

## شبیه‌سازی عددی متغیرهای موثر بر پایداری احتراق مخلوط استوکیومتریکی پیش اختلاط متان - هوا در یک محفظه احتراق میکرو

جلال زروندی\*، صادق تابع جماعت\*\* و محمدرضا بیگ محمدی\*\*\*

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوافضا

(دریافت: ۱۳۸۹/۱/۲۰، پذیرش: ۱۳۸۹/۱۱/۲۵)

در مطالعه حاضر مدل‌سازی عددی احتراق جریان کاملاً آرام، استوکیومتریکی پیش اختلاط متان- هوا در یک محفظه احتراق دو بعدی در ابعاد میکرو بررسی شده است. هدف از این مطالعه بررسی چگونگی وقوع، پدیده شناسی و متغیرهای موثر از قبیل پایداری شعله بر نحوه احتراق در تجهیزات MEMS جهت تولید انرژی یا نیروی پیشران در ابعاد کوچک جهت کاربردهای هوافضایی برای اکتشافات فضائی است. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان می‌دهند که پایداری شعله در داخل یک محفظه احتراق میکرو به مقدار زیادی به مقادیر ضخامت دیواره محفظه احتراق و ضریب رسانایی گرمایی دیواره، عرض (ارتفاع) محفظه احتراق، ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی بین دیواره بیرونی محفظه احتراق و محیط اطراف و سرعت ورودی مواد واکنش دهنده پیش مخلوط وابسته است.

**کلید واژه:** محفظه احتراق میکرو، پیش اختلاط، متان، هوا، پایداری شعله

### مقدمه

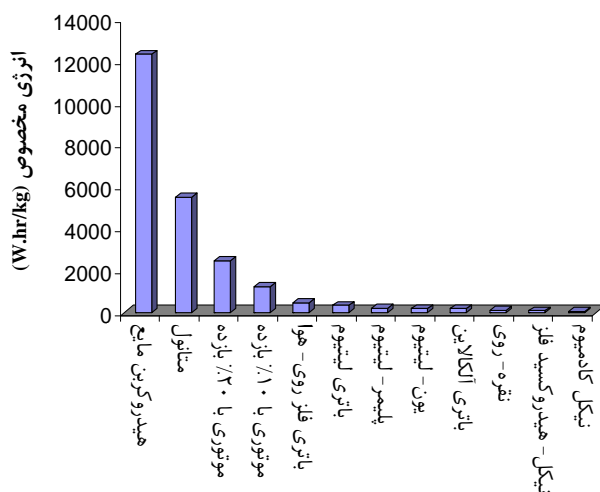
امروزه با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه نیمه- رساناها (Semi-Conductor) و فناوری‌های ماشینکاری در ابعاد میکرو، امکان تولید تجهیزات در ابعاد کوچک در حد میلی‌متر و همچنین توسعه سریع سامانه‌های الکتریکی و مکانیکی میکرو (MEMS- Micro Electro Mechanical Systems) فراهم شده است. از این رو، تقاضاها برای طراحی و تولید این گونه سامانه‌ها از قبیل سامانه‌های متحرک بسیار کوچک شامل میکرو روبات‌ها، سامانه‌های هوافضایی ابعاد کوچک و سامانه‌های تولید توان میکرو که دارای توانایی تولید انرژی زیاد در ابعاد کوچک هستند، برای استفاده در دو بخش غیر نظامی و نظامی به سرعت در حال گسترش است [۱ و ۲]. با وجود پیشرفت‌ها و تلاش‌های صورت گرفته در این زمینه، یکی از موانع عمده توسعه و پیشرفت این فناوری، یافتن منبع تامین توان و انرژی مناسب برای این گونه سامانه‌هاست. منابع تولید توان الکتریکی موجود از قبیل باتری‌های شیمیایی با توجه با چگالی انرژی موجود در آنها، وزن زیادی را به سامانه تحمیل می‌کنند که مطلوب این گونه سامانه‌ها نیست [۱ و ۲]. از آنجا که سوخت‌های هیدروکربنی، ارزان، در دسترس و دارای مقدار چگالی انرژی بالایی در واحد کوچکی از حجم، حتی تنها با ۵ تا ۱۰ درصد بازده، در مقایسه با آخرین تکنولوژی باتری‌های موجود (شکل ۱) هستند، از این رو، در سال‌های اخیر به عنوان یکی از مناسب‌ترین منابع تولید توان در سامانه‌های تولید توان میکرو به صورت جدی مورد توجه قرار گرفته‌اند. از آنجا که برای استخراج انرژی از سوخت‌های هیدروکربنی نیاز به طراحی محفظه‌های احتراقی در ابعاد کوچک است، بسیاری از محققان در سراسر دنیا در تلاش برای بهینه‌سازی و ارتقاء این سامانه‌های احتراقی به عنوان منابع تولید انرژی آینده هستند. به عنوان مثال تحقیقات زیادی در زمینه سامانه‌های ترموفوتولتائیک (TPV- Thermophotovoltaic) در ابعاد میکرو صورت پذیرفته‌است [۲]. این نوع محفظه‌های احتراق میکرو به دلیل نداشتن قطعات متحرک و پیچیده برای

\* کارشناس ارشد (ایمیل: zarvandi@aut.ac.ir)

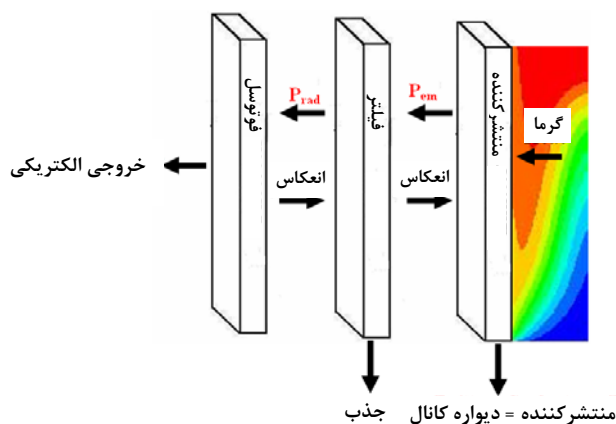
\*\* دانشیار - نویسنده مخاطب (ایمیل: sadegh@aut.ac.ir)

\*\*\* کارشناس ارشد (ایمیل: baigmohammadi@yahoo.com)

تولید انرژی در سامانه‌های الکترومکانیکی کوچک قابل حمل (Portable) بسیار مناسب‌اند. محفظه احتراق یکی از مهم‌ترین قسمت‌های سامانه‌های میکروترموپوتولتائیک (Micro-TPV) است. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است نقش منتشرکننده (Emitter) را دیواره محفظه احتراق ایفا کرده و بنابراین داشتن توزیع دمای بالا و یکنواخت در طول سطح دیواره خارجی این‌گونه از محفظه‌های احتراق لازم است.



