

## شبیه سازی عددی احتراق مخلوط هیدروژن - هوا در محفظه‌های میکرونی

سید محمود ابوالحسن علوی<sup>1</sup>

مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، دانشکده مهندسی، قاسم آباد، خیابان استاد یوسفی  
m\_a\_alavi2002@yahoo.com

### چکیده

در این مقاله، شبیه سازی عددی احتراق مخلوط هیدروژن- هوا در محفظه‌های میکرونی در دو اندازه مختلف صورت گرفته است. مدل احتراق مخلوط شامل 19 واکنش ساده برگشت پذیر و 9 گونه شیمیایی می‌باشد. احتراق در محفظه‌های میکرونی تحت شرایط جداره بی درو صورت گرفته که این شرایط تاثیرات شدیدی بر احتراق دارند، بویژه زمانی که اندازه محفظه کوچکتر شده و نسبت مساحت سطح به حجم بیشتر می‌شود. مقادیر محاسبه شده شامل دمای محصولات احتراق، توزیع سرعت تولید آب، توزیع سرعت تبدیل هیدروژن و غلظت جرمی هیدروژن می‌باشد که همگی بطور موضعی در امتداد طولی محفظه بدست آمده‌اند. دو عامل اتلاف گرما از طریق جداره محفظه و اندازه کوچکتر محفظه، ممکن است به اطفاء اشتعال منجر شود. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند که احتراق پایدار در محفظه از طریق افزایش نسبت زمان اقامت واکنش کننده در محفظه به زمان واکنش شیمیایی و همچنین حفظ شرایط جداره بی درو تضمین می‌گردد و بایستی اندازه محفظه احتراق در مقایسه با ضخامت شعله بی درو به اندازه کافی بزرگ باشد. زمان اقامت ناکافی در محفظه احتراق میکرونی ممکن است به احتراق ناقص بیانجامد و بازده احتراق را پایین ببرد. همچنین ممکن است باعث تولید گرمای ناکافی برای حفظ احتراق فراروند شود و در ادامه باعث اطفاء گردد. روش مدل سازی عددی ارائه شده در این مقاله در طراحی و بهینه سازی ابزار تولید برق کوچک حرارتی مفید است. نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج ارائه شده توسط محققان دیگر مقایسه شده‌اند و تطابق خوبی مابین آنها مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شبیه سازی- احتراق- هیدروژن- محفظه میکرونی

### 1- مقدمه

با افزایش تقاضاها برای ابزارهای بسیار کوچک مثل فعال کننده‌های بسیارریز، حسگرها، روباتها و غیره نیاز برای منبع نیروی بسیار کوچک دارای تراکم انرژی بالا را افزایش می‌دهد. باتریهایی که امروزه استفاده می‌شوند  $0/6 \text{ kJ/g}$  برای یک باتری آلکالین و  $1/2 \text{ kJ/g}$  برای یک باتری لیتیوم) در مقایسه با سوخته‌های هیدروژنی ( $140 \text{ kJ/g}$ ) و هیدروکربنی انرژی خالص کاملاً پایینی دارند. توسعه ابزارهای تولید برق مبتنی بر احتراق در محفظه‌های میکرونی، باعث افزایش عمر و کاهش وزن سیستمهای الکترونیکی- مکانیکی که برای تامین انرژی از باتری استفاده می‌کنند، خواهد شد. پیشرفتهای اخیر در زمینه روشهای ساخت

