

شبیه‌سازی موتور تزریق مستقیم با استفاده از محیط متخلخل

مسعود ضیا بشرحق
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
mzia@kntu.ac.ir

آرش محمدی
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
amohammadi@dena.kntu.ac.ir

علی جزایری*
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
jazayeri@kntu.ac.ir

* نویسنده مسئول تاریخ دریافت: ۹۰/۰۵/۳۰ پذیرش نهایی مقاله: ۹۰/۰۷/۳۰

چکیده

محیطهای متخلخل در مشعلها به منظور پایداری احتراق با مخلوطهای رقیق، افزایش توان خروجی و کاهش آلاینده‌های حاصل از احتراق، کاربرد زیادی دارند. مشخصه موتورهای احتراق داخلی آینده میزان آلاینده‌گی بسیار کم به همراه کمترین مقدار مصرف سوخت تحت تمام شرایط کارکرد موتور می‌باشد و این متغیرها وابسته به تشکیل فرآیند مخلوط و احتراق است، این هدف با همگن کردن فرآیند احتراق امکان‌پذیر است که پایش آنها در موتورهای احتراق داخلی بسیار مشکل است. در این مقاله شبیه‌سازی موتور تزریق مستقیم انجام گرفته که در بستر آن فضایی مکعب مستطیلی برای محیط متخلخل ایجاد شده، که محیط متخلخل تنها وظیفه بازیاب را دارد و از لحاظ شیمیایی بی اثر است. مطالعه سه‌بعدی جریان و احتراق داخل استوانه و محیط متخلخل همزمان با یکدیگر با استفاده از برنامه تصحیح شده کیوا انجام شده است. به دلیل نبود نتایج آزمایشگاهی منتشر شده برای موتورهای محیط متخلخل، برای اعتبار نتایج پخش موج احتراقی با نتایج آزمایشگاهی مخلوط هوا و متان رقیق در بستر متخلخل، مقایسه شده است. سوخت متان داخل موتور محیط متخلخل پاشیده می‌شود و مخلوط رقیقی به همراه احتراق حجمی اتفاق می‌افتد. تشکیل مخلوط، تغییرات فشار و دما در هر دو حالت جامد و سیال محیط متخلخل و سیال داخل استوانه به همراه تولید آلاینده‌های مونوکسید کربن و مونوکسید نیتروژن بررسی شده است. همچنین اثر زمان پاشش روی توزیع فشار و دمای محیط متخلخل و سیال داخل استوانه در یک چرخه بسته بررسی شده است.

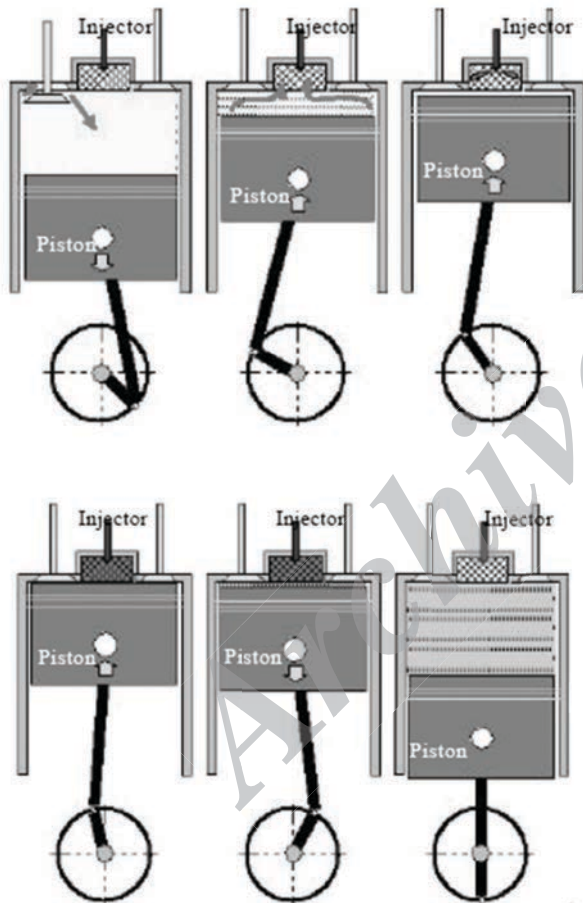
کلید واژه‌ها: موتور تزریق مستقیم، محیط متخلخل، احتراق همگن، آلاینده‌ها

۱- مقدمه

احتراق می‌باشد که باعث آزاد شدن ناهمگن انرژی حرارتی و گرادیان شدید دما در داخل محفظه احتراق و در نتیجه تولید آلاینده‌هایی مثل اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن نسوخته، مونوکسید کربن، دوده و ذرات معلق می‌شود [۱]. در حال حاضر پایش آلاینده‌های گازهای خروجی موتور به وسیله واکنشگر انجام می‌شود که هزینه زیادی دارد و بازدهی واکنشگرهای سه منظوره در تبدیل آلاینده‌های حاصل از مخلوط درست (استوکیومتریکی) نزدیک به ۱۰۰ درصد برای واکنشگر نو و بیش از ۸۰

هدف اصلی موتورهای احتراق داخلی آینده، حذف اثرهای زیان آور آن روی محیط زیست است. بزرگترین مشکل موتورهای احتراق داخلی در حال حاضر وجود ناهمگنی مخلوط سوخت و هوا درون محفظه

به‌طور نمادین در شکل (۱) نشان داده شده است. در هنگام مکش و زمان شروع تراکم اثر محیط متخلخل روی جریان داخل استوانه بسیار کم است. در انتهای تراکم تمامی هوا به‌طور تقریبی داخل حجم محیط متخلخل جمع می‌شود و دمای آن زیاد می‌شود و در نزدیکی نقطه مکث بالا سوخت داخل محیط متخلخل تزریق می‌شود و به‌دلیل دمای زیاد محیط متخلخل که بیش از دمای احتراق خودبخودی سوخت است، احتراق داخل ساختار سه‌بعدی محیط متخلخل به‌طور حجمی با توزیع دمای یکنواخت اتفاق می‌افتد. به این ترتیب همه شرایط لازم برای احتراق همگن داخل محفظه احتراق محیط متخلخل فراهم می‌شود.



شکل ۱ عملکرد موتور محیط متخلخل تماس دائمی بین استوانه و محیط متخلخل [۸]

در سال ۲۰۰۱ درست و وکلاس، اولین اندیشه را برای استفاده از محیط متخلخل در موتورهای احتراق داخلی ارائه دادند، که نتایج بسیار خوبی برای افزایش بازده موتور و کاهش آلاینده آن داشت. آنها عملکرد

درصد در واکنشگر پیرشده است. برای اجتناب از ناهمگنی دمای ناشی از احتراق در موتورهای احتراق داخلی، موتور سوخت همگن اشتعال تراکمی به عنوان راه حل پیشنهاد شده است ولی مشکلاتی با پایش زمان احتراق و آزاد شدن انرژی و همچنین میزان زیاد تولید مونوکسید کربن و هیدروکربن نسوخته در این نوع موتورها وجود دارد [۲]. مشکل موتورهای تزریق مستقیم فقدان تشکیل مخلوط و احتراق همگن می‌باشد. روشهای مختلفی برای کاهش آلاینده‌های موتور احتراق داخلی استفاده می‌شود، به‌طور مثال می‌توان به پاشش الکترونیکی سوخت با فشار زیاد، زمان متغیر برای باز و بسته شدن دریچه‌ها، بازگردانی گازهای خروجی حاصل از احتراق به درون محفظه احتراق، روشهای پایش حالتی یا تطبیقی برای تنظیم غنا (نسبت سوخت به هوا) اشاره کرد. اما ترکیبی از این روشها نیز نمی‌تواند مشکل آلاینده‌های احتراق را تحت تمامی شرایط کارکرد موتور به‌طور کامل حل کند. استفاده از فناوری‌های دیگر مانند قوه سوختی در حال حاضر به‌دلیل هزینه گران تولید و نگهداری و ابعاد آن، مقرون به صرفه نمی‌باشد. بنابراین باید از فناوری‌های دیگر استفاده شود تا زمان استفاده از قوه سوختی فرا برسد. بنابراین سوال این است که روش احتراق همگن در موتورهای احتراق داخلی در شرایط کارکرد متغیر موتور (بار و سرعت) با چه روشی می‌تواند به تحقق برسد. این کار تنها با تشکیل مخلوط همگن و احتراق سه بعدی سوخت و هوا که از تشکیل جبهه شعله و گرایان دما در محفظه احتراق جلوگیری می‌کند، امکان‌پذیر است [۳ و ۴]. در مشعلهای پایا بهره‌گیری از محیط متخلخل برای پایداری شعله با سوخته‌های مایع و گازی و مخلوطهای رقیق و غنی همراه با کاهش چشمگیر آلاینده‌های احتراق و افزایش بازده احتراق، اثبات شده است [۵ و ۶]. مشخصات چشمگیر محیط متخلخل برای کاربرد آن در فناوری احتراق عبارتند از: مساحت ویژه زیاد، خواص انتقال حرارت بسیار عالی، ظرفیت حرارتی، شفافیت برای جریان، مقاومت حرارتی و مکانیکی و خواص برقی. موتور محیط متخلخل به عنوان موتوری با فرآیند احتراق همگن در حجم محیط متخلخل تعریف می‌شود. فرآیندهایی که به‌طور مجزا در موتور محیط متخلخل اتفاق می‌افتد عبارتند از: بازیابی انرژی در چرخه تزریق سوخت در محیط متخلخل، تبخیر سوخت در محیط متخلخل (برای سوخته‌های مایع)، مخلوط شدن با هوا، و احتراق سه‌بعدی خود بخود و همگن سوخت و هوا است موتور محیط متخلخل با توجه به زمان بازیابی حرارت به دو دسته تقسیم می‌شوند: موتور با تماس تناوبی بین محیط متخلخل و استوانه و موتور با تماس دائمی بین محیط متخلخل و استوانه. در این مقاله کاربرد نوع دوم آن مطالعه می‌شود. موتور تماس دائم بین حجم محیط متخلخل و گازهای داخل استوانه