شکل ۱- مقایسه انرژی مخصوص برای هیدروکربن مایع (اکتان)، در ۱۰ و ۲۰ درصد کارایی موتورهای و چندین نسل تکنولوژی باتری‌ها [۲]



شکل ۲- طرحواره کلی از نحوه تولید توان در یک سامانه میکروترموپوتولتائیک

با توجه به مطالب بالا، تحقیقات و تلاش‌های گسترده‌ای چه به صورت تجربی و چه به صورت شبیه‌سازی عددی در زمینه ایجاد احتراق پایدار با بازده بالا در این‌گونه محفظه‌های احتراق در طی سال‌های اخیر صورت پذیرفته است. بررسی کلی شرایط حال حاضر تکنولوژی تولید توان در ابعاد کم و سامانه میکروترموپوتولتائیک توسط چوان چیا و همکاران صورت پذیرفته است [۲]. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که افق توسعه سامانه‌های تولید توان میکرو بر پایه سوخت‌های هیدروکربنی بسیار روشن بوده و امید آن می‌رود که در دهه آینده به صورت یک سامانه تولید توان، جایگزین باتری‌های امروزی شوند. به دلیل نسبت سطح به حجم بالا در این نوع از سامانه‌های احتراقی [۳-۶] که برای لوله‌ای با شعاع یک میلی‌متر به حدود ۲۰۰۰ می‌رسد، خاموشی (Quenching) گرمایی شعله و اتلاف گرمایی به محیط اطراف [۶-۸] در این محفظه‌های احتراق میکرو در مقایسه با محفظه‌های احتراق متوسط و بزرگ بسیار مهم و تاثیر گذار هستند. خاموشی گرمایی می‌تواند به طور موثری فرآیند احتراق

را در این نوع محفظه‌های احتراق تحت تاثیر قرار دهد و ممکن است فرآیند احتراق را به سوی خاموشی یا پرش شعله (Blow out) سوق دهد [۸،۵،۶]. از این رو در سال‌های اخیر بیشتر مطالعات تجربی و عددی که در زمینه سامانه‌های میکروفوتولتائیک صورت گرفته است بر روی موضوعات اخیر به خصوص فرآیند انتقال گرما تمرکز کرده‌اند.

در این راستا هوآو و همکاران [۹]، کمالی و همکاران [۵] و لی و همکاران [۱۰]، به ترتیب، احتراق پیش مخلوط هیدروژن-هوا را در داخل یک محفظه احتراق میکرو به صورت شبیه‌سازی عددی مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند. با توجه به این مطلب که از موانع ایجاد احتراق پایدار در داخل یک محفظه احتراق میکرو، کم بودن زمان اقامت مخلوط واکنش‌پذیر به مقیاس زمانی واکنش شیمیایی و بالا بودن نسبت سطح انتقال گرما به حجم محفظه احتراق است، لذا، تحقیقات آنها نشان داد که می‌توان با استفاده از روش‌های موجود از قبیل ایجاد پله در داخل یک محفظه احتراق میکرو، زمان اقامت جریان مخلوط پیش اختلاط در داخل محفظه احتراق را در مقایسه با مقیاس زمانی واکنش شیمیایی افزایش داد که این خود موجب ایجاد یک احتراق پایدار در داخل محفظه احتراق در ابعاد میکرو می‌شود. همچنین آن‌ها نشان دادند که هر دو متغیر اتلاف گرمایی حجمی و تنش برشی بر روی دیواره داخلی محفظه احتراق به قطر محفظه احتراق میکرو وابسته‌اند [۱۰]. در تحقیقات دیگری، جان وی و همکاران [۱۱] اثر نسبت هم‌ارزی و نرخ جریان مخلوط واکنش دهنده را بر روی کیفیت احتراق و موقعیت ناحیه واکنش مورد بررسی و تحقیق قرار داده‌اند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که هر چه نسبت تعادل مخلوط به سمت استوکیومتریک پیش رود و هر چه نرخ جریان مخلوط بیشتر شود (تا زمانی که پرش شعله رخ ندهد) احتراق کامل‌تری خواهیم داشت. همچنین نتایج به دست آمده از تحقیق نورتن و همکاران [۱۲] در زمینه متغیرهای موثر بر کنترل احتراق در داخل یک میکروکانال نشان می‌دهد که ضریب رسانایی دیواره محفظه احتراق و ضخامت آن نقش عمده‌ای در تعیین انتقال گرما به بالادست کانال و همچنین پیش گرمایش مخلوط واکنش دهنده بازی می‌کنند. به علاوه آن‌ها نشان دادند که پرش شعله زمانی رخ می‌دهد که سرعت خروجی مشعل بیش از سرعت سوزش شعله باشد. در تحقیق دیگری که در زمینه احتراق اکسیژن-هیدروژن در یک محفظه احتراق میکرو از نوع ترمو فوتولتائیک انجام شده است، پن و همکاران [۴] بر روی اثرات متغیرهای عمده از قبیل نسبت هم‌ارزی هیدروژن به اکسیژن، نسبت قطر نازل ورودی به قطر محفظه احتراق و نسبت ضخامت دیواره به قطر یک محفظه احتراق میکرو بر نوع تبدیل انرژی ترمو فوتولتائیک تحقیقات گسترده‌ای را انجام داده‌اند. نتایج به دست آمده از تحقیقات آن‌ها اثبات می‌کند که متغیرهای هندسی از قبیل نسبت قطر ورودی به قطر محفظه، نسبت ضخامت دیواره محفظه احتراق میکرو به قطر محفظه احتراق و نیز نسبت هم‌ارزی سوخت به اکسیدکننده نقش مهمی بر روی فرآیند احتراق و محل شعله در یک محفظه احتراق میکرو ایفا می‌کنند. همچنین در تحقیق دیگری، یانگ و همکاران [۱۳] اثر ترکیب محفظه احتراق را بر روی کارایی و بازده سامانه‌های تولید توان بر پایه فناوری میکرو ترموفوتولتائیک مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که قطر محفظه احتراق در یک سامانه الکتریکی و مکانیکی میکرو یک عامل بسیار مهم است که کارایی سامانه‌های میکرو ترموفوتولتائیک را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد.

از این رو با توجه به مطالب ارائه شده، هدف از این مطالعه در قالب شبیه‌سازی عددی، بررسی گسترده‌تر متغیرهای موثر بر ایجاد و پایداری احتراق مخلوط پیش اختلاط متان-هوا در یک محفظه احتراق دوبعدی است. در این بررسی اثرات پیش گرمایش غیر مستقیم مخلوط پیش اختلاط ورودی، سرعت ورودی مواد واکنش دهنده ( $V_{in}$ )، ضخامت دیواره محفظه احتراق ( $L_w$ )، ضریب رسانایی دیواره محفظه احتراق ( $K_w$ ) و ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی دیواره خارجی محفظه احتراق میکرو ( $h_{out}$ ) بر توزیع دما و محل شعله در داخل یک محفظه احتراق میکروی دو بعدی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

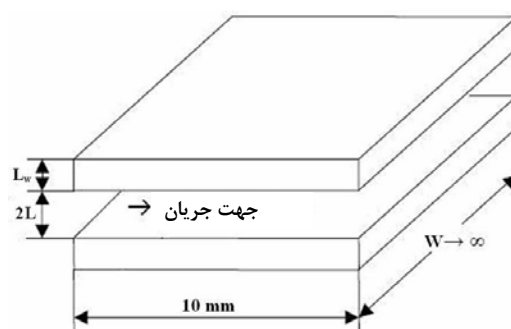
## مدلسازی فیزیکی

محفظه احتراق میکروی دو بعدی مدلسازی شده، شامل دو صفحه موازی به عرض بی‌نهایت و طول یک سانتی‌متر است که مخلوط متان-هوا در حالت استوکیومتریک، به داخل آن تزریق شده است. از طرفی فاصله صفحات  $2L$  و ضخامت دیواره محفظه احتراق  $L_w$  است که جزئیات آن در شکل (۳) نشان داده شده است. به دلیل نسبت منطری بالا، محفظه احتراق به

