مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
۲۵ و ۲۴بهمن ماه ۱۳۹۶، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف
FCCI-2018-1118

مدل‌سازی عددی تاثیرات ضخامت دیواره بر تولید توان الکتریکی در میکرومحفظه احتراقی با مخلوط متان-هوا

سید ابوذر فنایی
استادیار مهندسی مکانیک- دانشگاه بیرجند
sab.famech@birjand.ac.ir

جواد رجبی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک – دانشگاه بیرجند
Javadrajabimourkani70@birjand.ac.ir

چکیده

در این کار تاثیر شرط مرزی دیواره ضخامت دار در مدل عددی دوبعدی برای احتراق متان – هوا درون میکروکانال برای جریان احتراقی و نیز اکان تولید توان الکتریکی به کمک توزیع دما روی سطح ترموالکتریک بررسی شده است. به کمک حل این مسئله می‌توان مدل فیزیکی سیال با جامد را به صورت کوپل حل کرده و مدل‌سازی پارامتریک چند فیزیکه برای فرایند احتراق متان- هوا انجام می‌شود. این مدل‌سازی امکان واقعی‌تر بررسی ضخامت دیواره میکروکانال را با بررسی اثر ضخامت دیواره بر توزیع دمای ان و نیز تاثیر افت جابه جایی از روی آن به محیط ایجاد می‌کند. نتایج حاصل از این مدل‌سازی برای احتراق پیش امیخته متان – هوا درحالت دو بعدی همراه با شرایط مرزی جریان تراکم پذیر بودن، حالت پایا ، شرط عدم لغزش در دیواره برای یک میکرو کانال نشان می دهد که با افزایش ضخامت دیواره برای حالت شرط مرزی جابجایی، دما در دیواره کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش سرعت، دما در دیواره میکروکانال، کاهش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش ضخامت دیواره، در اثراختلاف دمای ایجاد شده در دیواره میکرو کانال، میزان ولتاژ تولید شده از سیستم ترموالکتریک افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش سرعت، میزان ولتاژ تولید شده از سیستم ترموالکتریک کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی عددی، احتراق، میکروکانال، مخلوط متان – هوا.

