



مدل سازی عددی افشانه پاشش مستقیم ترکیب بیواتانول و بنزین در محفظه‌ی احتراق

محمد مهدی نقی زاده¹، امیررضا قهرمانی²، محمدحسن سعیدی^{3*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی 11155-9567، saman@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 آبان 1393

پذیرش: 18 بهمن 1393

ارائه در سایت: 06 اسفند 1393

کلید واژگان:

موتورهای احتراق پاشش مستقیم

بنزین

بیواتانول

خصوصیات پاشش

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی رفتار پاشش بیواتانول در یک محفظه احتراق، به عنوان یک سوخت تجدیدپذیر و کاهنده‌ی آلاینده‌هایی مانند اکسیدهای نیتروژن و مونوکسیدکربن، و ترکیبات آن با بنزین می‌باشد. بدین منظور خصوصیات ماکروسکوپی و میکروسکوپی اسپری و نیز مقدار جرم بخار شده‌ی سوخت پس از پاشش در نازل به صورت عددی و به کمک نرم‌افزار فایر مدل سازی و مورد تحلیل قرار گرفت. یافته‌های مدل سازی نشان می‌دهد که افزایش مقدار بیواتانول موجود در ترکیب سبب افزایش جرم سوخت بخار شده، زاویه مخروطی اسپری، مساحت اسپری و قطر متوسط سوتر می‌شود. این در حالی است که طول نفوذ اسپری تقریباً ثابت باقی می‌ماند. همچنین افزایش فشار تزریق سوخت از یک سو سبب افزایش جرم بخار شده‌ی سوخت، طول نفوذ پاشش و مساحت آن و از سوی دیگر سبب کاهش زاویه‌ی مخروط پاشش و قطر متوسط سوتر در همه‌ی سوخت‌های مورد بررسی می‌گردد. چنانچه میزان انرژی ورودی و مدت زمان پاشش ثابت بماند، نتایج حاصله با حالتی که شرایط محیطی ثابت در نظر گرفته شود، تفاوت قابل ملاحظه‌ای خواهد کرد. در این حالت بیواتانول، نسبت به بنزین، دارای جرم سوخت تبخیر شده‌ی بیشتر، طول نفوذ و مساحت پاشش بزرگتر و زاویه‌ی مخروط پاشش و قطر متوسط سوتر کوچکتری است. افزایش محسوس طول نفوذ اسپری و مساحت پاشش در این حالت، احتمال آن که پاشش سوخت به بیستون و یا دیواره‌های سیلندر برخورد کند و در نتیجه‌ی آن مقدار هیدروکربن‌های نسوخته افزایش و بازده‌ی موتور کاهش یابد، را افزایش می‌دهد.

Numerical simulation of spray characteristics of bio-ethanol and its blend with gasoline in a direct injection combustion chamber

Mohammad Mehdi Naghizadeh, Amirreza Ghahremani, Mohammad Hassan Saidi*

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 11155-9567 Tehran, Iran, saman@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 19 November 2014
Accepted 07 February 2015
Available Online 25 February 2015

Keywords:

Gasoline direct engine
Gasoline
Bio-ethanol
Spray Characteristic

ABSTRACT

In this study, spray behavior of bio-ethanol as a regenerative fuel that reduces emissions such as NO_x and CO is investigated in a combustion chamber and compared to its different blends with gasoline. For this purpose, microscopic and macroscopic spray characteristics and also evaporated fuel mass after the injection are modeled and investigated using Fire 2013. It is concluded by increasing bio-ethanol content in the fuel, evaporated fuel mass, spray cone angle, spray area and sauter mean diameter increases, however spray tip penetration remains roughly constant. Increase of injection pressure, decreases spray cone angle and sauter mean diameter and increases evaporated fuel mass, spray area and spray tip penetration. If the energy content and time of injection of bio-ethanol and gasoline be equivalent the results vary significantly compared to previous cases. In this case bio-ethanol has a longer spray tip penetration and spray area, higher fuel mass evaporated and smaller spray cone angle and sauter mean diameter compared to gasoline. The increased spray tip penetration and spray area in this case may lead to piston impingement and bore wetting resulting increased hydrocarbon emissions and decreasing engine efficiency.

1- مقدمه

عمده‌ی تحقیقات اولیه پیرامون موتورهای احتراق داخلی، معطوف به افزایش توان و بازده این موتورها، کاهش ابعاد و روش‌های بهبود کیفیت سوخت بوده است. اما امروزه غالب پژوهش‌ها در این زمینه، بر کاهش آلاینده‌های خروجی و استفاده سوخت‌های تجدید پذیر با حفظ بازدهی، ابعاد و توان موتورهای احتراق داخلی متمرکز است.