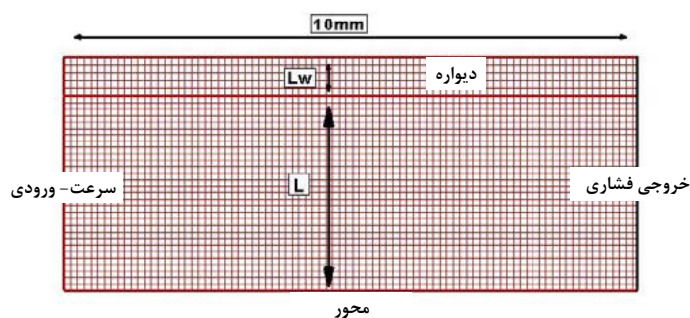
صورت دوبعدی مدل شده است. همچنین با توجه به مطالعات قبلی صورت گرفته [۹ و ۱۰] و به دلیل هندسه متقارن محوری محفظه احتراق، محاسبات تنها برای یک نیمه مدل فیزیکی انجام شده است (شکل (۴)). مخلوط پیش اختلاط متان- هوا با نسبت هم‌ارزی استوکیومتری از قسمت ورودی، وارد محفظه احتراق میکرو می‌شود [۴-۱۴]. دما و فشار ورودی به ترتیب برابر ۳۰۰ کلوین و ۱۰۱۳۲۵ پاسکال هستند. معادلات بقای جرم، تکانه، انرژی و گونه‌ها با استفاده از روش حجم محدود و توسط یک کد محاسب جریان‌های واکنش‌پذیر دوبعدی و به صورت پایا مدل‌سازی شده‌اند. در این مطالعه، برای حل عددی دینامیک جریان واکنش‌پذیر، از یک کد سیمپل (Simple) با حل گر مجزا/ضمنی و نیز روش گسسته‌سازی مرتبه اول بالا دستی استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی شیمی احتراق و چگالی سیال، روش‌های جریان آرام نرخ محدود و گاز کامل به کار برده شده‌اند. ظرفیت گرمایی ویژه گونه‌ها از برازش تکه‌ای چند جمله‌ای و ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط گازها از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_{p,Mixture} = \sum_i^N Y_i$$

که در اینجا  $Y_i$ ، کسر جرمی گونه  $i$  و  $C_{p,i}$  ظرفیت گرمایی ویژه گونه  $i$  است. به علاوه، برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی و گرانیوی گونه‌ها و مخلوط و نیز نفوذ جرمی از معادلات نظریه جنبشی برای گونه‌ها و قانون اختلاط جرمی- وزنی برای مخلوط استفاده شده است.



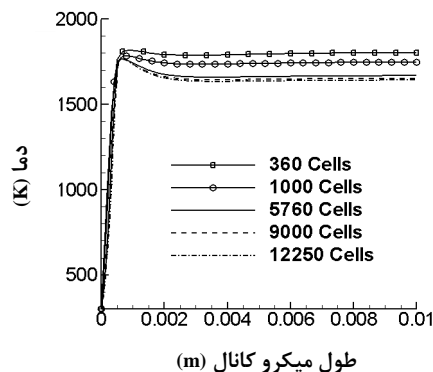
شکل ۳- نمایش هندسه محفظه احتراق میکروکانالی مدل‌سازی شده



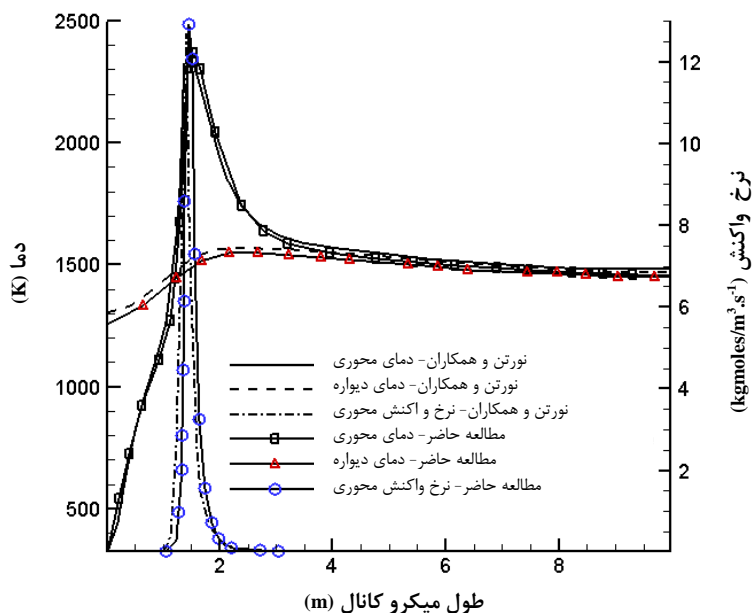
شکل ۴- نمایش هندسه تقارن محوری محفظه احتراق به همراه شبکه تولید شده

در این شبیه‌سازی همچنین معادله انرژی بر روی دیواره‌ها نیز حل شده و نیز برای شبیه‌سازی احتراق در داخل محفظه احتراق، از واکنش یک مرحله‌ای متان- هوا استفاده شده است. معادلات استفاده شده در این کد در ادامه آورده شده‌اند. همگرایی (Convergence) بر اساس باقی‌مانده‌های (Residuals) حل معادلات پیوستگی، انرژی، بقای گونه‌ها و تکانه، به ترتیب برابر 1e-4، 1e-4، 1e-6، 1e-10 در نظر گرفته شده‌اند [۱۵]. شرایط مرزی در ورودی و خروجی میکروکانال به ترتیب سرعت و

فشار هستند. در این مدل پس از مطالعه بر روی تعداد شبکه‌های مورد نیاز برای حل میدان جریان در داخل محفظه احتراق در نهایت از شبکه‌ای با ۹۰۰۰ سلول (شکل (۵)) برای حل جریان در داخل مشعل میکرو (Micro Burner) و از ۱۵۰۰ سلول نیز برای حل معادله انرژی بر روی دیواره (معادله (۵)) استفاده شده است. نتایج به دست آمده از مدلسازی حاضر با استفاده از نتایج ارائه شده در مرجع [۱۲] اعتبارسنجی شده‌اند (شکل (۶)).



شکل ۵- فرآیند مطالعه شبکه‌بندی مناسب میدان



شکل ۶- اعتبارسنجی مطالعه حاضر با نتایج مرجع [۱۲] ( $V_{in} = 0.3 \text{ m/s}$ ;  $K_w = 7.5 \text{ W/m.K}$ )

معادلات حاکم عبارت‌اند از:

معادله پیوستگی:

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

$$\rho = \frac{p_{op}}{R_u T \sum_i \frac{Y_i}{M_{w,i}}}$$

که در اینجا  $v, u, x, y, \rho, p, R_u, T, M_w, Y$  به ترتیب عبارت‌اند از: سرعت در جهت  $y$  (m/s)، سرعت در جهت  $x$  (m/s)، چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )، راستای طولی (m) و راستای عرضی (m)، فشار کارکردی (pa)، ثابت جهانی گاز (KJ/kg.kmol.K)، دما (K)، جرم ملکولی (kg/mol) و کسر جرمی جزء  $i$  ام. معادله تکانه در جهت  $x$ :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \quad (2)$$

که در اینجا  $p$  و  $\tau$  به ترتیب عبارت‌اند از: فشار (pa) و تنش برشی (pa).  $xx$  و  $yy$  نیز شاخص تانسور در راستای  $x$  و  $y$  هستند. معادله تکانه در جهت  $y$ :

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \quad (3)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = - \left[ \frac{\partial(\rho h u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho h v)}{\partial y} \right] + \frac{\partial \left( k_f \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( k_f \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \sum_i \left[ \frac{\partial \left( h_i \rho D_{i,m} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( h_i \rho D_{i,m} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right)}{\partial y} \right] - \sum_i h_i R_i \quad (4)$$