استوانه را بررسی کردند. نتایج محاسباتی آنها نشان داد که دمای اولیه محیط متخلخل عامل کلیدی در شروع احتراق است و اگر از مقدار معینی کمتر باشد احتراق انجام نمی‌شود [۱۲]. در سال ۲۰۰۸، مازاهو و زیاهو اثر پاشش سوخت مایع روی محیط متخلخل تقارن محوری را با استفاده از برنامه کیوا را بررسی کردند و اثر زاویه پاشش و فشار اولیه پاشش را روی محیط متخلخل داغ به منظور مقدار نفوذ قطرات پاشیده شده، داخل محیط متخلخل را بررسی کردند [۱۳]. در سال ۲۰۰۸، لیو و مازاهو فرآیند احتراق و انبساط را با استفاده از الگوی دو ناحیه‌ای احتراق که پخش جرم، انتقال حرارت از دیوار استوانه، تبادل جرم بین ناحیه‌ها و انتقال حرارت در محیط متخلخل را در نظر می‌گرفت، بررسی کردند و اثر متغیرهای کارکرد موتور مثل دمای هوا و فشار ورودی، نسبت تراکم و هوای اضافی روی احتراق را بررسی کردند و نشان دادند که دمای اولیه محیط متخلخل و نسبت تراکم عاملهای کلیدی برای پایش دما در انتهای مرحله تراکم و اشتعال مخلوط می‌باشند [۱۴]. در سال ۲۰۰۹، لیو و مازاهو اثر محیط متخلخل درون یک موتور احتراق داخلی را با شبیه‌سازی ترمودینامیکی بازیاب و محفظه بررسی کردند و اثر دمای اولیه را روی بازده موتور محاسبه کردند و نشان دادند که بازده چرخه دیزل را به همراه محیط متخلخل می‌توان افزایش داد [۱۵].

در این مقاله شبیه‌سازی سه‌بعدی سیالات محاسباتی موتور محیط متخلخل با تماس دائم، با استفاده از برنامه تصحیح شده کیوا انجام شده است. سوخت متان به‌طور مستقیم داخل محیط متخلخل که مکان آن داخل بستار فرض شده، پاشیده می‌شود. هیچ گونه بهینه سازی در مورد ساختار محیط متخلخل هنوز صورت نگرفته است. احتراق با تأخیر زمانی بسیار کمی اتفاق می‌افتد که علت آن دمای گرم محیط متخلخل می‌باشد و دیده می‌شود که شعله با استفاده از محیط متخلخل و مخلوط بسیار رقیق پایدار می‌ماند ولی کمبود اکسیژن در مراحل انتهایی احتراق درون محیط متخلخل دیده می‌شود. به دلیل نبود نتایج آزمایشگاهی منتشر شده برای موتورهای محیط متخلخل، پخش موج احتراقی گذرا، با نتایج آزمایشگاهی معتبر مقایسه شده است. که دقت خوبی با هم دارند. زمان پاشش روی توزیع فشار و دمای داخل استوانه و دمای دو حالت جامد و سیال محیط متخلخل و جز جرمی میانگین متان، مونوکسید کربن و مونوکسید نیتروژن، با زاویه لنگ بررسی شده است.

محیط متخلخل را روی موتور دیزل تک استوانه - تزریق مستقیم که با هوا خنک می‌شود، بدون استفاده از واکنشگر بررسی کردند. محیط متخلخل مورد استفاده از جنس سیلیکن کاربرد بود که در فضای بستار بین دریچه‌های ورودی و خروجی کار گذاشته شده بود. برای این منظور فضایی از بستار بین دریچه ورودی و خروجی را خالی کردند و چون نیازی به افزایش تلاطم جریان نبود، کاسه سمبه را حذف کردند. نتایج نشان داد که دمای میانگین استوانه از حدود ۲۲۰۰ درجه کلون در حالت کارکرد عادی بدون محیط متخلخل، به ۱۵۰۰ درجه کلون با وجود محیط متخلخل افت کرد و در حین احتراق نیز تغییر چشمگیری نکرد. مقدار آلاینده‌های موتور نزدیک به صفر بود و مقدار غنا را می‌توان تا حدود ۲/۳، بدون خاموش شدن شعله افزایش داد [۸ و ۷].

در سال ۲۰۰۲، پارک و کاویانی اثر یک محیط متخلخل از جنس سیلیکن کاربرد که با حرکت سمبه در استوانه موتور دیزل حرکت می‌کرد را با شبیه‌سازی عددی مطالعه کردند. آنها از الگوی دو ناحیه‌ای احتراق با در نظر گرفتن واکنش یک مرحله‌ای برای احتراق متان استفاده کردند و نشان دادند که فشار استوانه در حین احتراق افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه کار بیشتری انجام می‌شود. همچنین بازده موتور افزایش می‌یابد ولی به دلیل دمای گرم محیط متخلخل که از دمای فرآیند بی‌دررو بیشتر است، مقدار اکسیدهای نیتروژن نسبت به حالت عادی افزایش پیدا می‌کند [۹]. در سال ۲۰۰۳، ماسک و پلاسک شبیه‌سازی موتور احتراق داخلی را با محیط متخلخل با سوخت متان و هیدروژن انجام دادند و در مورد کاربرد عملی آن توضیحاتی دادند [۱]. در سال ۲۰۰۶، هان و چن محیط متخلخل را روی سمبه یک موتور دیزل تک استوانه نصب کردند و مشاهده کردند که توان افزایش پیدا می‌کند و صدای حاصل از کارکرد موتور به دلیل کاهش فشار بیشینه، کم می‌شود. همچنین مقدار اکسیدهای نیتروژن به‌طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند [۱۰]. در سال ۲۰۰۷، وکلاس و فالتیمر پاشش سوخت مایع به درون یک محیط متخلخل (که بصورت چیدمان شبکه ای از استوانه‌ها که روی یک صفحه نصب شده بود) را بررسی کردند و تغییر چیدمان مکان و قطر استوانه‌ها و همچنین اثر تغییر مکان افشانه را روی مقدار نفوذ سوخت مایع را درون محیط متخلخل با زمان را بررسی کردند [۱۱]. در سال ۲۰۰۸، مازاهو و زیاهو احتراق همگن را در یک موتور احتراق داخلی تراکمی دو بعدی را با محیط متخلخل را با استفاده از برنامه کیوا شبیه‌سازی کردند. سوخت متان به‌طور مستقیم داخل محیط متخلخل داغ پاشیده شد و اثر دمای اولیه محیط متخلخل، اثر زمان پاشش سوخت روی دما و فشار میانگین

۲- معادلات حاکم

فرضیاتی که برای شبیه‌سازی محیط متخلخل در نظر گرفته می‌شود، عبارتند از:

(۱) جسم جامد همگن، ایزوتروپیک و بی اثر بر واکنش است و خواص آن با دما تغییر می‌کند.

(۲) دمای گاز و جامد متفاوت فرض می‌شود و بنابراین معادلات انرژی برای هر دو حالت حل می‌گردد و دو حالت از طریق انتقال حرارت جابجایی به هم وابسته می‌باشند.

(۳) انتقال حرارت تشعشی تنها برای حالت جامد در نظر گرفته شده است.

با توجه به این فرضیات، معادلات حاکم بدین صورت می‌باشند که این تصحیحات در برنامه کیوا اعمال شده است [۱۶ و ۱۷]:

معادله پیوستگی برای گونه i ام:

$$\frac{\partial(\rho_i \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i u \phi) = \nabla \cdot [\rho \phi D_{im} \nabla \left(\frac{\rho_i}{\rho}\right)] + \phi \dot{\rho}_i^c + \dot{\rho}^s \delta_{i1} \quad (1)$$

D_{im} ضریب نفوذ جزء i ام در مخلوط است که در داخل برنامه کیوا با توجه به نظریه انرژی جنبشی گازها تصحیح شده است. ρ_i چگالی جزء i ام و ρ چگالی مخلوط، ϕ درصد تخلخل و u بردار سرعت است.