مقدمه

امروزه تمایل روزافزونی برای کوچک سازی صنایع در تعدادی از فناوری ها از قبیل صنایع هوایی،علوم پزشکی و صنایع فرآیندهای شیمیایی وجود دارد. هم‌چنین سیستم های تولید قدرت بسیار کوچک،محفظه های ابعاد میلی متر، با توجه به کارایی و چگالی انرژی بسیار بالای آن ها به عنوان جایگزین باتری ها توسعه داده شده اند. وسایل کوچک‌تر به دلیل کنترل راحت‌تر،اندازه گیری های دقیق تر و قابلیت تغییر بیشتر نسبت به نمونه های با اندازه های موجود مناسب تر می باشند.البته کاربرد این وسایل نیازمند تجهیزات پیشرفته تر در زمینه کارآیی، وزن و قابل اعتماد هست.به طور معمول مشابه با [۱] مقیاس طول مشخصه برای ریز محفظه ها از مرتبه ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر یا کمتر می‌باشد. هم‌چنین مشابه با [۲ و۳] فرآیند در ابعاد کوچک شامل داشتن قطر داخلی استوانه یا اندازه شکاف بین صفحات موازی از مرتبه ۱۰۰۰ میکرومتر یا کمتر می باشد.محفظه های کوچک مطابق با [۴] اولین بار برای کوره های کوچک احتراق ذرات ارگانیک در سال ۱۹۲۷به کار گرفته شده است.اما تا هنگامی که پیشرفت قابل توجهی در زمینه وسایل کوچک شده صورت نگرفت، فناوری ریز محفظه های احتراقی ظهور پیدا نکرد.در واقع مطالعات اولیه انجام شده در زمینه کاربرد این محفظه ها در آمریکا در سال ۱۹۹۵ برای استفاده در وسایل ارتباطی نظامی انجام شد.در این وسایل ریز محفظه هایی با سوخت‌های فسیلی به عنوان جایگزین باتری ها شناخته شدند. دو نمونه از کاربردهای مهم نظامی دیگر این ابزار در ساخت مشعل های کوچک در ابزار مختلف نظامی و نیز میکرو بمب ها[۵] می باشد. همزمان با این پیشرفت ها به تدریج ریز محفظه ها در زمینه های غیر نظامی نیز به کار برده شدند.در واقع،مهم‌ترین کارکردهای این ابزار پس از توسعه سیستم های مورد نیاز برای تبدیل انرژی به دست آمدند.دو مورد از این تجهیزات،فناوری الکترواسپری[۶] و محفظه های کاتالیزی مختلف برای کاربردهای انرژی [۷] هستند که با هدف کوپل کردن ریز محفظه های احتراقی با سایر تجهیزات انرژی مطالعه شدند.به طور کلی مدل سازی و حل نمونه های مختلف مربوط به مسائل حاکم در یک ریز محفظه وابسته به ساختارها،شرایط فیزیکی و محیطی یا حالات آزمایشگاهی و کاربرد مورد نظر می تواند از طریق روش های مختلفی انجام گیرد.مدل های اساسی و ساده مربوط به بررسی انتقال حرارت این محفظه ها با هدف تعیین وضعیت پروفیل دمای درون آن به ترتیب در [۸] به کمک حل عددی حجم کنترل یک بعدی و در [۹] به روش تحلیلی و با توسعه یک مدل ساده یک بعدی در ریز محفظه استوانه ای انجام شده است.در [۹] مکانیزم یک واکنشی برای سه مخلوط هیدروژن- هوا و پروپان-هوا برای مقایسه تفاوت سینتیکی این سه نوع مخلوط بررسی شده است. هر دو مدل موجود در [۸] و [۹] متشکل از محفظه ای به شعاع داخلی و شعاع خارجی مشخص بوده و فرض می شود جریان واکنشی و شعاع خارجی مشخص بوده و