که در اینجا  $h_i, k_f, t, D_{i,m}, T, R_i$  و به ترتیب عبارت‌اند از: آنتالپی ویژه جزء  $i$  ام (J/kg)، زمان (s)، ضریب انتقال گرمای هدایتی سیال (W/m.K)، دما (K)، ضریب نفوذ جرمی ماده  $i$  ام در مخلوط ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) و ثابت گاز جزء  $i$  ام (J/(kg.kmol.K)). معادله انرژی بر روی دیواره:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = k_w \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + h_{out} (T_w - T_\infty) \quad (5)$$

که در اینجا  $h_{out}, T_w, T_\infty$  به ترتیب عبارت‌اند از: ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی سطح خارجی محفظه احتراق میکرو (w/m.K)، دمای دیواره خارجی محفظه احتراق و دمای محیط پیرامونی بر حسب کلوین. معادله بقای گونه‌ها:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} = - \left[ \frac{\partial(\rho Y_i u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho Y_i v)}{\partial y} \right] + \frac{\partial \left( \rho D_{i,m} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( \rho D_{i,m} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right)}{\partial y} + \omega_i \quad (6)$$

که در اینجا  $\omega_i$  عبارت است از نرخ تولید جرم بر واحد حجم. میانگین جرمی گرانیوی (Viscosity):

$$\mu = \sum_{i=1}^N Y_i \mu_i \quad (7)$$

در اینجا  $\mu_i$  عبارت است از گرانیوی دینامیک جزء  $i$  ام ( $\text{N.s/m}^2$ ). میانگین جرمی گرمای ویژه:

$$C_{p,f} = \sum_{i=1}^N Y_i C_{p,i} \quad (8)$$

در اینجا  $C_{p,i}$  عبارت است از ظرفیت گرمایی در فشار ثابت جزء  $i$  ام (J/kg.K). میانگین جرمی رسانش گرمایی:

$$k_f = \sum_{i=1}^N Y_i k_i \quad (9)$$

نحوه محاسبه رسانش گرمایی هر جزء [۱۷]:

$$k_i = \frac{15}{4} \frac{R_u}{M_{w,i}} \mu_i \left[ \frac{4}{15} \frac{C_{p,i} M_{w,i}}{R_u} + \frac{1}{3} \right] \quad (10)$$

نحوه محاسبه ضریب نفوذ دوتایی با استفاده از فرمول چاپمن - انسکوگ (Chapman-Enskog) [۱۸]:

$$D_{ij} = 0.0118 \frac{\left[ T^3 \left( \frac{1}{M_{w,i}} + \frac{1}{M_{w,j}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}{p \sigma_{ij}^2 \Omega_D} \quad (11)$$

در اینجا  $\sigma_{ij}$  و  $\Omega_D$  به ترتیب عبارتند از: طول مشخصه لنارد جونز (Lenard-Jones) برای دو جزء  $i$  و  $j$  و  $\Omega_D$  از جدول ۱۱ استخراج شده است.  $\sigma_{ij}$  و  $\Omega_D$  به ترتیب به واحدهای  $\text{Å}$  و  $\text{Å}^2$  بیان شده اند [۱۲].  
 آنگستروم و مجموع برخوردهای کاهش یافته (Reduced collision integral).  
 نحوه محاسبه گرانیوی هر جزء:

$$\mu_i = 2.67 \times 10^{-6} \frac{[M_w T]^{\frac{1}{2}}}{\sigma_{ij}^2 \Omega_{\mu}} \quad (12)$$

که در اینجا  $\Omega_{\mu}$  عبارت است از مجموع برخوردهای کاهش یافته مشابه.

در ادامه معادله واکنش و نرخ واکنش مورد استفاده در این مدل سازی، به ترتیب در معادلات (۱۳) و (۱۴) بیان شده اند [۱۲]:



معادله یک مرحله‌ای و بازگشت ناپذیر وست بروک - درایر [۱۹]:

$$r_{CH_4} = 2.119 \times 10^{11} \exp\left(\frac{-2.027 \times 10^8}{R_u T}\right) \cdot [CH_4]^{0.2} [O_2]^{0.3} \quad (14)$$

که در اینجا  $r$  برحسب  $\text{kgmol/m}^3 \cdot \text{s}$  و غلظت‌ها بر حسب کیلوگرم مول بر متر مکعب هستند.

با توجه به معادلات بالا، شرایط مرزی شبیه‌سازی عبارتند از:

$$(x \text{ and } y = 0) \rightarrow T = 300 \text{ K}, v = 0, \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \frac{\partial Y_i}{\partial y} = 0$$

$$(y = L) \rightarrow u = 0, v = 0$$

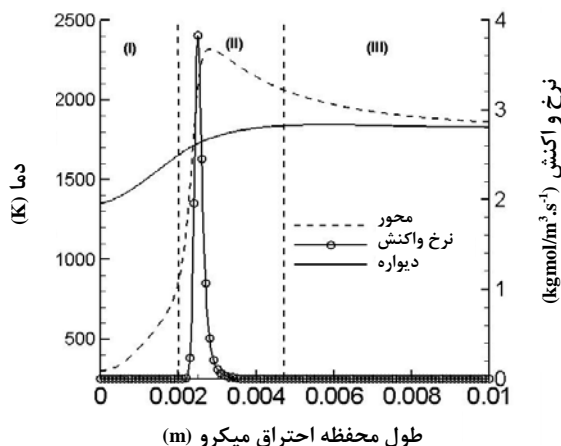
$$(y = L + L_w) \rightarrow q_{wall} = q_{exit}$$

$$(x = 0, 10 \text{ mm and } L < y < L + L_w) \rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

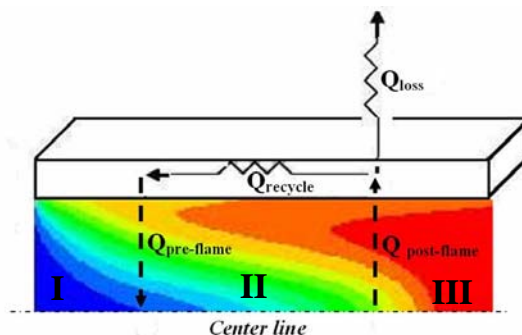
### مشخصات احتراق در یک محفظه احتراق میکرو (میکروکانال)

در این قسمت مشخصات احتراق در محفظه احتراق میکرو با در نظر گرفتن مدلسازی دیواره بررسی خواهد شد. در این راستا، شکل (۷)، توزیع (Profile) دما بر روی خط مرکزی و دیواره و نرخ واکنش را بر روی خط مرکزی میکروکانال نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۷)، سه ناحیه در میکروکانال دیده می‌شود: ۱- ناحیه پیش گرم (I) ۲- ناحیه احتراق (II) ۳- ناحیه بعد از احتراق (III). عرض هر یک از این نواحی بنا به شرایط کاری و ورودی میکروکانال تغییر خواهد کرد. در ناحیه پیش گرم (I) دمای دیواره به دلیل انتقال گرما از پایین دست دیواره محفظه احتراق به قسمت بالادست آن و به تبع آن ناحیه پیش گرم (شکل (۸))، به اندازه کافی از دمای سیال بالاتر است، به طوری که دیواره می‌تواند انرژی خود را به سیال منتقل کند. از طرفی به دلیل بالا بودن ضریب انتقال گرمایی هدایتی دیواره نسبت به سیال این انتقال انرژی بهتر به سیال صورت می‌پذیرد.