<sup>1</sup> - عضو هیات علمی

سیلیکون با بافت ریز امکان ساخت موتورهای حرارتی کوچک برای تولید برق را فراهم نموده است. محفظه احتراق با ابعاد ریز یکی از اجزای اصلی برای سیستم تولید برق کوچک که از سوخته‌های هیدروژنی و هیدروکربنی بعنوان منبع انرژی استفاده می‌کند، می‌باشد. طراحی انواع متعدد محفظه احتراق اکنون در دست پیشرفت هستند. کارهای آزمایشی گذشته بیان می‌کردند که انتشار شعله‌ها در شکاف کوچک در مقیاس تقریباً میلیمتری، که بعنوان فاصله اطفاء شناخته می‌شود، غیرممکن است. لکن امروزه احتمال اشتعال در این محفظه‌ها بوسیله آزمایشها اثبات شده‌اند. درک اساسی مکانیسم احتراق در محفظه‌های میکرونی، که برای طراحی و بهینه سازی ابزارهای برقی بسیار ضروری است، بدلیل مشکل اندازه‌گیری در محفظه‌های میکرونی در آزمایشگاه به خوبی احساس نمی‌شود. شبیه سازی عددی می‌تواند روش مناسبی برای بررسی مکانیسم احتراق باشد. نورتون (Norton) و ولاکوس (Vlachos) [1] مطالعه عددی در زمینه مشخصه‌های احتراق و پایداری شعله برای مخلوط متان- هوا انجام دادند. آنها [2] در مقاله دیگری این بررسی را روی مخلوط پروپان- هوا انجام دادند. چوی (Choi) و همکاران [3] شبیه سازی عددی انتشار شعله هیدروژن- هوا نزدیک شرایط اطفاء در محفظه احتراق میکرونی را انجام دادند. کاریوس (Carios) [4] تولید قدرت میکرو را با بکارگیری محفظه‌های احتراق میکرونی انجام داد. اسپاداکسینی (Spadaccini) و همکاران [5] توزیع دما در محفظه احتراق همراه با هندسه‌های ورودی متفاوت را با استفاده از شبیه سازی عددی سه بعدی که انرژی جنبشی شیمیایی را با 19 واکنش هیدروژن- هوا و 9 گونه شیمیایی حساب می‌کند، بررسی کرد. جین سونگ (Jinsong) و همکاران [6] شبیه سازی عددی را برای مطالعه احتراق هیدروژن- هوای ثوری در تعدادی از محفظه‌های استوانه‌ای ریز را انجام داد. مدل واکنش از 19 واکنش ابتدایی برگشت پذیر و 9 گونه تشکیل می‌شد. لی (Li) و همکاران [7] اثرات تغییرات قطر محفظه احتراق میکرونی را که دهانه‌ای با قطر ثابت دارد، روی انتشار شعله و دمای خارجی دیواره محفظه بررسی کردند. آنها [8] در مقاله دیگری اثر تغییرات قطر محفظه احتراق میکرونی را بدون دهانه بررسی کردند. نتایج آنها روی محاسبه پروفیل‌های عرضی سرعت و دما، کسر جرمی گونه‌های شیمیایی، تلفات حرارتی در طول محور محفظه و تنش برشی روی دیواره بود. و بالاخره چن (chen) [9] و همکاران اثرات پارامترهای عملکردی مختلف را روی مشخصه‌های احتراق هیدروژن- هوا داخل لوله میکرونی پلاتینیوم بکمک شبیه سازی عددی انجام دادند.

## 2- معادلات حاکم و روش حل

معادلات حاکم بر شعله و جریان در سیستم مختصات استوانه‌ای  $(x, r)$  نوشته شده است. محور  $x$  در امتداد طولی محفظه احتراق روی خط مرکزی انتخاب شده که موقعیت  $x = 0$  آن در دهانه ورود به محفظه و در جهت جریان مثبت است. مولفه‌های سرعت  $u$  و  $v$  بترتیب در جهات  $x$  و  $r$  می‌باشند. فرضیات زیر برای شعله و جریان بکار رفته است. الف) از تشعشع گازها صرفنظر می‌شود. ب) کار انجام شده بوسیله فشار و کار انجام شده بوسیله نیروهای لزجت در نظر گرفته نمی‌شود. ج) تغییر انرژی جنبشی در منطقه شعله ناچیز است. د) واکنش شیمیایی همگن داریم. ه) رژیم جریان پایا می‌باشد. و) از نیروهای جسمی مثل وزن صرفنظر می‌گردد. با فرضیات فوق معادلات حاکم بصورت زیر نوشته می‌شوند. معادله پیوستگی خواهد شد.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v r)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

در اینجا  $\rho$  جرم مخصوص محصولات و  $r$  مختصات در جهت شعاع می‌باشد. معادله اندازه حرکت در جهت  $x$  خواهد شد.

$$\frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho u v r)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{4}{3} \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{2\mu}{3r} \frac{\partial(vr)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2)$$

در اینجا  $\mu$  لزجت دینامیک محصولات و  $P$  فشار می‌باشد. همچنین معادله اندازه حرکت در جهت  $r$  خواهد شد.

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho vvr)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{2r\mu}{3} \frac{\partial(u)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{4r\mu}{3} \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{2}{3} \mu v \right) \quad (3)$$

و با گرفتن توازن انرژی برای شعله، معادله انرژی خواهد شد.

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho uh) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho vhr) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k \frac{\partial T}{\partial r} r \right) + q \quad (4)$$

در اینجا انتالپی بر واحد جرم،  $T$  دمای شعله،  $k$  ضریب هدایت حرارتی محصولات و  $q$  شدت تولید گرما بر واحد حجم می‌باشد. انتالپی  $h$  بصورت ذیر تعریف می‌شود.