معادله مومنتم حالت گاز:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\frac{1}{\alpha^2} \nabla P - A_0 \nabla \left(\frac{2}{3} \rho k\right) + \nabla \cdot \sigma + F^s - \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right) \quad (2)$$

عبارت آخر در معادله (۲) به علت افت فشار در محیط متخلخل است که با توجه به معادله ارگان شبیه‌سازی شده است.

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right) = \left(\frac{\mu}{\alpha} u + c_2 \frac{1}{2} \rho |u| u\right) \quad (3)$$

ضریب نفوذ پذیری در محیط متخلخل و C_2 ضریب مقاومت اینرسی در محیط متخلخل است.

معادله انرژی حالت گاز:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho c_p T_g) + \nabla \cdot (\phi \rho c_p T_g \vec{v}) + \phi \sum_i \dot{\omega}_i h_i W_i = & \quad (4) \\ -\phi P \nabla \cdot u + A_0 \rho \epsilon + \phi (1 - A_0) \sigma : \nabla u & \\ \phi \nabla \cdot ((k_g + \rho_g c_g D_{||}^d) \nabla T_g) - h_v (T_g - T_s) + \dot{Q}^s & \end{aligned}$$

که عبارت چهارم سمت راست به ترتیب هدایت حرارتی و پخش حرارت به دلیل وجود محیط متخلخل و عبارت پنجم انتقال حرارت جابجایی بین حالت گاز و جامد در محیط متخلخل است.

$$Nu_v = 2 + 1.1 Re^{0.6} Pr^{0.33} \quad (5)$$

$$h_v = \frac{6\phi}{a^2} k_g Nu_v \quad (6)$$

c_g گرمای ویژه مخلوط، T_g دمای گاز، Y_i کسر جرمی جزء i ام، $\dot{\omega}_i$ نرخ تغییرات مولی جزء i ام، h_i انتالپی جزء i ام، W_i جرم مولکولی جزء i ام، k_g ضریب هدایت حرارتی سیال، $D_{||}^d$ ضریب حرارتی پخش در امتداد طولی در اثر محیط متخلخل، h_v ضریب انتقال حرارت جابجایی حجمی است، واکاؤ و کاغوبی برای انتقال حرارت بین بسترهای متخلخل و سیال، معادله (۵) را ارائه کرده‌اند [۱۸].

معادله انرژی حالت جامد:

$$((1 - \phi) \rho_s c_s T_s) = \nabla \cdot [k_s (1 - \phi) \nabla T_s] + \quad (7)$$

$$+ h_v (T_g - T_s) - \nabla \cdot q_r$$

دمای محیط جامد، ρ_s چگالی مخلوط، c_s گرمای ویژه محیط جامد، k_s ضریب هدایت حرارتی محیط جامد، q_r تشعشع حرارتی محیط جامد است.

معادله پیوستگی گونه‌های شیمیایی:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_g Y_i) + \nabla \cdot (\phi \rho_g Y_i u) + \nabla \cdot (\phi \rho_g Y_i v_i) \quad (8)$$

$$- \phi \dot{\omega}_i W_i = 0$$

$$v_i = -(D + D_{||}^d) \frac{1}{X_i} \nabla X_i \quad (9)$$

$$Pe = \frac{\rho c_p |u| d}{k_g} \quad (10)$$

X_i جزء مولی گونه i ام، P_e عدد پکله، D_{im} ضریب نفوذ جزء i ام در مخلوط و v_i سرعت نفوذ جزء i ام و $D_{||}^d$ پخش جرم در اثر محیط متخلخل و d قطر معادل حفره‌های محیط متخلخل است.

الگوی متلاطم :

به دلیل اینکه تا کنون هیچ الگوی جامعی در مورد شبیه سازی جریان متلاطم درون محیطهای متخلخل با جریان تراکم پذیر ارائه نشده است. از این رو الگوی $\epsilon - \kappa$ بدون هیچ تغییری استفاده شده است.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u k) = -\frac{2}{3} \rho \kappa \nabla \cdot u + \sigma : \nabla u \quad (11)$$

$$+ \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr_k} \right) \nabla k \right] - \rho \epsilon + \dot{W}^s$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \epsilon) - \left(\frac{2}{3} c_{\epsilon 1} - c_{\epsilon 3} \right) \rho \epsilon \nabla \cdot u + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} [c_{\epsilon 1} \sigma : \nabla u - c_{\epsilon 2} \rho \epsilon + c_s \dot{W}^s] \quad (12)$$

معادله حالت :

$$P = \rho_g RT / \bar{W} \quad (13)$$

R ثابت جهانی گازها و \bar{W} جرم مولکولی میانگین مخلوط است و P فشار درون محیط متخلخل و محفظه احتراق است.

الگوی احتراق :

واکنش شیمیایی برای احتراق متان در نظر گرفته می شود، $\dot{\omega}_k$ نرخ تولید جزء شیمیایی می باشد که از معادله (14) به دست می آید و $v''_{k,i}$ و $v'_{k,i}$ ضرایب استوکیومتری هستند.

$$\dot{\omega}_i = \sum_{k=1}^{NR} (v''_{k,i} - v'_{k,i}) \quad (14)$$

الگوی احتراق متلاطم ادی بریک آپ می باشد. این الگو، نرخ احتراق متلاطم لحظه ای و موضعی را به جزء جرمی سوخت و مشخصه زمانی متلاطم جریان مربوط می کند [16].

شبیه سازی تشعشع :

به دلیل دمای گرم ناحیه احتراق و گداختگی ماده جامد در این دما، لحاظ کردن تشعشع اهمیت می یابد. تشعشع حالت گاز در مقایسه با حالت جامد که ضریب جذب بزرگی دارد صرف نظر شده است. معادلات متعددی برای شبیه سازی انتقال حرارت تشعشی و به دست آوردن شدت تابش ارائه شده است. در اینجا از الگوی رسلند برای شبیه سازی انتقال حرارت تشعشع استفاده شده است [19].

$$q_r = -\frac{16}{3} \frac{\sigma T_s^3}{\beta} \nabla T_s \quad (15)$$

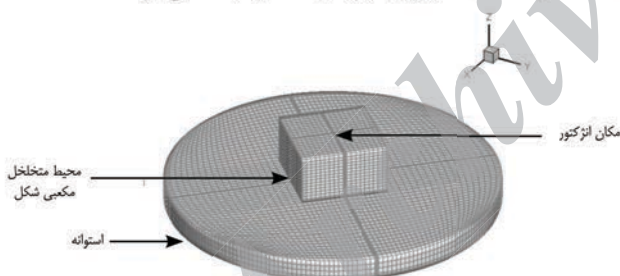
σ ثابت بولتزمن و β ضریب برانگیختگی برای محیط متخلخل است.

الگوی تزریق گاز:

متان به عنوان سوخت گازی در راستای محور موتور در و عمود بر سطح بالای محیط متخلخل پاشیده میشود. جزئیات الگوی سازی پاشش سوخت گازی در [20] آورده شده است. این الگو، برای شبیه سازی گذرای تزریق مستقیم سوخت به درون محفظه احتراق ارائه شده است که نتایج خوبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به همراه داشته است.

۳- آماده سازی شبکه

مشخصات فنی موتور و داده های محیط متخلخل در جدول (1) آورده شده است. برای شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی، شبکه محاسباتی با نرم افزار آی سی ام ایجاد شده است. شکل (2) هندسه محاسباتی استفاده شده را در نقطه مکث بالا نشان می دهد. تعداد شبکه ها از 238144 (77400 در محیط متخلخل و 230400 در داخل استوانه) در نقطه مکث پایین به 22144 (77400 در محیط متخلخل و 14400 در داخل استوانه) در نقطه مکث بالا تغییر می کند. در جدول (2) تغییرات فشار بیشینه در برابر تعداد شبکه ها آورده شده است. این جدول نشان می دهد که حل مستقل از شبکه است زیرا با افزایش شبکه از 21144 به 22686 تغییری در بیشینه فشار دیده نمی شود.