این انرژی از ناحیه بعد از احتراق (III)، که دمای گازها به اندازه کافی بالاست و از طریق دیواره به ناحیه (I) منتقل می‌شود. زمانی که سیال به دمای جرقه می‌رسد، مخلوط به سرعت محترق شده و گرما آزاد می‌کند که باعث می‌شود در ناحیه (II) یک منحنی تیز به وجود آید. به دلیل این که انتقال گرمای عرضی داخل سیال، بسیار آهسته‌تر از نرخ رها شدن انرژی است در نتیجه در مرکز سیال می‌توان دمایی تقریباً برابر با دمای شعله بی‌دررو داشت. در ناحیه (III)، بعد از اینکه واکنش دهنده‌ها مصرف شدند واکنش متوقف شده و سیال به دمای دیواره و پایین دست می‌رسد و همچنین دیواره‌ها با اتلاف گرمای بیرونی سرد می‌شوند. در حالت غیر عایق، اگر طول محفظه احتراق زیاد باشد، دمای دیواره و سیال به دمای اتاق می‌رسند. در بعضی از حالت‌ها دمای بیشینه سیال از دمای شعله بی‌دررو شعله متان- هوا برای ورودی 300 K تجاوز می‌کند که این امر به دلیل یک مرحله‌ای بودن شیمی مساله و پیش گرم شدن سیال توسط دیواره رخ می‌دهد [۱۲].



شکل ۷- توزیع دما و نرخ واکنش بر روی خط مرکزی و دیواره محفظه احتراق



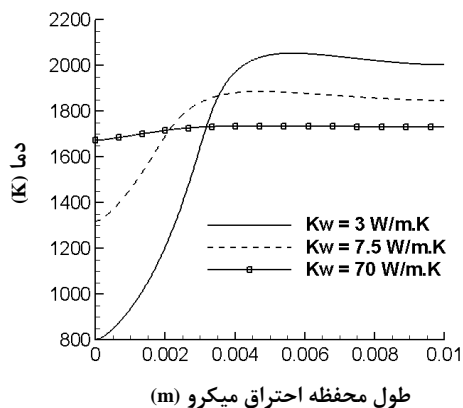
شکل ۸- طرحواره‌ای از نواحی گرمایی و فرآیند چرخش گرما در داخل یک محفظه احتراق کانالی میکرو

### نقش ضریب هدایت گرمایی و اتلاف گرمایی خارجی در پایداری شعله

شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهند که ضریب هدایت گرمایی، نقش اساسی در پایداری شعله در محفظه‌های احتراق میکرو (میکروکانال) بازی می‌کند [۱۲]. با توجه به مطالعات صورت گرفته در این زمینه، دیواره محفظه احتراق میکرو دارای یک نقش دو جانبه و رقابتی در انتقال گرماست. از یک سو، دیواره مسیری را برای انتقال گرما از ناحیه بعد از احتراق (III) به بالا دست، برای پیش گرم کردن سیال مخلوط ورودی فراهم می‌کند [۱۴]، که این کار برای ایجاد جرقه و پایداری شعله لازم است. از طرف دیگر، دیواره شرایطی را فراهم می‌کند که افت گرمایی خارجی ایجاد شود و این امر باعث تاخیر در ایجاد اشتعال و در نهایت منجر به خاموشی شعله در محفظه احتراق می‌شود [۲۰ و ۲۱]. همچنین به دلیل وجود نقاط داغ و دمای بالای دیواره

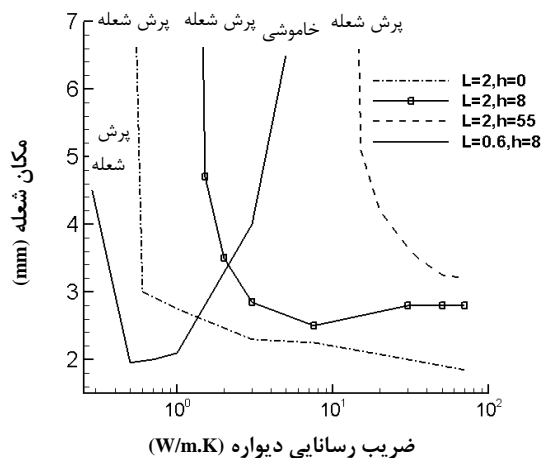


مشکل ذوب شدگی نیز وجود دارد که منجر به انهدام محفظه احتراق می‌شود. ضریب انتقال گرمای دیواره نقش مهمی بر روی توزیع دمایی بر روی دیواره احتراق دارد. شکل (۹) توزیع دمای محوری بر روی دیواره محفظه احتراق را برای مقادیر مختلف ضریب هدایت گرمایی دیواره نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، هنگامی که ضریب انتقال گرمای هدایتی دیواره خیلی پایین باشد، شیب تندی در توزیع دمای محوری در دیواره خارجی دیده می‌شود. همچنین برای دیواره‌ای با ضریب انتقال گرمای هدایتی متوسط، توزیع دمای محوری یکنواختی بیشتری دارد و برای مواد فلزی نیز به دلیل بالابودن ضریب انتقال گرمای هدایتی آن‌ها به صورت یکنواخت است، که این امر موجب تسهیل انتقال گرما از پایین دست محفظه احتراق به بالادست آن شده و همچنین خطر ذوب شدگی دیواره محفظه احتراق را کاهش می‌دهد.



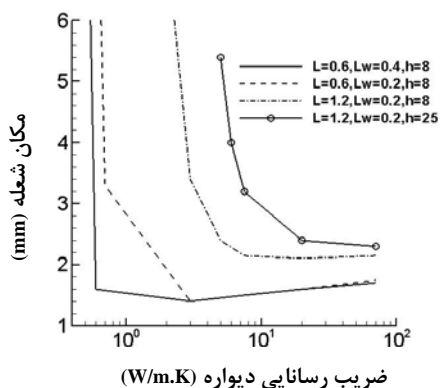
شکل ۹- توزیع دمای دیواره در امتداد طول برای رسانایی‌های مختلف ( $K_w$ : 3, 7.5, 70 W/m.K)  
( $L = 12$  mm;  $V_{in} = 0.5$  m/s;  $h_{out} = 8$  W/m<sup>2</sup>.K)

نکته‌ای که در این قسمت باید بدان اشاره کرد آن است که مکان شعله با استفاده از نقطه‌ای که بیشترین مقدار نرخ واکنش را دارد تعریف شده است. در تمامی حالات، این نقطه در خط مرکزی اتفاق می‌افتد مگر آنکه فاصله صفحات از یکدیگر زیاد باشد که در این حالت محل بیشترین نرخ واکنش به سمت دیواره‌های محفظه احتراق متمایل می‌شود [۱۲]. شکل (۱۰) مکان شعله را بر حسب رسانایی دیواره برای سه ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی خارجی و سرعت مخلوط ورودی ۰/۳ متر بر ثانیه نمایش می‌دهد.

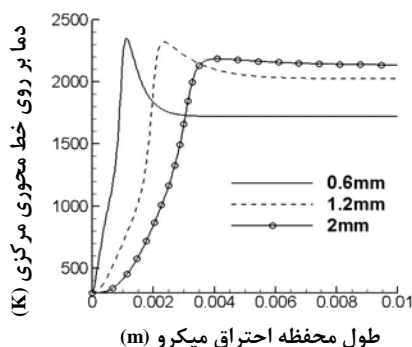


شکل ۱۰- نمودار مکان شعله بر حسب رسانایی دیواره برای سه مقدار ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی خارجی ( $h = h_{out}$ : 0, 8, 55 W/m<sup>2</sup>.K) و دو عرض متفاوت محفظه احتراق ( $L$ : 0.6, 2 mm) در  $V_{in} = 0.3$  m/s