$$h = \sum_i m_i h_i \quad (5)$$

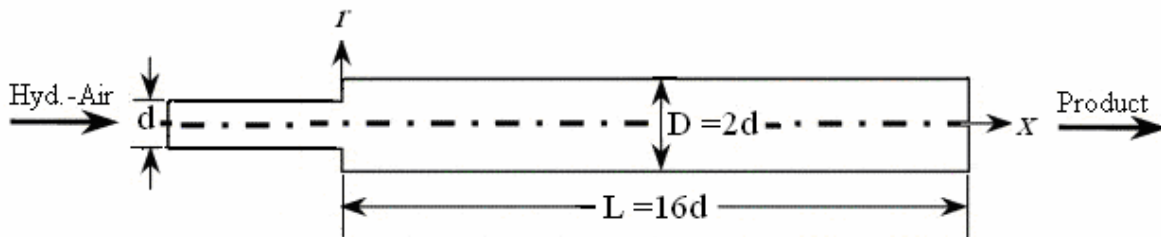
در اینجا  $h_i$  انتالپی برواحد جرم گونه‌های شیمیایی  $i$  و  $m_i$  کسر جرمی گونه‌های شیمیایی  $i$  می‌باشد. برای هر گونه شیمیایی  $i$  توازن جرمی بصورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial(\rho u m_i)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v r m_i)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_i \frac{\partial(\rho m_i)}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_i r \frac{\partial(\rho m_i)}{\partial r} \right) + \omega_i \quad (6)$$

در اینجا  $D_i$  پخش جرم گونه‌های  $i$  و  $\omega_i$  شدت تولید جرم گونه‌های شیمیایی بر واحد حجم می‌باشد. با گرفتن توازن انرژی روی دیوار محصور کرده شعله خواهیم داشت.

### 3- مدل فیزیکی و شرایط مرزی

مدل فیزیکی دوبعدی محفظه احتراق میکرونی که به صورت استوانه مدور می‌باشد، در شکل (1) نشان داده شده است. تاثیرات ابعاد محفظه بر مشخصه‌های احتراق برای دو محفظه استوانه‌ای میکرونی بررسی می‌شود. قطر دهانه  $d$  از 0/1 تا 0/4 میلیمتر تغییر می‌کند. نسبت قطر محفظه  $D$  به قطر دهانه  $d$  برابر 2 و نسبت طول محفظه  $L$  به قطر دهانه  $d$  معادل 16 در نظر گرفته شده است. مخلوط تئوری هیدروژن- هوا با نسبت هوا به سوخت برابر 2 از یک طرف (دهانه) به محفظه احتراق میکرونی تزریق می‌شود.



شکل 1- مدل فیزیکی دوبعدی محفظه احتراق میکرونی به صورت استوانه مدور

طول مشخصه محفظه احتراق میکرونی، یعنی مسیر جریان گاز در حال واکنش، هنوز هم بقدر کافی بزرگتر از مسیر متوسط مولکولی پوشش آزاد (فاصله میانگین بین دو برخورد متوالی مولکولی) هوا و دیگر گازهای جاری در محفظه احتراق است. لذا پیوستگی سیال حفظ شده و معادلات ناویر- استوکس برای محدوده سیال حل خواهند شد.

از نرم افزار Fluent برای انجام شبیه سازیهای عددی جریان سیال در محفظه احتراق بوسیله حل معادلات پیوستگی جرم، اندازه حرکت و انرژی استفاده می‌شود. چگالی سیال با استفاده از قانون گاز کامل محاسبه می‌شود. همگرایی شبیه سازی CFD بر

مبنای باقیمانده های تمام معادلات تعیین کننده برآورد می‌شود. نتایج گزارش شده در این مطالعه وقتی بدست می‌آیند که باقیمانده ها کوچکتر از  $1.0 \times 10^{-6}$  باشند.

دمای جریان آزاد مخلوط هیدروژن- هوا در ورود به دهانه برابر 300 K است. طول دهانه ورود به محفظه احتراق میکرونی، بسته به عدد رینولدز، به اندازه‌ای در نظر گرفته شده تا جریان بصورت توسعه یافته وارد محفظه شود. سرعت متوسط جریان توسعه یافته مخلوط سوخت و هوا در دهانه، برابر 6 m/s در نظر گرفته شده است. عدد رینولدز جریان سیال در دهانه برای قطر 0/4 mm برابر 168 و برای قطر 0/1 mm معادل 42 خواهد شد، لذا جریان آرام خواهد بود. در یکی از آزمایشهای عددی سرعتهای بیشتر از 6 m/s نیز بررسی می‌شود. بدیهی است مخلوط سوخت و هوا در بدو ورود به محفظه با یک انبساط ناگهانی روبروست. قطر محفظه احتراق دو برابر قطر دهانه مخلوط سوخت- هوا می‌باشد. بنابراین، مساحت مقطع عرضی محفظه احتراق در حدود چهار برابر مساحت دهانه و سرعت میانگین مخلوط گاز در مقطع عرضی محفظه قبل از اینکه سوخته شود در حدود 1/5 m/s خواهد بود. وقتی سرعت میانگین مخلوط گاز 1/5 m/s پایین تر از سرعت شعله حدود 2/0 m/s باشد، به پایداری شعله در محفظه احتراق کمک خواهد کرد. شرایط مرزی محور تقارن در طول محور مرکزی محفظه احتراق اعمال می‌شوند. در مرز خروجی، فشار ثابت 100 kPa اعمال می‌گردد. در جداره محفظه، شرایط فاقد لغزش و فاقد شار حرارتی برای سطح جداره اعمال می‌شود. به منظور مطالعه تاثیر ابعاد و اندازه‌های محفظه بر احتراق، در عین حالیکه نسبتهای هندسی محفظه احتراق در تمام شبیه سازیها بطور یکسان حفظ می‌شود، قطر دهانه محفظه کم می‌گردد. این تغییرات اندازه محفظه، همراه با بی دررو بودن جداره محفظه احتراق، بر روی مشخصه های احتراق بوسیله شبیه سازی عددی تحقیق گردید و نتیجه گرفته شد که احتراق پایدار در محفظه میکرونی از طریق موازنه زمان سکونت جریان و زمان واکنش شیمیایی و بهینه سازی شرایط بی دررو قابل دستیابی است. چون زمان سکونت در محفظه میکرونی کوتاه خواهد شد، کوتاه کردن زمان واکنش شیمیایی به منظور تضمین تکمیل فرآیند احتراق نیز مهم است. بر طبق نظریه سینتیک شیمیایی، یکی از اندازه‌گیری های احتمالی برای کوتاه کردن زمان واکنش شیمیایی افزایش سرعت واکنش بوسیله تضمین دمای واکنش بالا می‌باشد. این در عوض بوسیله کاهش اتلاف گرما از محفظه احتراق و عایقکاری آن قابل دستیابی است.