هرچند کماکان، رایج‌ترین سوخت مصرفی در موتورهای جرقه‌ای¹ و موتورهای پاشش مستقیم بنزینی² بنزین می‌باشد، اما از آن‌جا که بنزین یک سوخت تجدیدناپذیر است، در آینده‌ای نه چندان دور باید سوخت جدیدی، جایگزین بنزین شود. در غیر این صورت امکان بکارگیری این نوع موتورها از

1- Spark-ignition engines
2- Gasoline direct engines

Please cite this article using:

M.M. Naghizadeh, A.R. Ghahremani, M.H. Saidi, Numerical simulation of spray characteristics of bio-ethanol and its blend with gasoline in a direct injection combustion chamber, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 112-122, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بین خواهد رفت.

استفاده از بیواتانول بعنوان یک سوخت تجدید پذیر برای راه‌اندازی موتورهای جرقه‌ای و موتورهای پاشش مستقیم مزایا و معایب مختلفی نسبت به بنزین دارد. مزیت اصلی آن همان تجدیدپذیر بودن آن است چرا که می‌توان آن را از جلبک‌ها و یا دانه‌های ذرت، شکر و نی‌شکر استخراج کرد [4-1]. از مزایای دیگری بیواتانول نسبت به بنزین می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (1) بالاتر بودن عدد اکتان بیواتانول اجازه می‌دهد که بیواتانول در نسبت تراکم بالاتری کار کند که این امر افزایش بازده موتور را در پی خواهد داشت [1-5]. (2) کاهش آلاینده‌های مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته به دلیل خاصیت اکسیدکنندگی بیواتانول زیرا 34/7 درصد جرمی بیواتانول را اکسیژن تشکیل می‌دهد [1، 6-8]. (3) کاهش اکسیدهای نیتروژن خروجی از محفظه‌ی سیلندر چرا که بالاتر بودن گرمای تبخیر بیواتانول سبب کاهش دمای احتراق و در نتیجه کاهش اکسیدهای نیتروژن خروجی می‌شود [1، 6، 7، 9]. (4) کاهش مقدار دی‌اکسیدکربن خروجی اگر کل چرخه‌ی تولید به مصرف بیواتانول و بنزین در نظر گرفته شوند [10]، گرچه به دلیل بهبود کیفیت احتراق دی‌اکسیدکربن خروجی از موتوری که با سوخت بیواتانول کار می‌کند بیش‌تر از دی‌اکسیدکربن موتوری است که با بنزین کار می‌کند [6] و (5) سوختی ایمن برای انتقال و ذخیره به دلیل بالاتر بودن دمای خوداشتعالی بیواتانول نسبت به بنزین [1].

گرچه بزرگترین عیب استفاده از بیواتانول هزینه‌ی بالای تولید این سوخت می‌باشد و به همین دلیل امروزه از آن به وفور استفاده نمی‌شود، اما استفاده از بیواتانول معایب دیگری نیز دارد، از جمله: (1) افزایش تولید بیواتانول می‌تواند به افزایش جنگل‌زدایی منجر شود [11]، (2) تولید بیواتانول از دانه‌های کشاورزی سبب افزایش قیمت این محصولات و کاهش امنیت غذایی جهان خواهد شد، (3) ارزش حرارتی بیواتانول بر پایه‌ی حجم در حدود 65 درصد بنزین است [2، 1، 12]، (4) بیواتانول سبب خوردگی اجزای مسی، آلومینیومی و برنجی می‌شود چرا که به هر مقداری در آب حلال است [13، 1، 18] و (5) راه‌اندازی موتور سرد با سوخت بیواتانول به دلیل فشار بخار پایین آن امکان‌پذیر نیست [14].