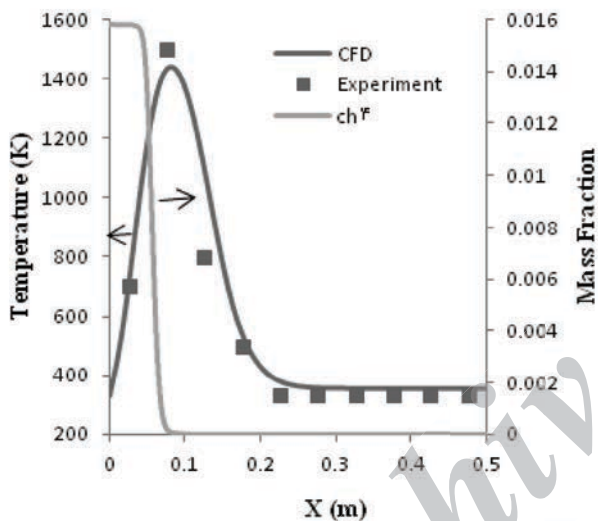


شکل ۲ شبکه محاسباتی در نقطه مکث بالا

۴- شرایط مرزی و اولیه برای شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی

محاسبات در نقطه مکث پایین شروع می شود. الگوی استاندارد $\epsilon - \kappa$ استفاده شده و چرخش اولیه سیال صفر و گرادیان دما در همه سطوحها برای حالت جامد و سیال در محیط متخلخل صفر در نظر گرفته شده

صفر برای حالت جامد در نظر گرفته شده و در خروجی گرادینهای حالت جامد و سیال و جرم گونه‌ها صفر در نظر گرفته شده است. همچنین رژیم جریان به علت سرعت کم جریان ورودی آرام در نظر گرفته شده است. شکل (۳) مقایسه‌ای بین نتایج عددی و آزمایشی [۲۲] ژدانوک در زمان ۱۴۷ ثانیه برای سرعت موج احتراق انجام شده است که نتیجه خوبی نشان می‌دهد. از این جهت این نتیجه در این آورده شده که اولین زمانی است که نتایج آن گزارش شده است [۲۲]. همچنین جزء جرمی میانگین متان در برابر طول لوله دیده می‌شود و در جایی که متان به‌طور مصرف می‌شود و مقدار آن به‌طور تقریبی به صفر می‌رسد، بیشینه دما مقدار است که با فیزیک مساله سازگار است.



شکل ۳ مقایسه موج حاصل از احتراق با نتایج تجربی در زمان ۱۴۷ ثانیه

در شکل ۴ الف و ب، توزیع جزء جرمی متان در محفظه احتراق بدون در نظر گرفتن محیط متخلخل، در زاویه‌های ۱۰ و ۲۰ درجه بعد از پاشش (زاویه ۳۳۰ درجه لنگ) نشان داده شده است. افشانه مطابق شکل (۲) پاشش را در راستای محور موتور انجام می‌دهد. در این شکل تنها پاشش متان بدون احتراق شبیه‌سازی شده است تا اثر محیط متخلخل را بر تشکیل مخلوط نشان داده شده است. در شکل (۴) بعد از ۱۰ درجه از زمان پاشش، متان به سطح سمبه برخورد می‌کند و در فضای استوانه پخش می‌شود.

در شکل ۵ الف و ب توزیع جرمی متان در شرایط یکسان با شکل (۴) نشان داده شده است و تفاوت تنها در این است که در این شکل محیط

است. از آنجا که سیلیکیم کاربرد نقطه ذوب بالایی (2987°C) و مقاومت مناسب در دمای داغ (1400°C) و مقاومت آن در برابر اکسید شدن باعث شده که قابل کاربرد در محفظه احتراق موتور باشد که در دماها و فشارهای زیاد کار می‌کند [۲۱].

جدول ۱ مشخصات فنی موتور و محیط متخلخل

حجم استوانه (تک-استوانه)	۰/۹۸۱ لیتر
قطر سمبه	۱۰۲ میلی متر
طول کورس سمبه	۱۲۰ میلی متر
نسبت تراکم نامی	۱۸
طول شاتون	۱۹۲ میلی متر
دور موتور	۲۰۰۰ دور در دقیقه
نسبت تعادلی سوخت	۰/۱۷۶
ارتفاع محیط متخلخل	۱۵ میلیمتر
درصد تخلخل	۰/۸

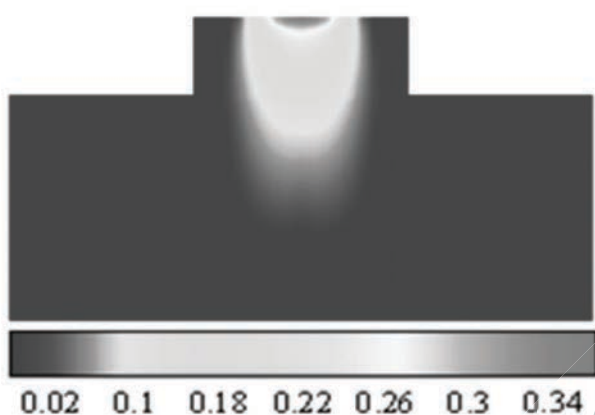
جدول ۲ بررسی استقلال از شبکه

زاویه لنگ فشار بیشینه	فشار بیشینه	تعداد شبکه در نقطه مکث بالا
۳۶۰	۵۵ بار	۱۸۷۵۶
۳۶۰	۵۱ بار	۱۹۵۹۶
۳۶۰	۴۹/۹ بار	۲۱۱۴۴
۳۶۰	۴۹/۹ بار	۲۲۶۲۸

۵- بحث روی نتایج

به منظور اعتبار نتایج عددی در موتور احتراق داخلی و به دلیل نبود نتایج تجربی منتشر شده برای موتور محیط متخلخل، برنامه تصحیح شده کیوا برای شبیه‌سازی احتراق ناپایا در یک لوله محیط متخلخل استفاده شده است. قسمت محاسباتی شبکه بندی شده یک لوله عمودی به قطر ۷۶ میلی متر و طول ۱/۳ متر است، که با بستری از کره‌هایی با جنس آلومین و قطر ۵/۶ میلی متر پر شده است. طول استوانه در شبیه‌سازی ۶۰ سانتی متر در نظر گرفته شده که در بر گیرنده تمام حسگرهای اندازه‌گیری دما است که داخل محیط متخلخل در آزمایشگاه کار گذاشته شده است. شرایط مرزی برای معادله مومنتم و انرژی در محیط متخلخل در نظر گرفته شده است. در بالادست دمای مخلوط ورودی ۳۰۰ کلوین و نسبت تعادلی (فی) سوخت و هوای ورودی ۰/۱۵ است و گرادین دمای

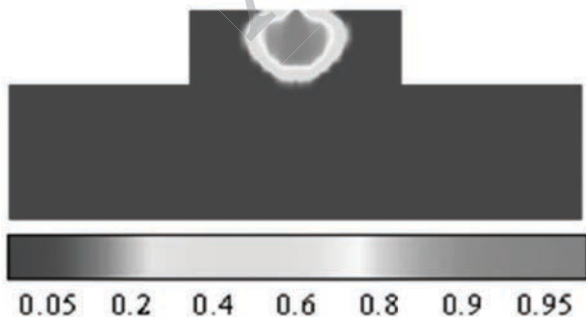
در شکل‌های ۶ و ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰ نتایج حاصل از احتراق به ترتیب برای توزیع متان، اکسیژن، دی اکسید کربن، و توزیع دما در حالت سیال و جامد در محیط متخلخل و جریان داخل استوانه در زاویه‌های لنگ مختلف دیده می‌شود. شبیه‌سازی از نقطه مکث پایین (۱۸۰ درجه زاویه لنگ) شروع شده و زمان پاشش، زاویه ۳۱۰ درجه لنگ و مدت زمان پاشش ۱۰ درجه می‌باشد اما مدت زمان پاشش بهینه هنوز بدست نیامده است. در شکل (۶) جزء جرمی متان به ترتیب در زاویه‌های لنگ ۳۲۰ و ۳۶۰ و ۴۲۰ درجه در حالت احتراق در موتور محیط متخلخل دیده می‌شود.



زاویه لنگ ۴۲۰ درجه



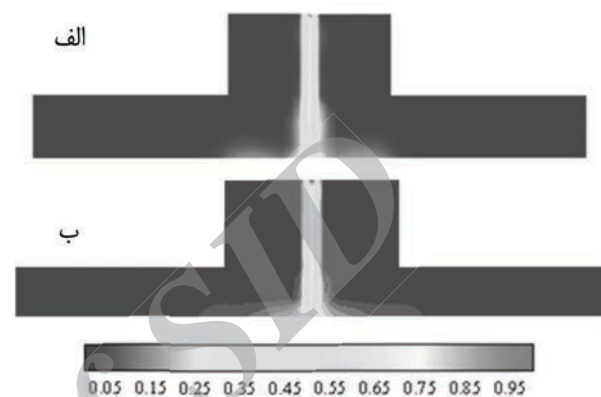
زاویه لنگ ۳۶۰ درجه



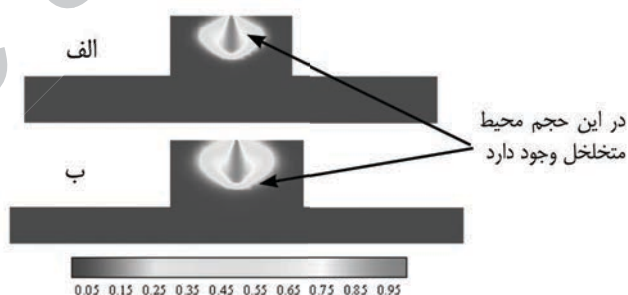
زاویه لنگ ۳۲۰ درجه

شکل ۶ جزء جرمی متان در چند زاویه لنگ

متخلخل در بستار وجود دارد. از شکل به‌طور کامل واضح است که بعد از ۱۰ و ۲۰ درجه پس از پاشش سوخت، متان به‌طور کامل داخل محیط متخلخل باقی می‌ماند و در آن پخش می‌شود ولی مشکل این است که مخلوط غنی در فضای اطراف افشانه تشکیل می‌شود و این مساله مهمی است که در احتراق سوخت باید به نوعی حل شود.