فرض می شود جریان واکنشی با سرعت و دمای یکنواخت وارد محفظه شده و قسمتی از گرما به محیط اتلاف می شود. با کاهش سریع ذخایر منابع انرژی‌فسیلی، نیاز فوری به افزایش راندمان سیستم‌های مربوط به آن‌ها به وجود آمده است. یکی از موارد مهم برای ایجاد راندمان مطلوب در این نوع از سیستم‌ها استفاده از دستگاه‌های ترموفتوولتاییک است. این دستگاه‌ها انرژی خارج‌شده از محفظه احتراق و یا گرمای به وجود آمده از منابع انرژی دیگر را برای تولید برق استفاده می‌کنند.تولید برق به کمک تابش حرارتی از دیواره‌های گرم به سطح سلول فتوولتاییک ایجاد می‌شود[۱۰]. جاکوبسن و اپستین به بررسی سیستم‌های میکرو طراحی‌شده برای-تولیدبرق ویاکارمکانیکی پرداختند و ابراز داشتند که این زمینه می‌تواند به طور موثر برای بهبود کارآیی سیستم‌های حرارتی موجود مورد توجه قرار گیرد[۱۱]. در نوع دیگر این سیستم‌ها از محفظه احتراق به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای سیستم ترموفتوولتاییک استفاده می‌شود..برای دریافت توان الکتریکی خروجی بالا، توزیع دمای یکنواخت روی دیواره‌های جامد در تماس با جریان واکنشی مورد نیاز است. با این حال ایجاد احتراق در ابعاد کوچک باعث خواهد شد تا افزایش تلفات حرارتی به دلیل نسبت سطح به حجم بالا که تمایل به فرو نشاندن واکنش دارد آن را تحت تأثیر قرار دهد[۱۲]. احمد و همکاران به بررسی محدوده پایداری شعله هیدروژن درمحفظه‌های احتراقی درمقیاس میلیمتری که به‌صورت کانال مستطیلی شکل هستند، پرداختند. نتایج این کار نشان داد که طول و عرض محفظه احتراق از پارامترهای مهم برای پایداری یا ثبات احتراق بوده که عرض محفظه نسبت به طول اهمیت بیشتری دارد[۱۳]. فنایی و ابوالفضلی‌اصفهانی دریک روش تحلیلی یک بعدی به بررسی انتقال‌حرارت جریان غیر واکنشی‌هیدروژن- هوا دریک‌کانال‌کوچک پرداختند. دراین-مدل،یک‌کانال ساده درمقیاس میکرو که متشکل ازدو صفحه - موازی‌که درآن‌سوخت پیش‌مخلوط شده وهوا واردکانال می‌شود، درنظرگرفته شده است.نتایج حاصل از این کار نشان داد که در طول یک محفظه کوچک با جریان غیر واکنشی،درجه حرارت بی بعد افزایش می یابد درحالی‌که عدد پکلت کاهش می یابد[۱۴] . درپژوهش دیگر فنایی و همکاران یک مدل‌انتقال‌حرارت یک بعدی تحلیلی درمیکروکانال مستطیلی ارائه داده‌اند. در این مدل، یک‌کانال-ساده درمقیاس میکرو تشکیل شده ازدوصفحه موازی در نظر گرفته شده که سوخت و هوای پیش‌مخلوط شده واردکانال می‌شوند. نتایج این کار نشان می‌دهد که کوچک‌شدن محفظه می‌تواند روی عدم پایداری شعله موجود در محفظه تأثیر داشته باشد[۱۵]. برای تکمیل‌کردن این کار فنایی و همکاران یک مدل دوبعدی برای انتقال حرارت ناشی از جریان واکنشی داخل کانال بادرجه حرارت دیواره ثابت را با تحلیل جرم و حرارت ارائه داده‌اند که نتایج این کار نشان‌دهنده تأثیر بالای نسبت سطح به حجم بر خاموش‌سازی شعله درون یک محفظه بسته است[۱۶ و ۱۷] . در کارهای مرور شده بررسی همزمان جرم، حرارت و حل سیالی با در نظرگرفتن شار حرارتی جابجایی در مرز به صورت واقعی مورد بررسی قرار نگرفته‌اند که نرم افزار کامسول به دلیل چند فیزیکه بودن قابلیت بررسی تاثیرات ذکر شده را دارد و بنابراین هدف این کار این است که به بررسی اثر ضخامت دیواره با تاثیر افت جابه جایی از روی آن به محیط بیرون، تاثیر ضخامت دیواره میکرو کانال برای حالت شرط مرزی جابجایی بر توزیع دما در دیواره، هم‌چنین تاثیر سرعت‌های ورودی مختلف بر توزیع دما در دیواره، و دیگر اینکه تاثیر ضخامت دیواره میکرو کانال، بر میزان ولتاژ تولید شده در اثراختلاف دمای ایجاد شده در دیواره برای سیستم ترموالکتریک و هم‌چنین تاثیرسرعت‌های مختلف، بر میزان ولتاژ تولید شده از سیستم ترموالکتریک پرداخته شود.

معادلات حاکم

واکنش احتراق متان – هوا شامل انتقال حرارت و جریان سیال برای مخلوط هو او سوخت ورودی و مصرف جرم مخلوط می باشد. بنابراین معادلات اصلی حاکم بر این مسئله با در نظرگرفتن فرضیاتی شامل حالت پایا ، جریان تراکم پذیر، جریان مخلوط ورودی ارام ، شرط عدم لغزش در دیواره‌ها، دمای ورودی ثابت مخلوط، سرعت ورودی ثابت مخلوط و انتقال حرارت جابجایی در مرز محفظه بدست امده است.