#### 4- واکنش های احتراق

مراحل واکنش احتراق هیدروژن و اکسیژن طبق ذیل لیست می‌شود. مدل از 19 واکنش مقدماتی برگشت پذیر به شرح ذیل و 9 گونه شیمیایی  $H_2$ ،  $O_2$ ،  $H_2O$ ،  $H$ ،  $O$ ،  $OH$ ،  $HO_2$ ،  $H_2O_2$  و  $N_2$  تشکیل می‌شود.

1.  $O_2 + H = OH + O$
2.  $H_2 + O = OH + H$
3.  $H_2 + OH = H_2O + H$
4.  $OH + OH = H_2O + O$
5.  $H_2 + O_2 = OH + OH$
6.  $H + OH + M = H_2O + M_b$
7.  $O_2 + M = O + O + M$
8.  $H_2 + M = H + H + M_c$
9.  $H + O_2 + M = HO_2 + M_d$
10.  $H + O_2 + O_2 = HO_2 + O_2$
11.  $H + O_2 + N_2 = HO_2 + N_2$
12.  $HO_2 + H = H_2 + O_2$

13.  $\text{HO}_2 + \text{H} = \text{OH} + \text{OH}$
14.  $\text{HO}_2 + \text{O} = \text{OH} + \text{O}_2$
15.  $\text{HO}_2 + \text{OH} = \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$
16.  $\text{HO}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$
17.  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{M} = \text{OH} + \text{OH} + \text{M}$
18.  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H} = \text{H}_2 + \text{HO}_2$
19.  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH} = \text{H}_2\text{O} + \text{HO}_2$

مدل احتراق بوسیله شبیه سازی احتراق هیدروژن- هوا تحت شرایط بی دررو و مقایسه با اندازه گیری شعله بی دررو گزارش شده در مرجع [10] (Glassman) معتبر می شود.

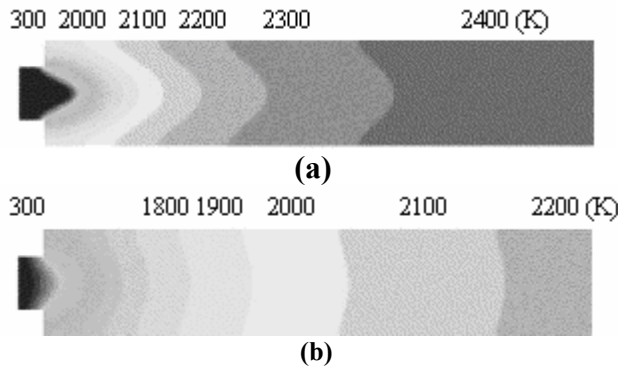
دمای شعله و کسر مولی گونه های شیمیایی بدست آمده از پیش بینی مدل عددی این مقاله به همراه نتایج آزمایشی مرجع [10] در جدول (1) درج شده اند. پیش بینی های عددی در مطابقت قابل قبولی با داده های آزمایشی هستند. اگر چه پارامترهای نمونه احتراق بکار رفته در این مطالعه از آزمایش های محفظه های احتراق بزرگ حاصل می شوند، اما گمان می رود که آن پارامترها در سطح میکرونی بر طبق اصولی که واکنش شیمیایی بر مبنای فعل و انفعالات مولکولهای واکنش دهنده است، معتبر هستند.