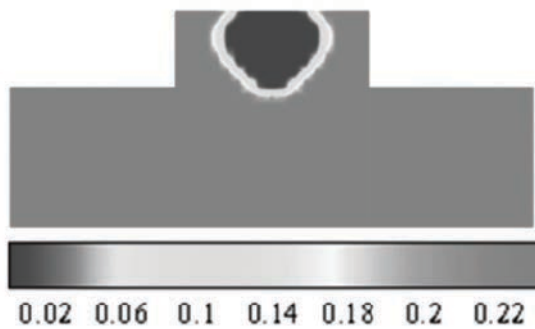


شکل ۴ جزء جرمی متان در سطح مقطع ($X=0$) بدون وجود محیط متخلخل: (الف) ۱۰ درجه و (ب) ۲۰ درجه بعد از زمان پاشش

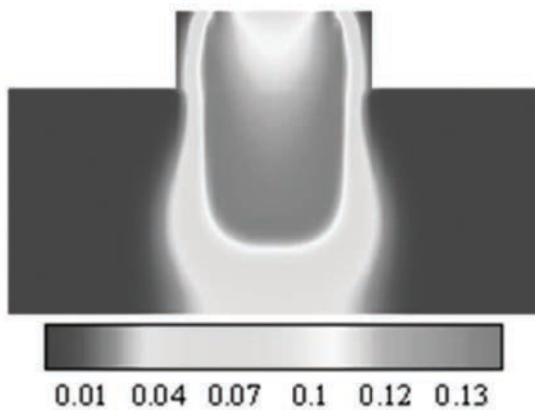


شکل ۵ جزء جرمی متان در سطح مقطع ($X=0$) با وجود محیط متخلخل: (الف) ۱۰ درجه و (ب) ۲۰ درجه بعد از زمان پاشش

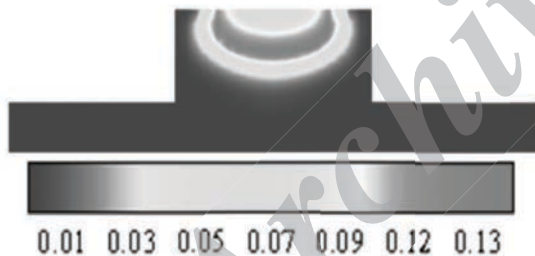
وجود محیط متخلخل باعث می‌شود که متان در حجم آن پخش شود و از نفوذ آن به داخل استوانه جلوگیری می‌کند و این مزیت عمده برای احتراق مخلوط رقیق سوخت و هوا می‌باشد زیرا قسمت عمده احتراق در حجم محیط متخلخل اتفاق می‌افتد و قسمتی از انرژی آزاد شده سوخت می‌تواند به‌وسیله حالت جامد محیط متخلخل جذب می‌شود و از این رو دمای میانگین کل سیال بسیار افت می‌کند و مقدار اکسید نیتروژن بسیار کمی نسبت به موتورهای تزریق مستقیم عادی تولید می‌شود. در هر دو شکل ۴ و ۵ جزء جرمی متان بین ۰/۰۵ و ۰/۹۵ است ولی پخش سوخت با وجود محیط متخلخل یکنواخت است.



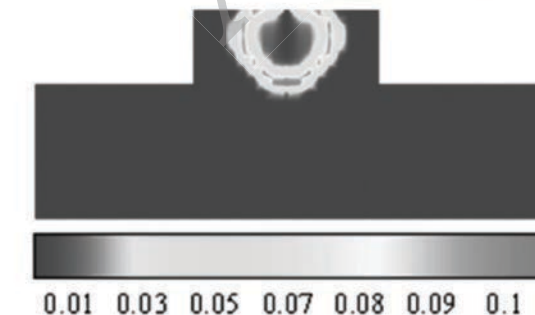
زاویه لنگ ۳۲۰ درجه

شکل ۶ جزء جرمی اکسیژن در چند زاویه لنگ

زاویه لنگ ۴۲۰ درجه



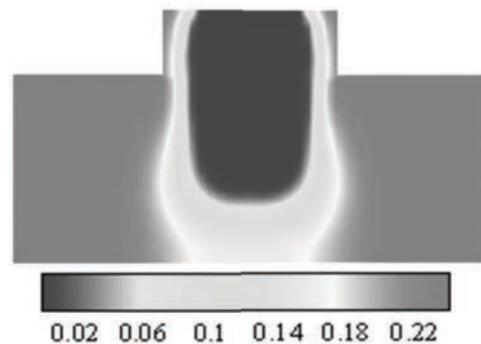
زاویه لنگ ۳۶۰ درجه



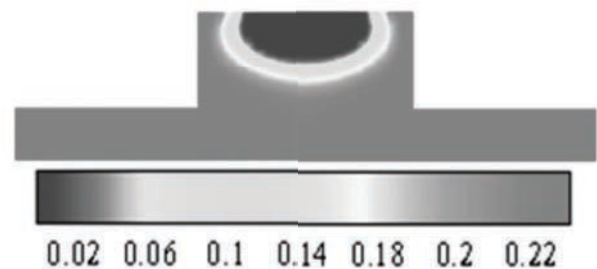
زاویه لنگ ۳۲۰ درجه

شکل ۷ جزء جرمی دی اکسید کربن در چند زاویه لنگ

از شکل (۶) نتیجه گیری می‌شود که عمده سوخت تزریق شده به علت وجود محیط متخلخل در نزدیکی افشانه جمع می‌شود و مقداری از سوخت در انتهای احتراق (زاویه ۴۲۰ درجه) مصرف نمی‌شود و این به علت مصرف سریع اکسیژن اطراف افشانه و خلا نسبی وجود اکسیژن در مراحل انتهایی احتراق می‌باشد (مطابق شکل (۷)). زیرا عامل شروع کننده احتراق دمای داغ محیط متخلخل است. از این رو بهتر است که در این مورد از افشانه airassist استفاده شود تا بتواند هوای مورد نیاز احتراق سوخت را فراهم کند. زیرا تزریق زود هنگام سوخت در فشار زیاد منجر به نفوذ سوخت داخل استوانه می‌شود و در نتیجه احتراق داخل استوانه هم اتفاق می‌افتد و محیط متخلخل نمی‌تواند دمای داخل استوانه را پایش کند. جزء جرمی متان بین ۱/۱ تا ۱/۶. در قسمت عمده احتراق تغییر می‌کند و در زاویه ۴۲۰ درجه بیشینه جزء جرمی متان ۱/۳۴ است. در شکل (۷) جزء جرمی اکسیژن در زاویه‌های لنگ ۳۲۰ و ۳۶۰ و ۴۲۰ درجه زاویه لنگ در هنگام احتراق دیده می‌شود. از شکل (۷) نتیجه گیری می‌شود که به علت مصرف سریع اکسیژن اطراف افشانه، متان نسوخته داخل استوانه، در انتهای احتراق باقی می‌ماند و نمی‌تواند در واکنش شرکت کند. از این رو بهتر است که ساختارهایی برای محیط متخلخل انتخاب شود که بتواند سوخت را بهتر درون حجم خودش پخش کند و از این رو ساختارهایی با شکل نیمکره مناسب‌تر هستند.