$$\nabla.(\rho u) = 0 \qquad (۱)$$

$$\rho(u.\nabla)u = \nabla[-PI + \mu\nabla u - \frac{2}{3}\mu(\nabla u)\,\mathrm{I}] + \mathrm{F} \qquad (۲)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p (u.\nabla T) = \nabla.(K\nabla T) + Q \qquad (۳)$$

$$\nabla.(-D_i\nabla C_i) + (u.\nabla C_i) = R_i \qquad (۴)$$

همچنین معادله محاسبه ولتاژ ترموالکتریک به صورت زیر می‌باشد:

$$V = \frac{\int_0^L \alpha(T(x) - T_\infty)dx}{L} \quad (5)$$

برای احتراق متان – هوا از رابطه احتراق ارنیوسی که در زیر امده است، استفاده شده است:

$$k^f = A^f (T/T_{ref})^{n^f} \exp(-E^f / R_g T) \quad (۶)$$

واکنش تک مرحله ای (سینتیک شیمیایی) احتراق متان – هوا به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$CH_4 + 2(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7.52N_2 \quad (۷)$$

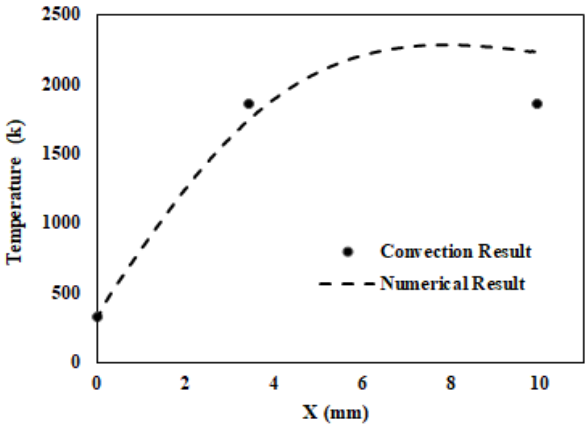
در رابطه (6) مقادیر برای احتراق متان – هوا به صورت زیر محاسبه شده اند:

$$A^f = 1.32 * 10^8 (m^6 / mol^2\, s) \quad (۸)$$

$$E^f = 2.57 * 10^5 (j/mol) \quad (۹)$$

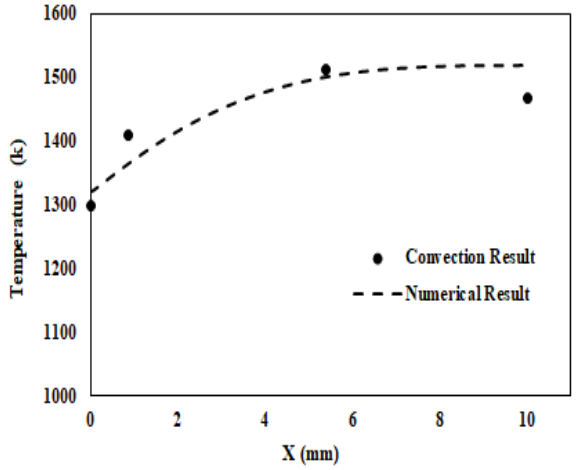
نتایج و بحث

درشکل(۱) مقایسه نتایج عددی با نتایج شرط مرزی شارحرارتی جابجایی برای تغییرات دمای مرکز میکرو کانال تحت تاثیر جریان احتراقی درقطر هیدرولیکی 0/6 میلی مترگزارش شده است. همان طور که در این شکل دیده می-شود، مدل توافق قابل قبولی با میزان خطای بسیار پایین، با داده های گزارش شده در [۱۷] دارد.