جدول 1- مقایسه دمای شعله بی دررو  $T_b$  و کسر مولی گونه های شیمیایی در مخلوط تئوری هیدروژن- هوا در شبیه سازی و آزمایش

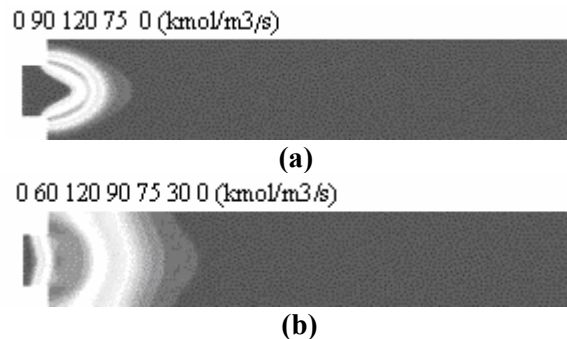
نتایج عددی	نتایج آزمایش مرجع [10]	دما / غلظت
2397	2382	Tb [K]
0/311	0/323	H2O
0/009	0/005	O2
0/02	0/015	H2
0/01	0/007	OH
0/004	0/002	H
0/0014	0/001	O
-	0/003	NO
0/644	0/644	N2

## 5- احتراق در محفظه های میکرونی تحت شرایط جداره بی دررو

شکل (2) نواحی همدمای در محفظه احتراق را برای قطرهای مختلف 0/1 mm و 0/4 mm دهانه تحت شرایط بی دروی جداره نشان می دهد. همچنین نواحی هم سرعت تولید آب، که شاخص سرعت واکنش شیمیایی جهانی محسوب می شود، در شکل (3) نشان داده شده است. در این شکلها، موقعیت نسبی ناحیه احتراق و توزیع ویژگی فیزیکی در دو محفظه احتراق مختلف به آسانی قابل مقایسه هستند. از شکل های (2) و (3) می توان ملاحظه کرد که احتراق می تواند در محفظه احتراق میکرونی با توجه به جداره بی درو فراروند باشد. دمای گاز بدلیل گرمای آزاد شده از احتراق به طرز چشمگیری بالا می رود. بالاترین دما در خروجی محفظه احتراق در دامنه 2000-2400K بدست می آید. دمای شعله برای محفظه احتراق بزرگتر که تقریباً معادل دمای شعله بی دروی احتراق مخلوط تئوری هیدروژن- هوا است 2400K می باشد. همانطور که اندازه محفظه احتراق کاهش می یابد، دمای خروجی محصول اشتعال نیز کاهش می یابد. با این وجود، همانطور که اندازه محفظه احتراق کاهش می یابد، نسبت ناحیه اشتعال به حجم محفظه به طرز چشمگیری همانطور که در شکل (2) نشان داده می شود، افزایش می یابد.

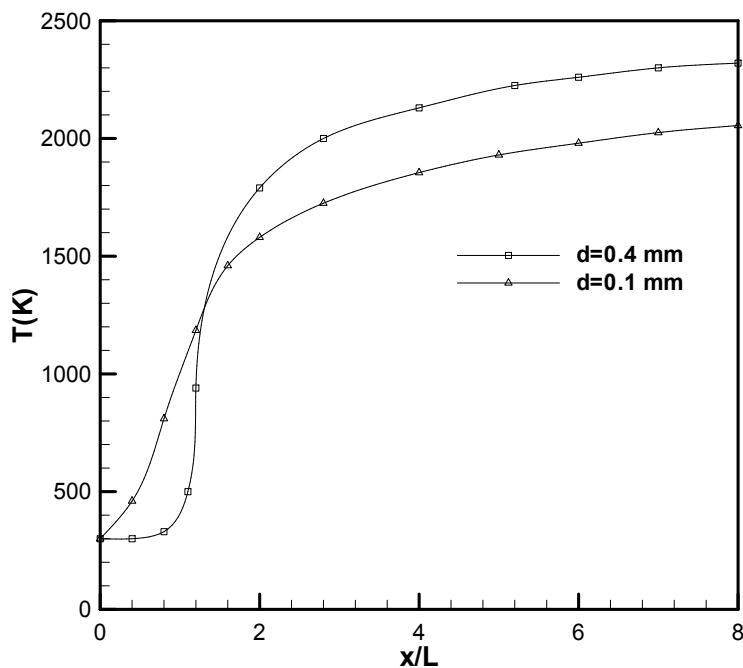


شکل 2- نواحی همدمما (K) در مقطع عرضی و در طول محفظه احتراق میکرونی تحت شرایط جداره بی دررو با قطر دهانه ورودی: (a) 0/4 mm (b) 0/1 mm