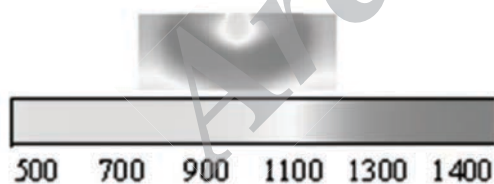


زاویه لنگ ۴۲۰ درجه

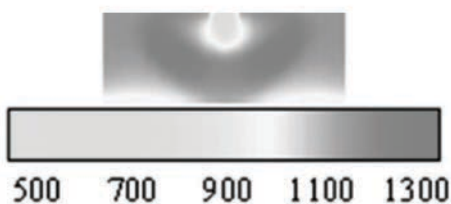


زاویه لنگ ۳۶۰ درجه

شکل (۱۰) توزیع دمای حالت جامد محیط متخلخل را در زاویه‌های یکسان با شکل (۹) نشان می‌دهد. در ناحیه نزدیک افشانه دما بسیار سرد و حدود ۴۵۰ درجه کلوین است زیرا سوخت با دمای ۳۰۰ درجه کلوین داخل محیط متخلخل داغ تزریق می‌شود و حرارت حالت جامد محیط متخلخل به وسیله متان جذب می‌شود و در فاصله کمی از افشانه، دمای متان افزایش پیدا می‌کند و به دمای احتراق خود بخود، با تأخیر زمانی کمی می‌رسد. بر اثر ظرفیت حرارتی زیاد حالت جامد محیط متخلخل، تغییرات دمای بسیار کمی در حالت جامد اتفاق می‌افتد. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نتایج عددی برای توزیع فشار و دمای میانگین در محفظه احتراق (استوانه به علاوه محیط متخلخل) نشان داده شده است. شبیه‌سازی در نقطه مکث پایین شروع می‌شود. در شرایط بدون احتراق، هیچ سوختی درون محیط متخلخل تزریق نمی‌شود و تنها تبادل حرارت بین محیط متخلخل و جریان داخل استوانه وجود دارد. بیشینه فشار داخل استوانه در حالت بدون احتراق حدود ۴۵ بار است که در نقطه مکث بالا اتفاق می‌افتد. برای شش زمان پاشش (۳۰۰ و ۳۱۰ و ۳۲۰ و ۳۳۰ و ۳۴۰ و ۳۵۰ و ۳۶۰ درجه زاویه لنگ) با مدت زمان پاشش ۱۰ درجه، فشار میانگین داخل استوانه بر حسب زاویه لنگ در حین احتراق آورده شده است. از شکل روشن است که توزیع فشار وابسته به زمان پاشش نیست و بیشینه آن حدود ۵۰ بار در نقطه مکث بالا می‌باشد که برای زمانهای پاشش ۳۰۰ تا ۳۴۰ درجه زاویه لنگ ثابت است ولی در زمان پاشش ۳۵۰ درجه بیشینه فشار ۴۹ بار و در ۳۶۰ درجه به ۴۸ بار می‌رسد. از این رو زمان پاشش بین ۳۰۰ تا ۳۴۰ درجه مناسب می‌باشد که بیشینه فشار آن ۵۰ بار است.



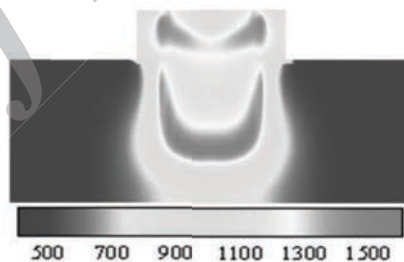
زاویه لنگ ۴۲ درجه



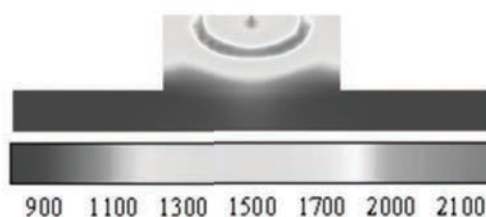
زاویه لنگ ۳۶ درجه

در شکل (۸) جزء جرمی دی اکسید کربن در زاویه‌های لنگ ۳۲۰ و ۳۶۰ درجه زاویه لنگ در هنگام احتراق دیده می‌شود. از شکل روشن است که احتراق در یک جبهه شعله با ضخامت زیاد نسبت به جبهه شعله در احتراق عادی که ضخامت آن ناچیز است، در موتورهای تزریق مستقیم اتفاق می‌افتد و دی اکسید کربن در ناحیه بین افشانه و جبهه شعله جمع می‌شود.

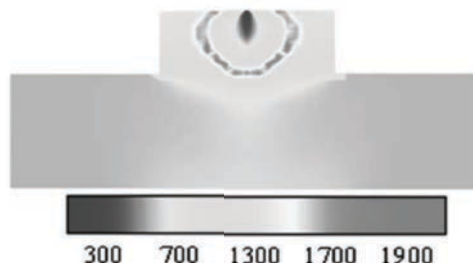
در شکل (۹) توزیع دما در سیال در زاویه‌های لنگ ۳۲۰ و ۳۶۰ درجه در هنگام احتراق دیده می‌شود. جبهه شعله از ناحیه با دمای گرم در شکل واضح است. بیشینه دما در نقطه مکث بالا حدود ۲۱۰۰ درجه کلوین است که مقدار آن موضعی است و بیشینه دمای میانگین سیال بسیار کمتر از این مقدار است و از این رو مقدار تولید مونوکسید نیتروژن بسیار کمتر از موتورهای عادی است. حالت جامد محیط متخلخل حرارت آزاد شده احتراق را جذب می‌کند و از گریان دما در سیال، که در موتورهای عادی وجود دارد، جلوگیری می‌کند.



زاویه لنگ ۴۱۵ درجه

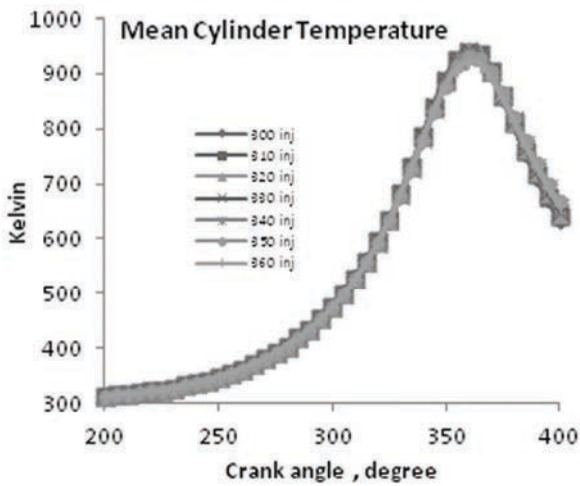


زاویه لنگ ۳۶ درجه



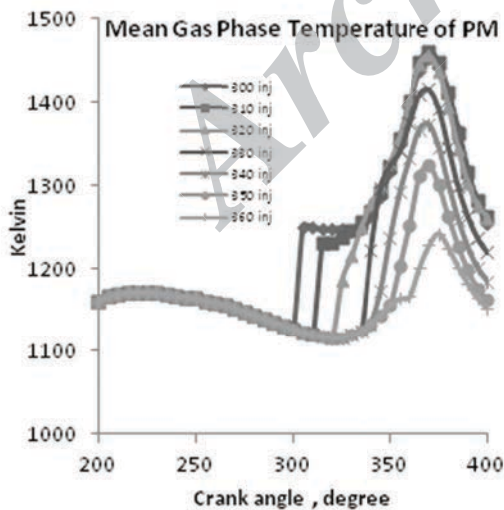
زاویه لنگ ۳۲ درجه

شکل ۹ توزیع دما در سیال در چند زاویه لنگ

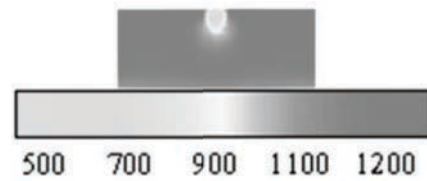


شکل ۱۲ توزیع دمای میانگین (استوانه و محیط متخلخل) برحسب زاویه لنگ

شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نتایج توزیع دما برای هر دو حالت جامد و سیال محیط متخلخل را برای شش زمان پاشش نشان داده شده است. شبیه‌سازی در نقطه مکث پایین شروع شده و دمای اولیه سیال ۳۰۰ درجه کلوین و دمای اولیه حالت جامد ۱۲۰۰ کلوین در نظر گرفته شده ولی دمای بهینه برای محیط متخلخل هنوز تعیین نشده است. از شکل‌ها مشخص است که دمای هر دو حالت محیط متخلخل با تغییر زمان پاشش بین ۳۰۰ تا ۳۲۰ درجه، تغییر زیادی نمی‌کند.