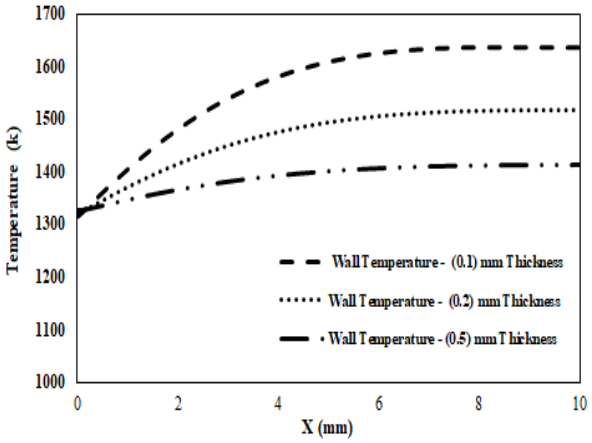
شکل۱: مقایسه نتایج عددی با شرط مرزی شار حرارتی جابجایی در جریان احتراقی گزارش در [۱۷] درقطر هیدرولیکی ۰/۶میلی متر با خطای بسیار پایین

درشکل(۲) مقایسه نتایج عددی با نتایج شرط مرزی شار حرارتی جابجایی برای تغییرات دمای دیواره میکرو کانال تحت تاثیر جریان احتراقی در ضخامت ۰/۲ میلی متر گزارش شده است.همان طور که در این شکل دیده می‌شود، مدل توافق قابل قبولی با میزان خطای بسیار پایین، با داده های گزارش شده در [۱۷] دارد.



شکل2: مقایسه نتایج عددی با شرط مرزی جابجایی در جریان احتراقی گزارش در [۱۷] درقطر هیدرولیکی ۰/۶میلی متر با خطای بسیار پایین

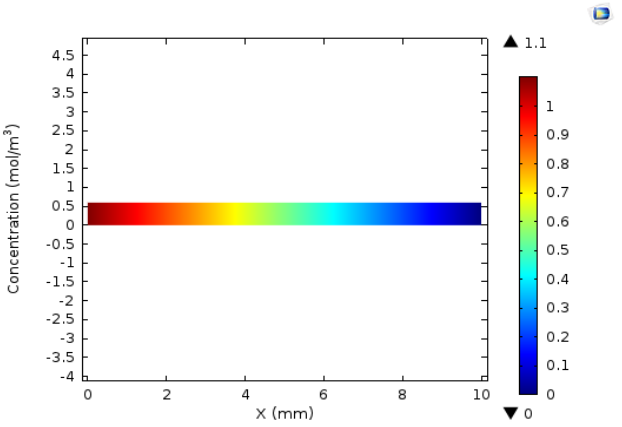
در شکل (۳) تاثیر ضخامت‌های مختلف دیواره بر دمای دیواره میکرو کانال برای حالت شرط مرزی شار حرارتی جابجایی نشان داده شده است.همانطور که در این شکل مشاهده می-شود با افزایش ضخامت دیواره میکرو کانال، دما در دیواره کاهش می‌یابد.



شکل ۳ : نتایج تاثیر ضخامت‌های مختلف دیواره میکروکانال بر دمای دیواره برای حالت شارحرارتی جابجایی

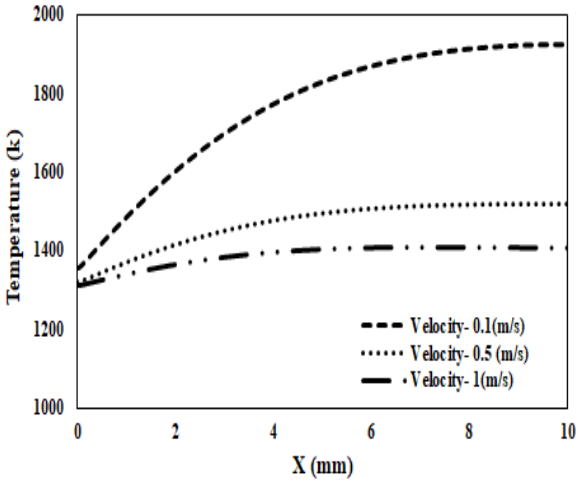
در شکل (۴) کانتورتغییرات غلظت برحسب طول میکرو کانال توسط مدل‌سازی عددی انجام شده نشان داده شده است.در شکل (۴) مشاهده می شود که در نتیجه فرایند احتراق،

غلظت مخلوط متان – هوا در جهت کاهش پیش رفته است تا اینکه درنهایت مقدار ان به صفر می‌رسد.