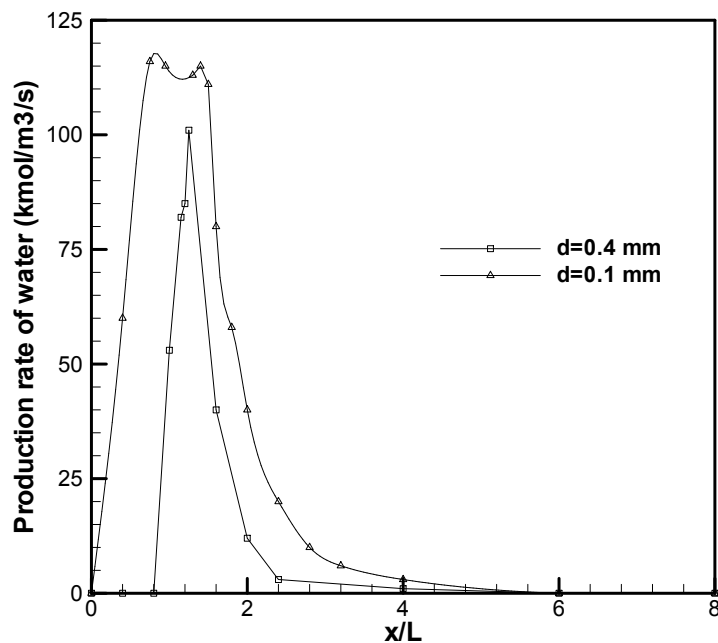


شکل 3- نواحی هم سرعت تولید آب [kmol/m<sup>3</sup>/s] در مقطع عرضی و در طول محفظه احتراق میکرونی تحت شرایط جداره بی دررو با قطر دهانه ورودی: (a) 0/4 mm (b) 0/1 mm

شکل‌های (4) و (5) و (6) دمای گاز، سرعت تولید آب و توزیع سرعت تبدیل هیدروژن در طول محور مرکزی محفظه را نشان می‌دهند. در اینجا، سرعت تبدیل هیدروژن بصورت  $\frac{[H_2]_{initial} - [H_2]}{[H_2]_{initial}}$  تعریف می‌شود و فاصله محوری بدون بُعد بصورت نسبت فاصله محوری به قطر دهانه تعریف می‌شود. وقتی بعد محفظه به اندازه کافی بزرگ باشد، مخلوط گاز زمان اقامت کافی در محفظه را دارد بطوریکه احتراق قبل از اینکه از محفظه احتراق خارج شود، کامل خواهد شد. با احتراق کامل در محفظه بزرگتر، محصولات تقریباً در دمای شعله بی درو 2400 K همانطور که در شکل (4) نشان داده می‌شود از محفظه احتراق خارج می‌شوند. با این وجود، وقتی اندازه محفظه احتراق کاهش می‌یابد، مکانیسم واکنش شیمیایی مشابه نگه داشته می‌شود. ممکن است ناحیه واکنش، بیشتر فضای محفظه احتراق کوچک را اشغال کند. از این رو، از شکل (5) قابل مشاهده است که اوج سرعت تولید آب وقتی اندازه محفظه کاهش می‌یابد گسترده تر می‌شود. وانگهی شکل (4) نشان می‌دهد، در محفظه کوچکتر بدلیل احتراق ناقص دمای محصولات احتراق کاهش می‌یابد.



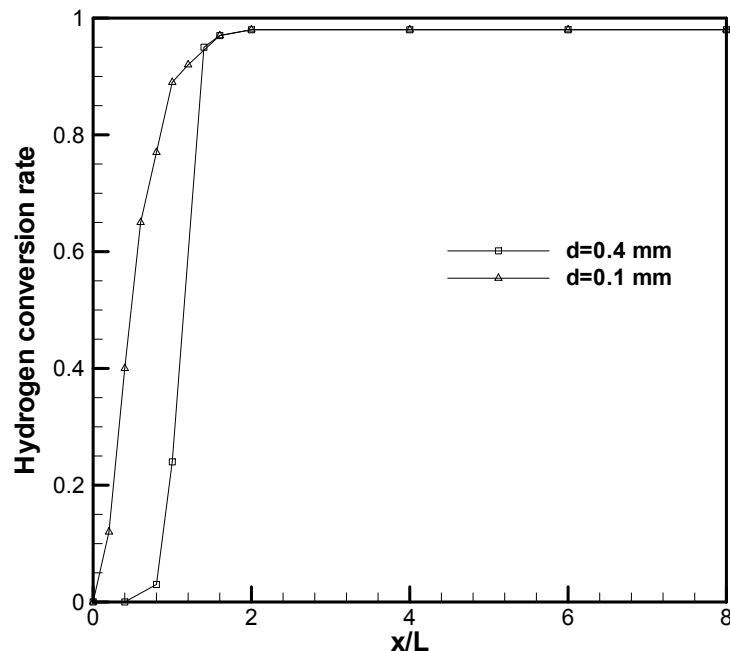
شکل 4- توزیع دمای محصولات احتراق برحسب طول محفظه میکرونی با دو قطر مختلف و تحت شرایط جداره بی درو



شکل 5- توزیع سرعت تولید آب [kmol/m³/s] برحسب طول محفظه میکرونی با دو قطر مختلف و تحت شرایط جداره بی درو