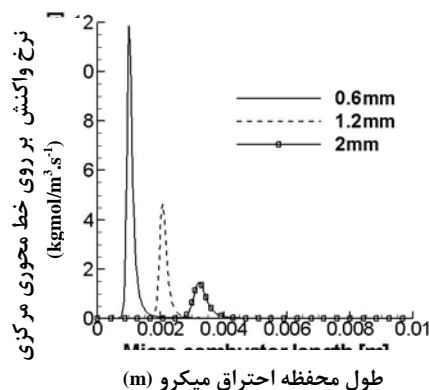
برای ضرایب انتقال گرمای هدایتی پایین دیواره، مکان شعله به طور قابل ملاحظه‌ای به سمت پایین حرکت می‌کند و ممکن است که بلند شدگی شعله رخ دهد. البته این اتفاق به طول میکروکانال و سرعت ورودی مخلوط پیش اختلاط بستگی دارد. برای حالتی که در آن ضریب انتقال گرمایی دیواره پایین است، شار گرمایی گذرنده از میان دیواره به سمت بالادست محدود می‌شود، در نتیجه سیال به میزان کمتری پیش گرم می‌شود که این امر منجر به تعویق ایجاد جرقه در مخلوط پیش اختلاط شده و در انتها شعله به سمت پایین دست محفظه احتراق کشیده می‌شود. بدین ترتیب به هر میزان که ضریب انتقال گرمای هدایتی افزایش می‌یابد، هرچند که محل شعله با توجه به مقدار ضریب هدایت گرمایی دیواره، رفتاری سهموی از خود نشان می‌دهد، فاصله میان مکان تشکیل شعله از محل ورودی به محفظه احتراق با توجه به هندسه محفظه احتراق و متغیرهای انتقال گرمایی، تقریباً به طور پیوسته تا مقدار معینی از ضریب هدایت گرمایی دیواره کاهش یافته و پس از آن افزایش می‌یابد. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که برای انتقال گرما از پایین دست محفظه احتراق به بالادست برای ایجاد جرقه و نیز کاهش میزان اتلاف گرمایی از دیواره محفظه احتراق میکرو، باید از دیواره‌ای با ضریب انتقال گرمای هدایتی متعادل استفاده کنیم. به طوری که برای محفظه احتراقی با ضریب هدایت گرمایی دیواره بالا و اتلاف گرمایی خارجی پایین، ضریب هدایت گرمایی بالا تاثیر کوچکی بر مکان شعله می‌گذارد و این در حالی است که برای سامانه‌ای با اتلاف گرمایی خارجی زیاد، ضریب انتقال گرمایی بالای دیواره، نظیر فلزات، باعث می‌شود که مکان شعله به سمت خروجی محفظه احتراق حرکت کند که در نتیجه باعث خاموشی شعله خواهد شد [۲۳ و ۲۲]. علاوه بر رسانایی دیواره دو عامل ضخامت دیواره ( $L_w$ ) و ارتفاع میکروکانال ( $2L$ ) نیز در پایداری شعله در یک محفظه احتراق میکرو موثرند. شکل (۱۱) اثر ضریب رسانایی دیواره را بر روی مکان شعله برای ارتفاع‌ها و ضخامت‌های مختلف میکروکانال نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های (۱۲) و (۱۳) توزیع دما و نرخ واکنش را در مرکز برای سه ارتفاع مختلف میکروکانال نشان می‌دهند.



شکل ۱۱- نمودار مکان شعله بر حسب رسانایی دیواره برای ( $L_w$ : 0.2, 0.4 mm), ( $L$ : 0.6, 1.2 mm) و ( $h=h_{out}$ : 8, 25  $W/m^2.K$ ) در  $V_{in} = 0.5$  m/s



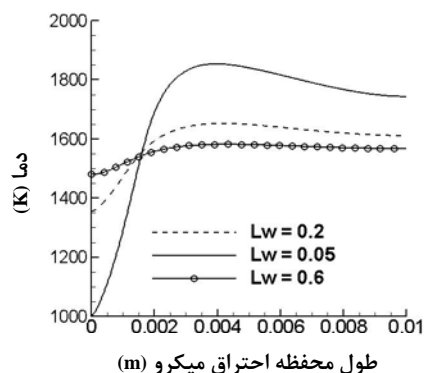
شکل ۱۲- نمودار توزیع دما در مرکز محفظه احتراق برای سه ارتفاع مختلف ( $L$ : 0.6, 1.2, 2 mm) ( $K_w = 7.5$  W/m.K;  $V_{in} = 0.5$  m/s;  $h_{out} = 0$   $W/m^2.K$ )



شکل ۱۳- نمودار توزیع نرخ واکنش در مرکز محفظه احتراق برای سه ارتفاع مختلف (L: 0.6, 1.2, 2 mm)  $(K_w = 7.5 \text{ W/m.K}; V_{in} = 0.5 \text{ m/s}; h_{out} = 0 \text{ W/m}^2.\text{K})$

مکان شعله برای ارتفاع (عرض) ۱/۲ میلی‌متر رفتار متفاوتی نسبت به ارتفاع ۰/۶ میلی‌متر دارد. وقتی که ارتفاع یا به عبارتی عرض محفظه احتراق میکرو افزایش می‌یابد، مقیاس زمانی برای انتقال گرما از ناحیه‌ای که در آن واکنش صورت می‌گیرد، به دیواره‌ها و از دیواره‌های داغ به واکنش دهنده‌های ورودی افزایش می‌یابد و این افزایش مقیاس زمانی به دلیل افزایش ارتفاع میکروکانال است. در نتیجه مکان شعله به سمت پایین دست محفظه احتراق حرکت می‌کند و برای این که این حرکت به سمت بالادست تغییر پیدا کند لازم است که از دیواره‌ای با ضریب رسانایی هدایتی بالاتری استفاده شود. اما از طرف دیگر افزایش ارتفاع میکروکانال باعث افزایش حجم تولید گرما می‌شود (افزایش نسبت حجم به سطح محفظه احتراق) و این امر سبب می‌شود که میکروکانال در مقابل افت گرمایی خارجی مقاومت بیشتری از خود نشان دهد.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد ضخامت دیواره نیز نقش اساسی در پایداری شعله ایفا می‌کند. با نگاه مجدد به شکل (۱۱) درمی‌یابیم که دیواره با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر حتی با کمتر بودن مقدار ضریب رسانایی هدایتی، نسبت به دیواره با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر مقاومت بهتری در مقابل افت گرمای خارجی از خود نشان می‌دهد. از طرفی با توجه به شکل (۱۴) دیده می‌شود که افزایش ضخامت دیواره باعث توزیع بهتر گرما در درون دیواره محفظه احتراق می‌شود. به طور کلی افزایش ضخامت دیواره باعث افزایش انتقال گرما از پایین دست محفظه احتراق به بالادست آن و در نتیجه پایداری بهتر و بیشتر شعله می‌شود.

