - کسر مولی CO در خروجی برای فازهای مختلف در  $a=0.2$

اختلاف فاز ثابت با افزایش دامنه، مقدار انتشار گاز CO کم می‌گردد.

### ۳-۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر موجدار کردن دیواره بر احتراق متان-هوا در یک محفظه احتراق متخلخل بررسی شد. بر پایه مباحث ارائه شده می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری کرد:

۱- با موجدار کردن دیواره، دمای گازهای خروجی نسبت به دیواره تخت بیشتر می‌شود که افزایش بازده حرارتی شعله را در پی خواهد داشت. این امر، همچنین انتشار CO را تا ۱۰ برابر کاهش می‌دهد. انتشار هیدروکربن‌های نسوخته نیز در دیواره موجدار کمتر است. بدین ترتیب می‌توان، از دیواره موجدار برای کنترل انتشار آلاینده‌ها و افزایش بازده حرارتی شعله بهره جست.

۲- توزیع دما در عرض دهانه خروجی محیط با دیواره موجدار، یکنواخت است ولی در محیط با دیواره تخت، دما در مرکز دهانه حداکثر بوده و به سمت دیواره‌ها کاهش می‌یابد، لذا از موجدار کردن دیواره برای جلوگیری از تمرکز موضعی دما می‌توان استفاده کرد.

۳- در یک دامنه موج یکسان، اختلاف فاز تاثیر ناچیزی بر دمای گازهای خروجی دارد. با این وجود، در اختلاف فاز ۹۰ درجه، کمترین انتشار CO، NO و هیدروکربن‌های نسوخته رخ می‌دهد.

۴- در اختلاف فاز مشابه، با افزایش دامنه موج، دمای گازهای خروجی و انتشار NO بیشتر می‌شود اما انتشار CO و هیدروکربن‌های نسوخته کاهش می‌یابد.

### مراجع

- 1- Nieckele, A.O., Naccache, M.F., Gomes, M. S., "Combustion performance of an aluminium melting furnace operating with natural gas and liquid fuel", Applied Thermal Engineering, Vol. 32, pp. 841-851, 2011.



- 2- England, G.C., McGrath, T.P., Gilmer, L., Seebold, J.G., Lev-On, M. and Hunt, T., "Hazardous air pollutant emissions from gas-fired combustion sources: emissions and the effects of design and fuel type", Chemosphere, Vol. 42, pp. 745-764, 2001.
- ۳- دوازده امامی، م.، عطوف، ح.، رضایی بخش، م.ر.، "بررسی تجربی فرآیند برگشت شعله در محیط متخلخل دولایه‌ای"، نشریه علمی-پژوهشی سوخت و احتراق، سال پنجم، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۱.
- اصلانی، ب.، مقیمان، م.، "بررسی عددی پارامترهای احتراق سوخت گاز و مایع در کوره شبیه سازی شده"، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، بهمن ماه، ۱۳۹۰.
- 5- Wu, C.Y., Chen, K.H. and Yang, S.Y., "Experimental study of porous metal burners for domestic stove applications. Energy Conversion and Management", Vol. 77, pp. 380-388, 2014.
- 6- Mohammadi, I. and Hossainpour, S., "The effects of chemical kinetics and wall temperature on performance of porous media burners. Heat and Mass Transfer", Vol. 49, pp. 869-877, 2013.
- 7- Hossainpour, S. and Haddadi, B., "Numerical study of the effects of porous burner parameters on combustion and pollutants formation", Proceedings of the World Congress on Engineering, 2008.
- 8- Djordjevic, N., Habisreuther, P. and Zarzalis, N., "Porous Burner for Application in Stationary Gas Turbines: An Experimental Investigation of the Flame Stability", Emissions and Temperature Boundary Condition. Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 89, pp. 261-274, 2012.
- 9- Barra, A.J. and Ellzey, J.L., "Heat recirculation and heat transfer in porous burners". Combustion and Flame, Vol. 137, pp. 230-241, 2004.
- 10- Mohamad, A., Ramadhyani, S. and Viskanta, R., "Modelling of combustion and heat transfer in a packed bed with embedded coolant tubes", International journal of heat and mass transfer, Vol. 37, pp. 1181-1191, 1994.
- 11- Malico, I., Zhou, X. and Pereira, J., "Two-dimensional numerical study of combustion and pollutants formation in porous burners", Combustion science and technology, Vol. 152, pp. 57-79, 2000.
- 12- Xu, J.R., Hu, S.J., Xu, S.S. and Wang, G.Q., "3-D simulation of methane/air combustion in the ring porous medium burner", Applied Mechanics and Materials, Vol. 71, pp. 2153-2157, 2011.
- 13- Nield, D. A. and Bejan, A., *Convection in Porous Media*, Forth Edition, Springer, 2013.
- 14- Vafai, K. and Tien, C., "Boundary and inertia effects on flow and heat transfer in porous media", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 24, pp. 195-203, 1981.
- 15- Kaviany, M., *Principles of Heat Transfer in Porous Media*, Springer, New York, 1995.
- 16- Ingham, D.B. and Pop, I., *Transport phenomena in porous media*, Third Edition, Elsevier, 2005.
- 17- Pedras, M.H. and de Lemos, M.J., "Macroscopic turbulence modeling for incompressible flow through undeformable porous media", International journal of heat and mass transfer, Vol. 44, pp. 1081-1093, 2001.
- 18- *Gambit I modeling guide*, Fluent® Inc. (2004).
- 19- ANSYS FLUENT, *Fluent theory guide*, Version 14.0, ANSYS® Inc. (2011).
- 20- Zhou, X.Y. and Pereira, J.C.F., "Comparison of four combustion models for simulating the premixed combustion in inert porous media", Fire and Materials, Vol. 22, pp. 187-197, 1998.
- 21- Glarborg, P., Lilleheie, N.I., Byggstøyl, S., Magnussen, B.F., Kilpinen, P. and Hupa, M., "A reduced mechanism for nitrogen chemistry in methane combustion", Symposium (International) on Combustion, Elsevier, pp. 889-898, 1992.
- 22- Hanson, R.K. and Salimian, S., *Combustion chemistry*, Springer, 1984.
- 23- Trimis, D. and Durst, F., "Combustion in a porous medium-advances and applications", Combustion Science and Technology, Vol. 121, pp. 153-168, 1996.



## پنجمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - بهمن ماه ۱۳۹۲



- 24- Khoshhal, A., Rahimi, M. and Alsairafi, A.A., “*CFD study on influence of fuel temperature on NOx emission in a HiTAC furnace*”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 38, pp. 1421-1427, 2011.