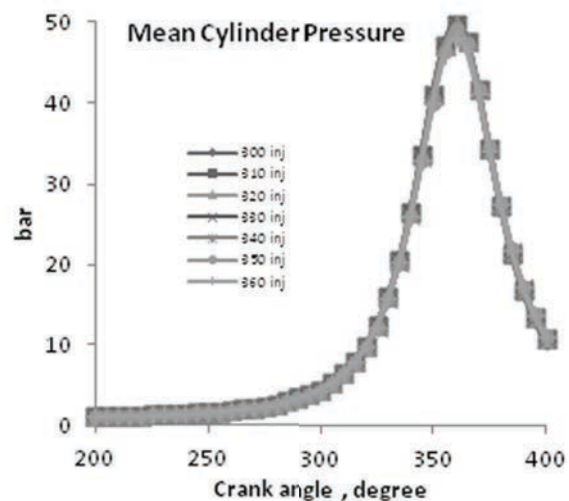
شکل ۱۳ توزیع دمای میانگین در حالت سیال محیط متخلخل برحسب زاویه لنگ



زاویه لنگ ۳۲۰ درجه

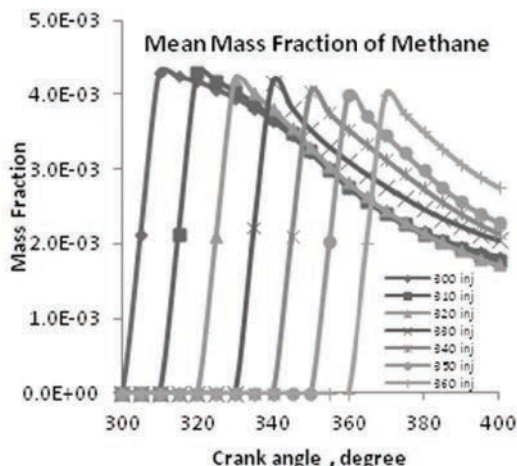
شکل ۱۰ توزیع دما در حالت جامد محیط متخلخل در چند زاویه لنگ

بیشینه دما (دمای میانگین کل سیال داخل استوانه و محیط متخلخل) در شرایط بدون احتراق حدود ۸۴۰ درجه کلوین است. برای شش زمان پاشش داده شده در شکل (۱۲)، دمای میانگین داخل استوانه آورده شده است، که وابسته به زمان پاشش نیست و بیشینه آن حدود ۹۵۰ درجه کلوین است و برای زمان‌های پاشش بین ۳۰۰ تا ۳۴۰ درجه است و بیشینه دما در زاویه پاشش ۳۴۰ درجه به ۹۳۳ کلوین و با پاشش در نقطه مکث بالا به ۹۲۰ کلوین می‌رسد. لازم به یادآوری است که با این نسبت تعادلی بسیار کم ($\Phi = 0.17$) که احتراق در موتورها معمولی اتفاق نمی‌افتد، با استفاده از فناوری محیط متخلخل، قابل کاربرد برای احتراق‌های بسیار رقیق داخل استوانه است و هدف این مقاله این است که توانمندی محیط متخلخل در احتراق‌های رقیق را نشان دهد. از نمودارها دیده می‌شود که با تزریق سوخت در نقطه مکث بالا، احتراق چشمگیری که افزایش فشار را به همراه داشته باشد، دیده نمی‌شود.

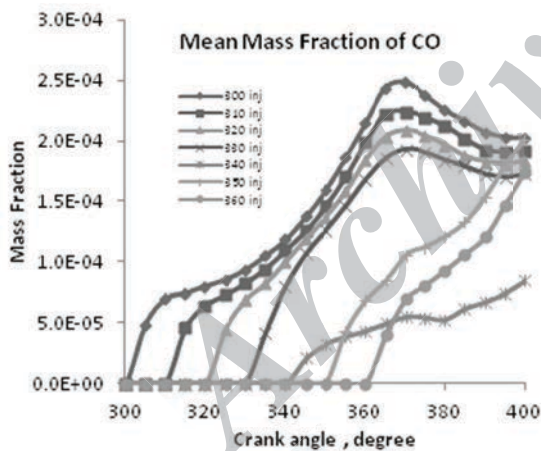


شکل ۱۱ توزیع فشار میانگین (استوانه و محیط متخلخل) برحسب زاویه لنگ

هنگام سوخت مقدار هیدروکربن نسوخته را افزایش دهد و پاشش در نقطه مکث بالا بدترین زمان است زیرا متان باقی مانده داخل استوانه در این حالت بیشترین مقدار است.

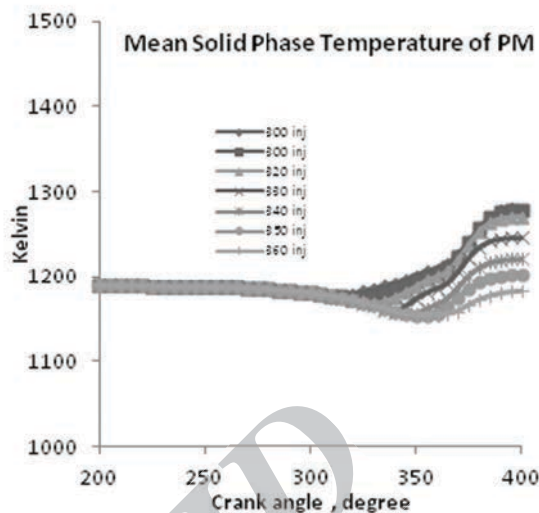


شکل ۱۵ توزیع جزء جرمی میانگین متان در استوانه برحسب زاویه لنگ



شکل ۱۶ توزیع جزء جرمی میانگین مونوکسید کربن در استوانه برحسب زاویه لنگ

شکل (۱۶) و (۱۷) جزء جرمی میانگین CO و NO داخل استوانه را بر حسب زاویه لنگ را نشان می‌دهد. مونوکسید کربنی که در حین فرآیند احتراق تولید می‌شود با شروع پاشش به‌طور یکنواخت افزایش پیدا می‌کند و به مقدار بیشینه خود می‌رسد و با کامل شدن احتراق، مونوکسید کربن به دی اکسید کربن تبدیل می‌شود که این پدیده در عملکرد مشعل‌ها با استفاده از محیط متخلخل اتفاق می‌افتد ولی بر اثر ماهیت ناپایایی



شکل ۱۴ توزیع دمای میانگین در حالت جامد محیط متخلخل برحسب زاویه لنگ

بیشینه دما در محیط متخلخل حدود ۱۴۶۰ کلوین در حالت سیال و در زاویه ۳۷۰ درجه زاویه لنگ و ۱۲۸۰ کلوین در حالت جامد است که در زاویه ۳۹۰ درجه اتفاق می‌افتد و در زمانهای پاشش بین ۳۳۰ تا ۳۶۰ درجه بیشینه دمای حالت سیال و جامد محیط متخلخل کاهش پیدا می‌کند و در پاشش در نقطه مکث بالا تغییر چشمگیری در افزایش دما دیده نمی‌شود که علت آن احتراق ناقص است. همانطور که در فرآیند احتراق دیده می‌شود، دمای حالت سیال گرم‌تر از حالت جامد است و حرارت به‌وسیله حالت جامد به علت ظرفیت حرارتی بالای آن جذب می‌شود و از این رو از افزایش دمای زیاد سیال جلوگیری می‌کند. در تزریق سوخت در نقطه مکث بالا افزایش چشمگیری در مقدار دما انجام نمی‌گیرد.

شکل (۱۵) جزء جرمی میانگین متان را در محفظه احتراق برای شش زمان پاشش دیده می‌شود. جزء جرمی متان موجود در محفظه بعد از ۱۰ درجه بعد از زمان پاشش سوخت به مقدار بیشینه خود می‌رسد و بعد به علت کاهش شدید اکسیژن نرخ واکنش کاهش چشمگیری دارد. از نمودار نتیجه گیری می‌شود که سوخت خیلی سریع بعد از پاشش مصرف می‌شود، اما به دلیل نبود اکسیژن کافی مقداری از سوخت پاشیده شده داخل استوانه باقی می‌ماند. این متان نسوخته داخل استوانه مساله مهمی است که باید به روشی احتراق آن حل شود. مقدار جزء جرمی متان در زاویه‌های پاشش بین ۳۰۰ تا ۳۲۰ درجه کمترین مقدار است (حدود ۰/۰۰۲). ولی با پاشش دیر هنگام بین ۳۳۰ تا ۳۶۰ درجه مقدار آن در انتهای احتراق افزایش می‌یابد. از این رو نتیجه گیری می‌شود که پاشش دیر

۶- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی سه‌بعدی دینامیک سیالات محاسباتی محیط متخلخل در موتور احتراق داخلی با پاشش سوخت متان در محیط متخلخل داغ، با استفاده از برنامه تصحیح شده KIVA-3V انجام شده است. کاتوره‌های جزء جرمی متان، اکسیژن، دی‌اکسیدکربن و توزیع دما در هر دو حالت جامد و سیال محیط متخلخل و داخل استوانه نشان داده شده است. همچنین اثر زمان پاشش روی فشار و دمای میانگین هر دو حالت محیط متخلخل و داخل استوانه و جزء جرمی CO و NO در مقابل زاویه لنگ آورده شده است. این نتایج در انتها بدست آمده است:

(۱) احتراق با مخلوط بسیار رقیق (نسبت تعادلی ۰/۱۷) در موتورهای احتراق داخلی با استفاده از فناوری محیط متخلخل ممکن است این در حالی است که در کارکرد موتور معمولی با چنین نسبت تعادلی احتراق امکان پذیر نیست.

(۲) قسمتی از سوخت متان تزریق شده به علت نبود اکسیژن کافی در دسترس متان در احتراق شرکت نمی‌کند ولی زمان پاشش بین ۳۰۰ تا ۳۲۰ درجه کمترین مقدار متان نسوخته را دارد و از این رو این محدوده پاشش مناسب است.