شکل۴ : نمایش تغییرات غلظت فرایند احتراق در مدل‌سازی عددی

در شکل (۵) نتایج تاثیر سرعت های مختلف بر توزیع دما در دیواره میکرو کانال برای حالت شارحرارتی جابجایی نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش سرعت، دما در دیواره کاهش می‌یابد.



شکل۵ : نتایج تاثیر سرعت های مختلف بر توزیع دما در دیواره میکرو محفظه برای حالت شارحرارتی جابجایی

در جدول(۱) مقایسه نتایج ولتاژ تولیدی بر حسب ضخامت-های مختلف دیواره میکرو کانال برای کاربرد در سیستم ترموالکتریک در حالت شار حرارتی جابجایی نشان داده شده است.همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت دیواره ، میزان ولتاژ تولید شده از سیستم ترموالکتریک افزایش می‌یابد.

ولتاژ تولید شده Voltage (µv)	ضخامت دیواره L_{wall} (mm)
444110/3	۰/۱
447652/6	۰/۲
۴۵۰۴۴۰/۶	۰/۵

جدول(۱): مقایسه نتایج ولتاژ تولیدی بر حسب ضخامت‌های مختلف دیواره میکرو کانال برای کاربرد در سیستم ترموالکتریک

در جدول(۲) مقایسه نتایج ولتاژ تولیدی بر حسب سرعت های مختلف برای کاربرد در سیستم ترموالکتریک در حالت شار حرارتی جابجایی نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود با افزایش سرعت، میزان ولتاژ تولید شده از سیستم ترموالکتریک کاهش می‌یابد

ولتاژ تولید شده Voltage (µv)	سرعت (متر بر ثانیه)
459523/6161	۰/۱
447130/4048	۰/۵
443686/7529	۱

جدول(۲): مقایسه نتایج ولتاژ تولیدی بر حسب سرعت‌های مختلف برای کاربرد در سیستم ترموالکتریک

نتیجه‌گیری

در این کار تاثیرات شرایط مرزی دیواره ضخامت دار در مدل عددی دو بعدی درون میکرو کانال برای جریان احتراقی بررسی شده است. مهم‌ترین نتایج این کار بصورت زیر خلاصه می شوند:

- با مقایسه نتایج عددی با حالت شرط مرزی شار حرارتی جابجایی مشاهده می‌شود، برای تغییرات دمای مرکز میکرو کانال تحت تاثیر جریان احتراقی، مطابقت قابل قبولی بین مدل و حالت شرط مرزی جابجایی وجود دارد.
- با مقایسه نتایج عددی با حالت شرط مرزی شار حرارتی جابجایی مشاهده می‌شود، برای تغییرات دما در دیواره

میکرو کانال تحت تاثیر جریان احتراقی، مطابقت قابل قبولی بین مدل و حالت شرط مرزی جابجایی وجود دارد.

- با افزایش ضخامت دیواره میکرو کانال، دما در دیواره کاهش می‌یابد.
- با افزایش سرعت، دما در دیواره میکرو کانال، کاهش می‌یابد.
- با افزایش ضخامت دیواره میکروکانال ، در اثر اختلاف دمای ایجاد شده، میزان ولتاژ تولید شده از سیستم ترموالکتریک افزایش می‌یابد.
- با افزایش سرعت، میزان ولتاژ تولید شده از سیستم ترموالکتریک، کاهش می‌یابد.