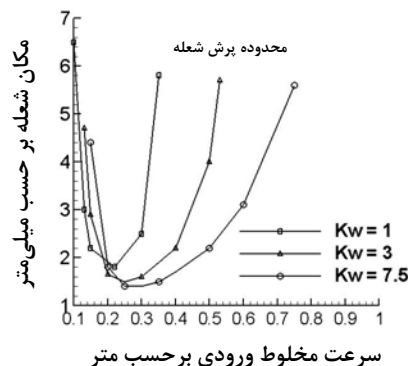


شکل ۱۴- نمودار توزیع دما بر روی دیواره محفظه احتراق برای سه ضخامت مختلف (Lw: 0.05, 0.2, 0.6 mm)  $(L = 2 \text{ mm}; K_w = 7.5 \text{ W/m.K}; V_{in} = 0.2 \text{ m/s}; h_{out} = 8 \text{ W/m}^2.\text{K})$

### اثر سرعت ورودی در پایداری شعله

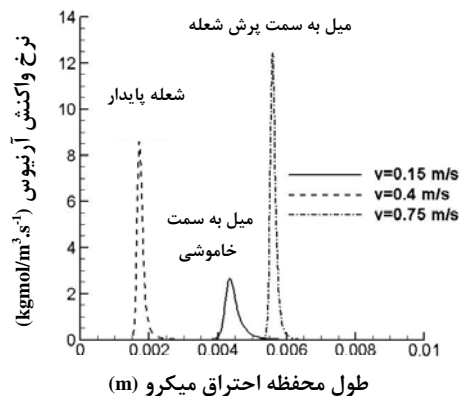
سرعت ورودی نقشی اساسی در تعیین مکان شعله در محفظه‌های احتراق میکرو بازی می‌کند [۲۱، ۲۲، ۲۳ و ۲۴]. شکل (۱۵) مکان شعله را به عنوان تابعی از سرعت برای چند دیواره با ضریب رسانایی متفاوت نشان می‌دهد. برای سرعت های ورودی بالا

مکان شعله به سمت پایین دست حرکت می‌کند [۲۵ و ۲۵]. این افزایش سرعت باعث افزایش نرخ جریان ورودی [۱۴] و کاهش زمان اقامت سیال درون محفظه احتراق میکرو می‌شود. از طرف دیگر برای سرعت‌های پایین، حرکت تند ناحیه واکنش به سمت پایین دست دیده می‌شود که آن نیز به دلیل کاهش نرخ تولید گرما در محفظه احتراق میکرو است. با توجه به افزایش نرخ جریان جرمی، میان افزایش گرمای حجمی آزاد شده و کاهش زمان اقامت سیال در محفظه احتراق میکرو یک نقطه کمینه وجود دارد که شعله در آن نقطه پایدار است. مکان این نقطه به رسانایی دیواره بستگی دارد و در مورد مسئله حاضر بین ۰/۲ تا ۰/۴ متر بر ثانیه است. وجود دیواره با رسانایی بالا باعث می‌شود که گرمای بیشتری از پایین دست به بالادست منتقل شود و در نتیجه شعله پایداری بیشتری در مقابل افزایش سرعت ورودی داشته باشد.



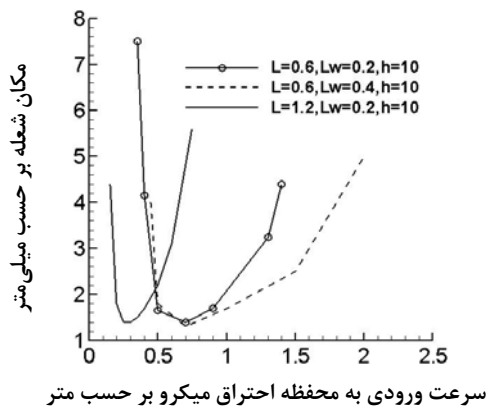
شکل ۱۵- تغییر مکان شعله بر حسب سرعت ورودی برای سه ضریب رسانایی دیواره ( $K_w = 1, 3, 7.5 \text{ W/m.K}$ )  
( $L = 1.2 \text{ mm}$ ;  $h_{out} = 10 \text{ W/m}^2.K$ )

شکل (۱۶) توزیع نرخ واکنش در مرکز را برای سه سرعت متفاوت نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود هنگامی که سرعت ورودی بسیار زیاد و یا بسیار کم باشد مکان شعله به دلایلی که در بالا به آن اشاره شد به سمت پایین دست حرکت می‌کند ولی اگر سرعت ورودی متعادل داشته باشد مکان شعله در حالت کمینه قرار می‌گیرد و شعله پایداری به وجود می‌آید. نکته‌ای که در این قسمت باید بدان اشاره شود آن است که هنگامی که سرعت ورودی زیاد است شعله به سمت پرش پیش می‌رود [۲۴] و شاخصه پرش شعله خروج گازهای داغ از میکروکانال است. اما هنگامی که سرعت ورودی کم است شعله به سمت خاموشی می‌رود و شاخصه این پدیده توزیع نرخ واکنش در درون میکروکانال است [۱۲]. همان‌گونه که رسانایی دیواره میکروکانال در هنگامی که سرعت ورودی افزایش می‌یابد در پایداری شعله اثر دارد، دو متغیر ارتفاع میکروکانال و ضخامت دیواره نیز در پایداری شعله تاثیر گذارند.



شکل ۱۶- نمایش توزیع نرخ واکنش در مرکز محفظه احتراق در سه سرعت مختلف ( $v_{in} = 0.15, 0.4, 0.75 \text{ m/s}$ )  
( $L = 1.2 \text{ mm}$ ;  $K_w = 7.5 \text{ W/m.K}$ ;  $h_{out} = 10 \text{ W/m}^2.K$ )

همان‌طور که در شکل (۱۷) نشان داده شده است هنگامی که ارتفاع میکروکانال کاهش و ضخامت دیواره آن افزایش می‌یابد میکروکانال در مقابل افزایش سرعت بهتر عمل کرده و شعله در آن پایدارتر است. این پایداری به دلیل کاهش زمان نفوذ انرژی بین دیواره‌های داغ و سیال و همچنین افزایش سطح انتقال گرماست. هنگامی که ارتفاع میکروکانال افزایش می‌یابد این زمان افزایش پیدا می‌کند و شعله در سرعت کمتری دچار پرش می‌شود (سرعت پرش شعله از ۱/۴ به ۰/۷ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد). اما هنگامی که ضخامت دیواره افزایش می‌یابد به دلیل افزایش سطح انتقال گرمای خارجی (عرضی) محفظه احتراق میکرو با فرض ثابت بودن قطر داخلی محفظه احتراق، انتقال بهتر و بیشتر گرما صورت گرفته و سیال ورودی بهتر پیش گرم می‌شود. در نتیجه شعله پایدارتر شده و سرعت پرش شعله از ۱/۴ به ۲/۱ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد.



شکل ۱۷- تغییرات مکان شعله بر حسب سرعت ورودی ( $L: 0.6, 1.2 \text{ mm}; L_w: 0.2, 0.4 \text{ mm}; h_{\text{out}}: 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}; K_n: 7.5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ )

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه، متغیرهای موثر بر ایجاد و پایداری احتراق مخلوط پیش اختلاط متان- هوا در یک محفظه احتراق دوبعدی در قالب شبیه‌سازی عددی مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار گرفته‌اند. در این بررسی اثرات پیش‌گرمایش غیر مستقیم مخلوط پیش اختلاط ورودی توسط دیواره‌های محفظه احتراق میکرو، سرعت ورودی مواد واکنش دهنده، ضخامت دیواره محفظه احتراق، ضریب رسانایی گرمایی هدایتی دیواره محفظه احتراق و ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی دیواره خارجی محفظه احتراق میکرو بر توزیع دما و محل شعله در داخل یک محفظه احتراق میکرو دو بعدی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه تمرکز بیشتر بر روی اثر دیواره محفظه احتراق در پایداری و مشخصات شعله است و متغیرهای دیگر مانند تغییر میزان نسبت هم‌ارزی و یا افزایش تعداد واکنش‌های شیمیایی و ... بررسی نشده‌اند. در مجموع نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان می‌دهند که پایداری شعله در یک محفظه احتراق میکرو به مقدار زیادی به مقادیر ضخامت و ضریب رسانایی گرمایی دیواره، عرض محفظه احتراق، ضریب انتقال گرمای رسانایی جابه‌جایی دیواره بیرونی محفظه احتراق و سرعت ورودی مواد واکنش دهنده پیش مخلوط وابسته است. به طوری که افزایش ضخامت دیواره و ضریب رسانایی گرمایی دیواره به دلیل ایجاد تسهیل در مسیر انتقال گرما از ناحیه پس شعله به ناحیه پیش‌گرم، موجب بهبود شرایط احتراق در داخل محفظه احتراق می‌شوند. البته تاثیر مثبت این تغییرات با توجه به کاربرد محفظه احتراق میکرو متغیر خواهد بود به طوری که در محفظه‌های احتراق میکرو ترموفوتوولتائیک به دلیل نیاز به کاهش گرادیان دمایی بین محفظه احتراق و سطوح خارجی محفظه و همچنین جلوگیری از خنک شدن سریع دیواره به دلیل انتقال گرمای جابه‌جایی بین دیواره خارجی محفظه و محیط اطراف، افزایش بیش از حد ضخامت دیواره محفظه احتراق و ضریب رسانایی گرمایی دیواره محفظه احتراق مطلوب نیست. از سوی دیگر افزایش عرض محفظه احتراق و ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی بین دیواره خارجی محفظه احتراق و محیط اطراف سبب کاهش و تضعیف پایداری احتراق در داخل یک محفظه احتراق میکرو می‌شوند.