شکل (6) سرعت تبدیل هیدروژن را نشان می‌دهد که در ابتدای محفظه کم و سریعاً در ربع محفظه به ماکزیمم می‌رسد و تا آخر محفظه این ماکزیمم ادامه دارد. در محفظه احتراق کوچکتر نزدیک به دهانه، سرعت تبدیل بالاتر است، اما نزدیک خروجی

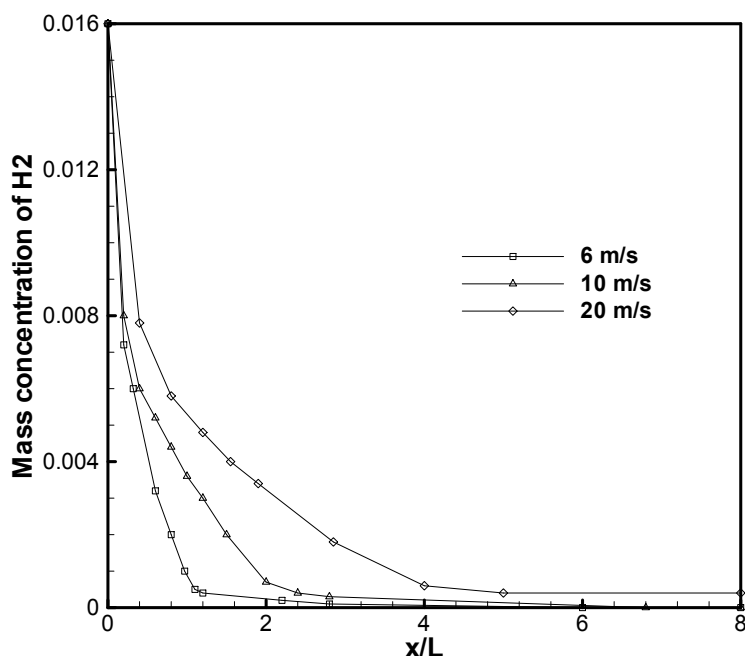
سرعت تبدیل هر دو محفظه یکی است و لذا هیدروژن در خروجی محفظه نهایی برای هر دو محفظه احتراق تقریباً بطور کامل تمام می‌شود. این ممکن است برای هیدروژن بدلیل مدل سازی چند واکنش مقدماتی باشد که بوسیله فعل و انفعال با هوا قبل از تشکیل آب (محصول نهایی) به چند گونه میانی دیگر تبدیل می‌شود. از این رو، سرعت تولید آب، شاخص بهتری برای نشان دادن تکمیل واکنشهای شیمیایی می‌باشد. از شکل های (3) و (5) می‌توان ملاحظه کرد که وقتی بعد محفظه کاهش می‌یابد حداکثر سرعت تولید آب در همان سطح حفظ می‌شود، بدین معنی که سرعت واکنش شیمیایی هنگام کاهش اندازه محفظه احتراق به طرز چشمگیری تغییر نمی‌کند.



شکل 6- توزیع سرعت تبدیل هیدروژن بر حسب طول محفظه میکرونی با دو قطر مختلف و تحت شرایط جداره بی درو

نتایج شبیه سازی تحت شرایط جداره بی درو نشان می‌دهند که کاهش اندازه محفظه احتراق تأثیر چشمگیری بر سرعت کلی واکنش شیمیایی (سرعت تولید آب) در محفظه ندارد. اما کاهش اندازه محفظه احتراق ممکن است بازده احتراق را محدود کند. این بدلیل حقیقتی است که مخلوط سوخت - هوا زمان اقامت کافی برای تمام کردن کامل واکنش شیمیایی در محفظه‌های کوچک تر را ندارد. از این رو، برای بدست آوردن احتراق پایدار در محفظه کوچک، بعد محفظه باید بیشتر از ضخامت شعله بی درو باشد. ضخامت شعله بی درو (ناحیه واکنش) بدست آمده از این شبیه سازی در حدود 0/5 mm برآورد می‌شود. شکل (7) غلظت هیدروژن در طول دیواره محفظه برای سرعتهای مختلف ورود سوخت - هوا به داخل دهانه ورودی را نشان می‌دهد. در کلیه آزمایشات عددی در این مقاله نسبت هوا به سوخت تئوری بوده و سرعت جریان سوخت در دهانه هم به غیر از مورد اخیر ثابت بوده است. بنابراین در این مرحله تأثیر سرعت سوخت روی عملکرد محفظه احتراق میکرونی بررسی شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت سوخت و کاهش زمان اقامت سوخت داخل محفظه، غلظت هیدروژن بیشتر شده و به سمت پائین دست جریان توسعه می‌یابد.