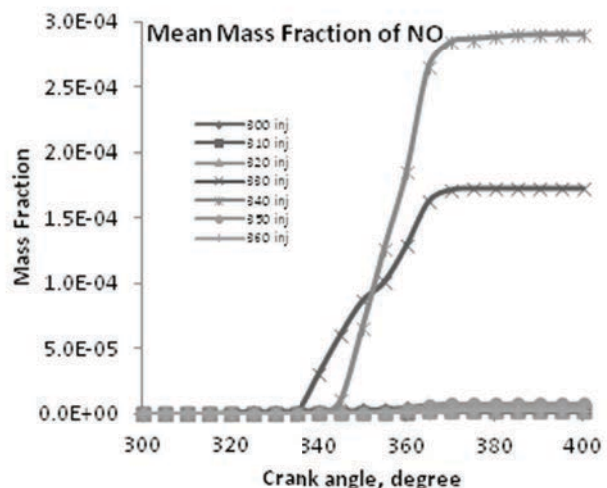
(۳) هندسه مکعبی و ساختاری با گوشه‌های قابلیت نفوذ اکسیژن کافی از استوانه به محیط متخلخل را به دلیل افت فشار، ناشی از گوشه‌های قائم آن در خود را ندارند و باید از افشانه airassist استفاده شود.

(۴) توزیع فشار و دما داخل استوانه به زمان پاشش بین ۳۰۰ تا ۳۳۰ درجه وابسته نیست ولی تزریق دیر هنگام متان باعث افزایش CO و NO_x و یا احتراق ناقص می‌شود.

(۵) بعد از زاویه لنگ ۴۰۰ درجه، مقداری از سوخت داخل استوانه باقی می‌ماند که اشاره به مقدار متان، نسوخته دارد.

(۶) بعد از ۳۷۰ درجه زاویه لنگ که در آن دمای بیشینه سیال در محیط متخلخل اتفاق می‌افتد، حالت جامد محیط متخلخل با جذب حرارت آزاد شده از افزایش دمای سیال و از این رو از تولید مونوکسید نیتروژن جلوگیری می‌کند

احتراق در محیط متخلخل، که مدت آن کوتاه است، زمان کافی برای تبدیل شدن تمامی مونوکسید کربن به دی‌اکسید کربن دیده نمی‌شود که این تفاوت عمده بین محیط مشعل محیط متخلخل و موتور محیط متخلخل است و زمان پاشش بین ۳۰۰ تا ۳۲۰ درجه، مقدار تولید CO کمترین مقدار است و در حالت پاشش ۳۵۰ و ۳۶۰ درجه به علت احتراق ناقص، مقدار CO کمتر شده و این نتایج با شکل (۱۵) سازگار است. از این رو زمانهای پاشش دیرتر از این زمان مناسب نیست. مقدار NO در ابتدای شبیه‌سازی قابل صرف نظر است زیرا به علت دمای سرد داخل استوانه مقدار آن قابل صرف نظر است. با افزایش دمای داخل محفظه احتراق به مقدار آن افزایش پیدا می‌کند ولی به علت اینکه بیشینه دما خیلی کمتر از بیشینه دمای میانگین در موتورهای عادی است (کمتر از ۱۸۰۰ کلوین)، تولید اکسید نیتروژن خیلی کمتر از موتورهای عادی است و بعد از زمان ۳۷۰ درجه لنگ که زمان بیشینه دما در حالت سیال محیط متخلخل است، تغییر زیادی نمی‌کند و رفتار آن مانند CO است و زمان پاشش دیر تر از ۳۲۰ درجه زاویه لنگ منجر به افزایش شدید NO_x می‌شود که علت آن ناکافی بودن زمان تبادل حرارت بین حالت جامد و حالت گاز در محیط متخلخل است و در زاویه‌های پاشش ۳۵۰ و ۳۶۰ درجه مقدار آن بسیار کم است که دلیل آن انجام نشدن احتراق و در نتیجه کم بودن دما است.



شکل ۱۷ توزیع جزء جرمی میانگین مونوکسید نیتروژن در استوانه برحسب زاویه

لنگ

فهرست اختصارات

BDC	نقطه مکث پایین
c_p	گرمای ویژه مخلوط
c_s	گرمای ویژه حالت جامد محیط متخلخل
$D_{ }^d$	ضریب پخش حرارت در محیط متخلخل
D_{im}	ضریب نفوذ جزء جرمی i در مخلوط
h_i	انتالپی جزء i ام
h_v	ضریب انتقال حرارت جابجایی محیط متخلخل
k_g	ضریب هدایت حرارتی سیال
k_s	ضریب هدایت حرارتی حالت جامد
P	فشار
Pe	عدد پکلت
q_r	انتقال حرارت تشعشع در حالت جامد
R	ثابت گازهای مخلوط
TDC	نقطه مکث بالا
T_g	دمای گاز
T_s	دمای حالت جامد
u	بردار سرعت
\bar{W}_i	جرم مولکولی جزء i ام
\bar{W}	جرم مولکولی مخلوط
X_i	جزء مولی گونه i
V_i	سرعت نفوذ جزء i ام
Y_i	جزء جرمی جزء i
ρ_g	چگالی مخلوط
ε	پروزیته محیط متخلخل
$\dot{\omega}_i$	نرخ واکنش i ام
ρ_s	چگالی محیط متخلخل
σ	بردار تنش سیال
μ	لزجت دینامیکی

References:

- 1- Polasek M, Macek J., "Homogenization of combustion in cylinder of CI engine using porous medium", SAE Paper, 2003-01-1085, 2003.
- 2- Stanglmaier R. H., Roberts C. E., "Homogeneous charge compression ignition: benefits, compromises and future engine applications", SAE paper, 1999-01-3682, 1999.
- 3- Weclas. M, "Potential of porous medium combustion technology as applied to internal combustion engine ", MECA/AECC Meeting, Nurnberg, 2001.
- 4- Durst. F, Weclas M., "Strategy for intelligent internal combustion engine with homogeneous combustion in cylinder", MECA/AECC Meeting, Nurnberg, 2003.
- 5- Trim D., Durst F., "Combustion in porous medium – advances and application", Combust Sci. and Tech., Vol 121, pp. 153-168, 1996.
- 6- Kamal A. A., Mohammad A. A., " Combustion in porous media", Proc. IMeche, Vol. 220, pp. 478-509, 2006.
- 7- Durst F., Weclas M., "A new type of internal combustion engine based on the porous medium technology ", Proc Inst Mech Eng, Vol 215, pp. 63-81, 2001.
- 8- Durst. F, Weclas. M, "A new Concept of I.C engine with homogeneous combustion in a porous medium", The Fifth International Symposium on Diagnostic and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines, Nagoya, 2001.
- 9- Park C. W., Kaviany M., "Evaporating combustion affected by In cylinder reciprocating porous regenerator", ASME J. Heat Transfer, Vol 124, pp. 184-194, 2002.
- 10- Le D. C., Chein C. J., Kwak Y. H., "Improving surface characteristic of porous media reactor in diesel engine by plasma technology", F2006C27, 2006.
- 11- Weclas M., Faltermeier R., "Diesel jet impingement on small cylindrical obstacles for mixture homogenization by late injection strategy", Int. J. Engine Res, Vol 8, pp. 399-413, 2007.
- 12- Zhigou Z., Mahozhao X., "Numerical study on the compression ignition of a porous medium engine", Springer, Vol. 51, No.3, pp. 277-287, 2008.
- 13- Zhigou Z., Mahozhao X., "Numerical simulation about interaction between pressure swirl spray and hot porous medium ", Energy Conversion & Management, Vol 49, pp. 1047-1055, 2008.
- 14- Hongsheng L., Maozaho X., Shi C., Hong L., " Simulation of porous media engine using a two-zone combustion model ", SAE Paper, 2008-01-1516, 2008.
- 15- Hongsheng L., Maozaho X., Shi C., Hong L., " Regenerative cycle in porous medium engine", J. Energy Conversion and Management, Vol. 59, pp. 273-303, 2009.
- 16- Amsden., A. A., O'Rourke, P. J., and Butler, T. D., 1989, " KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays", Los Alamos National Laboratory Report LA-11560-MS, Los Alamos.
- 17- Mohammadi, A., Numerical Simulation of Spark Ignition Engines, Numerical Simulations – Examples and Applications in Computational Fluid Dynamics, InTech, Austria, 2010.
- 18- Wakao, N. and Kagueli, S., Heat and Mass Transfer in Packed Beds, Gordon and Breach Science Publications, New Yourk, 1982.
- 19- Modest, M., F., Radiative Heat Transfer, Academic Press, California, USA, 2003.
- 20- Y. Ra, S. C. Kong, R. D. Reitz, C. J. Rutland, Z. Han, Multi Dimebsional Modeling of Transient Gas Jet Injection using Coarse Computational Grids, SAE Ppare 2005-01-0208.
- 21- A. Ferrenberg, B. E. Williams, Progress in the development of regenerated diesel engine, SAE 961677.
- 22- S. Zhdanok, Super Adiabatic Combustion of methane air mixture under filtration in a Packed Bed, Combustion and Flame, Vol. 100, pp. 221-231, 1995.