## منابع

1. Waitz, I. A., Gauba, G., and Tzeng, Y. S., "Combustors for Micro-Gas Turbine Engines," *Journal of Fluids Engineering*, 120, pp. 109-117, 1998.
2. Chuan chia, L., and Feng, B., "The Development of a Micro Power (Micro-Thermo Photovoltaic) Device," *Journal of Power Sources*, 165, pp. 455-480, 2007.
3. Norton, D. G., and Vlachos, D. G., "A CFD Study of Propane/Air Micro Flame Stability," *Combustion and Flame*, 138, pp. 97-107, 2004.
4. Pan, J. F., Huang, J., Li, D. T., Yang, W. M., Tang, W. X., and Xue, H., "Effects of Major Parameters on Micro-Combustion for Thermo Photovoltaic Energy Conversion," *Journal of Applied Thermal Engineering*, 27, pp. 1089-1095, 2007.
5. Kamali, R., Binesh, A. R., and Hossainpour, S., "Numerical Simulation of Wall Treatment Effects on the Micro-Scale Combustion," *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 26, pp. 444-451, December, 2007.
6. Leach, T. T., and Cadou, C. P., "The Role of Structural Heat Exchange and Heat Loss in the Design of Efficient Silicon Micro-Combustors," *Proceedings of the Combustion Institute*, 30, pp. 2437-2444, 2005.
7. Kim, K. T., Lee, D. H., and Kwon, S., "Effects of Thermal and Chemical Surface-Flame Interaction on Flame Quenching," *Combustion and Flame*, 146, pp.19-28, 2006.
8. Kim, N. I., and Maruta, K., "A Numerical Study on Propagation of Premixed Flames in Small Tubes," *Combustion and Flame*, 146, pp. 283-301, 2006.
9. Hua, J., Wu, M., and Kumar, K., "Numerical Simulation of the Combustion of Hydrogen-Air Mixture in Micro-Scale Chambers. Part I: Fundamental study," *Journal of Chemical Engineering Science*, 60, pp. 3497-3506, 2005.
10. Li, Z. W., Chou, S. K., Shu, C., Xue, H., and Yang, W. M., "Characteristics of Premixed Flame in Micro Combustors with Different Diameters," *Journal of Applied Thermal Engineering*, 25, pp. 271-281, 2005.
11. Junwei, L., and Beijing, Z., "Experimental Investigation on Heat Loss and Combustion in Methane/Oxygen Micro-Tube Combustor," *Journal of Applied Thermal Engineering*, 27, Issue 7, pp. 707-716, 2008.
12. Norton, D. G., and Vlachos, D. G., "Combustion Characteristics and Flame Stability at the Micro Scale: a CFD Study of Premixed Methane/Air Mixtures," *Chemical Engineering Science*, 58, pp. 4871-4882, 2003.
13. Yang, W. M., Chou, S. K., Shu, C., Li, Z. W., and Xue, H., "Experimental Study of Micro-Thermo Photovoltaic Systems with Different Combustor Configurations," *Journal of Energy Conversion and Management*, 48, pp. 1238-1244, 2007.
14. Li, J., Chou, S. K., Huang, G., Yang, W. M., and Li, Z. W., "Study on Premixed Combustion in Cylindrical Micro Combustors: Transient Flame Behavior and Wall Heat Flux," *Journal of Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, pp. 764-773, 2009.
15. Li, J., Chou, S. K., Yang, W. M., and Li, Z. W., "A Numerical Study on Premixed Micro Combustion of CH<sub>4</sub>-Air Mixture: Effects of Combustor Size, Geometry and Boundary Conditions on Flame Temperature," *Chemical Engineering Journal*, 150, pp. 213-222, 2008.
16. Cao, H. L., and Xu, J. L., "Thermal Performance of a Micro-Combustor for Micro-Gas Turbine System," *Journal of Energy Conversion and Management*, 48, pp. 1569-1578, 2007.
17. Borman, G. L., and Ragland, K. W., *Combustion Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1998.
18. McGee, H. A., *Molecular Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1991.
19. Westbrook, C. K., and Dryer, F. L., "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames," *Combustion Science and Technology*, 48, pp. 31-43, 1981.
20. Raimondeau, S., Norton, D. G., Vlachos, D. G., and Masel, R. I., "Modeling of High-Temperature Microburners," *Proceedings of the Combustion Institute*, 29, pp. 901-907, 2002.
21. Kaisare, N. S., and Vlachos, D. G., "Optimal Reactor Dimensions for Homogeneous Combustion in Small Channels," *Journal of Catalysis Today*, 120, pp. 96-106, 2007.
22. Yang, W. M., Chou, S. K., Shu, C., Xue, H., Li, Z. W., Li, D. T., and Pan, J. F., "Microscale Combustion Research for Application to Micro Thermo Photovoltaic Systems," *Energy Conversion and Management*, 44, pp. 2625-2634, 2003.
23. Kaisare, N. S., and Vlachos, D. G., "Extending the Region of Stable Homogeneous Micro-Combustion Through Forced Unsteady Operation," *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, pp. 3293-3300, 2007.
24. Yang, W. M., Chou, S. K., Shu, C., Xue, H., and Li, Z. W., "Effect of Wall Thickness of Micro-Combustor on the Performance of Micro-Thermo Photovoltaic Power Generators," *Journal of Sensors and Actuators A*, 119, pp. 441-445, 2005.
25. Yang, W. M., Chou, S. K., Shu, C., Li, Z. W., and Xue, H., "Combustion in Micro-Cylindrical Combustors with and without a Backward Facing Step," *Journal of Applied Thermal Engineering*, 22, pp. 1777-1787, 2002.

English Abstract

## Numerical Simulation of the Effective Parameters on the Stability of Stoichiometric CH<sub>4</sub>/Air Premixed Combustion in a Micro-combustion Chamber

J. Zarvandi, S. Tabejamaat and M. R. Baig Mohammadi  
Aerospace Engineering Department, Amirkabir University of Technology

*In the present study, numerical modeling of the combustion of a fully laminar stoichiometric premixed reactive flow of methane-air inside a 2D micro-combustion chamber was investigated. The aim of this study is the investigation of occurrence, phenomenology and effective parameters such as flame stability on combustion process in MEMS devices for energy or propulsion generation on small scales for space exploration applications. The results show that flame stability in a micro-combustion chamber strongly depends on the combustion chamber wall thickness  $L_w$ , the combustion chamber wall thermal conductivity coefficient  $K_w$ , the combustion chamber width  $L$ , the outer wall convective heat transfer coefficient  $h_{out}$  and reactive mixture velocity  $V_{in}$ .*

**Keywords:** Micro-combustion chamber, Premixed, Methane, Air, Flame stability