شکل 7- غلظت هیدروژن بر حسب طول محفظه میکرونی  
برای سرعت‌های مختلف سوخت-هوا و  $d=0/2$  mm

## 6- نتایج

در این مقاله، شبیه سازی عددی احتراق مخلوط هیدروژن- هوا در محفظه‌های میکرونی در دو اندازه مختلف صورت گرفته است. قطر دهانه محفظه با اندازه‌های  $0/4$  mm و  $0/1$  mm بوده و دیواره جداره بی درو می‌باشد. از نظر علمی، احتراق پایدار در محفظه احتراق فقط زمانی می‌تواند روی دهد که زمان اقامت واکنش دهنده بیشتر از زمان واکنش شیمیایی است. در مورد احتراق در محفظه‌های احتراق بزرگ سنتی، زمان اقامت برای واکنش دهنده در محفظه احتراق همیشه برای احتراق کامل به اندازه کافی بزرگ است. کاهش بُعد محفظه احتراق باعث کاهش چشمگیر در زمان اقامت می‌شود چون سرعت جریان واکنش دهنده نمی‌تواند متناسب با آن کم شود. پیامد مستقیم زمان اقامت ناکافی در محفظه احتراق میکرونی ممکن است که به احتراق ناقص در محفظه انجامیده و موجب کاهش بازده احتراق گردد. بازده پایین تر احتراق ممکن است باعث تولید گرمای ناکافی برای حفظ احتراق فراروند شود و در ادامه باعث اطفاء شود. شبیه سازی عددی احتراق هیدروژن- هوا در محفظه میکرونی با شرایط جداره بی درو اثبات می‌کند که احتراق ممکن است تنها هنگامی پایدار باشد که اندازه محفظه احتراق در مقایسه با ضخامت شعله بی درو به اندازه کافی بزرگ باشد. ضخامت شعله بی درو (ناحیه واکنش) بدست آمده از این شبیه سازی در حدود  $0/5$  mm برآورد می‌شود. از طرفی تحت شرایط جداره بی درو، کاهش اندازه محفظه احتراق تأثیر چشمگیری بر سرعت کلی واکنش شیمیایی (سرعت تولید آب) در محفظه ندارد. همچنین با افزایش سرعت سوخت و کاهش زمان اقامت سوخت داخل محفظه، غلظت هیدروژن بیشتر شده و به سمت پائین دست جریان توسعه می‌یابد.

در نتیجه مدل عددی قادر است معادلات احتراق میکرونی را حل کرده و پدیده و مکانیسم اطفاء در احتراق میکرونی را مورد بحث و بررسی قرار دهد. احتراق پایدار در محفظه احتراق میکرونی بوسیله بهینه سازی سیستم هندسه محفظه احتراق، شرایط

گرمایی و فعل وانفعال دینامیک سیال قابل حصول بوده و در طراحی و بهینه سازی ابزار تولید برق کوچک حرارتی مفید است. نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج ارائه شده توسط محققان دیگر مقایسه شده‌اند و تطابق خوبی مابین آنها مشاهده می‌شود.

## مراجع

- 1- Norton, D.G., and Vlachos, D.G., "Combustion characteristics and flame stability at the microscale: a CFD study of premixed methane/air mixtures," *Chemical Engineering Science*, Vol. 58, pp. 4871–4882, 2003.
- 2- Norton, D.G., and Vlachos, D.G., "A CFD study for propane/air microflame stability," *Combust. Flame*, Vol. 138, pp. 97–107, 2004.
- 3- Choi, K.H., Na, H.B., Lee, D.H., and Kwon, s., "Numerical simulation of flame propagation near extinction condition in a micro-combustor," *Microscale Thermophysical Engineering*, Vol. 8, pp. 71–89, 2004.
- 4- Carlos, F.A., "Micro-power generation using combustion: issues and approaches. Twenty-Ninth International Symposium on Combustion," Sapporo, Japan, the Combustion Institute, pp. 1–45, 2002.
- 5- Spadaccini, C.M., Mehra, A., Lee, J., Zhang, X., Lukachko, S., and Waitz, A.I., "High power density silicon combustion system for micro gas turbine engines," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 125, pp. 709–719, 2003.
- 6- Jinson, H., Meng, W., and Kurichi, K., "Numerical simulation of the combustion of hydrogen-air mixture in micro-scaled chambers. Part I: Fundamental study," Institute of High Performance Computing in Singapore, 2005.
- 7- Li, Z.W., Chou, S.K., Shu, C., and Yang, W.M., "Effects of step height on wall temperature of a microcombustor," *J. of micromechanics and microengineering*, Vol. 15, pp. 207-212, 2005.
- 8- Li, Z.W., Chou, S.K., Shu, C., Xue, H., and Yang, W.M., "Characteristics of premixed flame in microcombustors with different diameters," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, 271–281.
- 9- Chen1, G.B., Chao, Y.C., Chen2, C.P., Wu2, C.Y., "Numerical simulation of Hydrogen/Air combustion characteristics inside a platinum micro tube," Institute of aeronautics and astronautics, National Cheng Kung university, Tainan, Taiwan
- 10- Glassman, L., *Combustion*, Academic Press, California, 1996.