فهرست علائم

فشار، pa	P
سرعت، m/s	u
نیروی حجمی، N/m^3	F
دما، k	T
ضریب هدایت حرارتی، w/m.k	K
نرخ واکنش، $mol/m^3.s$	R_i
غلظت گونه، mol/m^3	C_i
نفوذ گونه، m^2/s	D_i
شارحرارتی، w/m^2	Q
گرمای ویژه در فشار ثابت، J/kgK	C_p
ضریب انتقال حرارت جابجایی، w/m^2 k	h

"فهرست علائم یونانی"

چگالی، kg/m^3	ρ
ضریب لزجت دینامیکی، pa.s	μ

مراجع

1-Kaisare, N.S.,Valchos, D.G.,2012."A review on micro-combustion:fundamentals, device and applications".*Progress in Energy and Combustion Science,*38, 321-359.

2- Swarup, Y.J., Debi, P.M., 2009, "A review of recentpatentsonmicrocombustionand applications".*Recent Patentson Engineering,*3, 194-209.

3- Veeraragavan, A.,2006."Heat transfer analysis forimprovedin-Situinfraredtemperature diagnostics in microcombustors".Masterof science thesis,University of Maryland.

4-Kemmerer,G., Hallett, L.T.,1927."An improved method of organic microcumbustion". *Industrial and Engineering Chemistry,* 19, 173-176.

5- Aguilar,A.R.,2002. "An isoperibol micro-bomb combustion calorimeter fo measurement of the enthalpy of combustion: Appliction to the study offullereneC60".journalofchemicalthermodynamics,34, 1729-1743.

6-Long,M.B.,Gomez,A.,2003."The electrospray and the combustion at the mesoscale".*Journal of the Mass Sprcterometry Society of Japan,*51, 42-49.

7- Goncalves,L.M.,Alpuin,P.,Min,G., Rowe,D.M., Couto,C.,Correia,J.H.,2008."Optimization of Bi2Te3 thin films deposited by coevaporation on polymide for thermoelectric applications".*Vacum,*82, 1499-1502.

8- L.i, Z.W., Chou, S.k., Shu, C., Yang, W.M., 2004."Peredicting the temperature of a premixed flame in a microcumbustor".*Journal of Applied Physics,*96(6), 3524-3530.

9-L.i, Z.W., Chou, S.k., Li, Z., Yang, W., 2008. "Development of 1D model for the analysis of heat transport in cylindrical microcumbutors". Applied Thermal Engineering,29(8),1854-1863.

10- Basu, Y.B. Chen, and Z.M. Zhang, 2007, "Microscale radiation in thermo photovoltaic devices : a review", International Journal of Energy Research , 31, 689–716.

11- S.A. Jacobson and A.H. Epstein,2003,"An Informal Survey of Power MEMS", The 18th International Symposium on Micro-Mechanical Engineering, Tsuchiura and Tsukuba, Japan.

12- W.M. Yang , S.K. Chou, C. Shu, H. Xue, Z.W. Li,D.T.Li andJ.F.Pan,2003,"Microscale combustion research for application to micro thermophotovoltaic systems", Energy Conversion Management, 44, 2625–2634. and

13- M. Ahmed,A. Choudhuri,V. Shirsatss, and M. Rahman,2011," An Investigation of Lean Limits of Hydrogen Flame at Meso-Scale",49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Exposition, Horizons Forum and Aerospace Orlando, Florida.

14- S.A. 14-J.A.Esfahani,an Fanaee,2015,"Analytical Modeling of Hydrogen–Air Mixture in a CatalyticMicrochannel",JournalofThermophysics and Heat Transfer, 22, 274–280.

15- S.A. Fanaee, and J.A. Esfahani,2014, "The analytical modeling of propane-oxygen mixture at catalytic micro-channel", Heat and Mass Transfer", 50, 1365-1373.

16- M. Bidabadi, S.Montazerinejad, and S.A. Fanaee,2010, "An Analytical Study of Radiation Effect on the Ignition of Magnesium Particles

Using Perturbation Theory", Latin American Applied Research, 40, 351-357.
17-D.G.Norton, D.G.Vlachos , 2014, Combustion characteristics and flame stability at the study of premixed methane/air CFD a:microscale mixtures", Chemical Engineering Science,58,4871–4882.