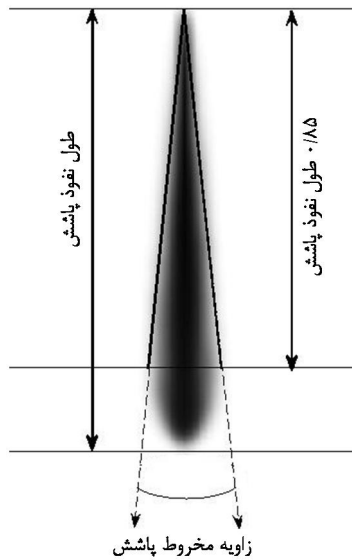
با استفاده از مخلوط بنزین و بیواتانول به عنوان یک سوخت، برخی از معایب بیواتانول مانند مشکلات خوردگی و عدم امکان راه‌اندازی در هوای سرد از بین می‌رود و اثر بقیه‌ی معایب کمرنگ می‌شود. از طرف دیگر استفاده از مخلوط بنزین و بیواتانول بعنوان یک سوخت سبب بهره‌مندی نسبی از تمامی مزیت‌های ذکرشده‌ی بیواتانول خواهد شد. به همین دلیل امروزه سوخت‌های ترکیبی متفاوتی از بنزین و بیواتانول مانند بیواتانول 5 درصد (سوختی که پنج درصد حجمی آن بیواتانول و مابقی بنزین است)، بیواتانول 10، 20، 25، 70، 75 و 85 درصد معرفی و بطور تجاری در برخی از کشورهای دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به مزیت‌های ذکر شده و اثبات آلاینده‌ی آب‌های زیر زمینی به دلیل استفاده از اکتان‌افزای ام تی ای بی¹ در بنزین [15] انتظار می‌رود تا مصرف سوخت ترکیبی بنزین و بیواتانول افزایش قابل ملاحظه‌ای در سال‌های آتی داشته باشد. مخصوصاً که استفاده از سوخت زیستی در سبد سوخت کشور در آینده نیز پیش‌بینی گردیده است. از طرفی دیگر انتظار می‌رود که استفاده از موتورهای پاشش مستقیم بنزینی نیز به دلیل کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، عملکرد بهتر و بازده بالاتر، به تدریج با کاهش هزینه‌های ساخت موتور افزایش پیدا کند. بنابراین ضروری به نظر می‌رسد تا درک درستی از رفتار و خصوصیات پاشش بیواتانول در

محفظه‌ی احتراق وجود داشته باشد. زیرا رفتار پاشش یا به طور معادل کیفیت اختلاط هوا و سوخت درون موتور اثر مستقیمی بر کیفیت احتراق، بازده و میزان آلاینده‌های خروجی از موتور دارد.

ژائو و همکارانش [4] به بررسی آزمایشگاهی طول نفوذ پاشش² و زاویه‌ی مخروط پاشش³ در سوخت‌های بنزین، بیواتانول، بیواتانول 25 درصد، بیواتانول 50 درصد و بیواتانول 75 درصد در انژکتور چرخشی⁴ و در دمای محیط پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در فشار محیطی 100 کیلو پاسکال با افزایش مقدار بیواتانول موجود در سوخت طول نفوذ کاهش و زاویه‌ی مخروط پاشش افزایش پیدا می‌کند. هرچند چنانچه فشار محیط به 500 کیلوپاسکال افزایش پیدا کند، طول نفوذ و زاویه‌ی مخروط پاشش سوخت‌های مختلف تقریباً برابر خواهد بود و تنها زاویه‌ی مخروط پاشش بنزین در ابتدای کار از بقیه‌ی سوخت‌ها بیشتر خواهد بود. پارک و همکارانش [3] به بررسی عددی و آزمایشگاهی خصوصیات پاشش و اتمیزاسیون سوخت‌های بنزین، بیواتانول و بیواتانول 85 درصد پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سوخت‌های مورد بررسی دارای طول نفوذ پاشش یکسان هستند. همچنین زاویه‌ی مخروط پاشش و عرض پاشش⁵ در بیواتانول بیش از دو سوخت دیگر می‌باشد و قطر قطرات سوخت بیواتانول از دیگر سوخت‌ها بیشتر می‌باشد. امیررودین و همکارانش [16] به مشاهده و بررسی پاشش در سوخت‌هایی با نسبت‌های مختلف بنزین و بیواتانول پرداختند. تصاویر پاشش به وسیله‌ی تکنیک شیلرین⁶ گرفته شد و نفوذ نوک پاشش و زاویه‌ی مخروط پاشش از روی آن به دست آمد. آن‌ها با انجام آزمایش به این نتیجه رسیدند، که پاشش یک حالت چتری شکل دارد و هرچه مقدار بیواتانول موجود در سوخت بیشتر باشد، مسافت نفوذ کمتر و زاویه‌ی مخروط پاشش بزرگتر خواهد شد. مخصوصاً چنانچه مدت زمانی در حدود 3 میلی‌ثانیه از پاشش بگذرد تا زمان لازم برای تبخیر بیواتانول به وجود آمده باشد. همچنین در میان سوخت‌های آزمایش شده چنانچه 55 درصد سوخت بیواتانول و مابقی بنزین باشد، مساحت پاشش⁷ ماکزیمم خواهد بود. در مطالعه‌ی دیگر ماتسوموتو و همکارانش [12] به بررسی تجربی و عددی مخلوط سوخت بنزین و بیواتانول پرداختند. بدین منظور آن‌ها از سه سوخت بیواتانول، بنزین و بیواتانول 50 درصد استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش فشار تزریق، تولید بخار در ناحیه‌ی نوک پاشش بهتر صورت می‌گیرد. همچنین چنانچه دمای محیط و یا سوخت افزایش پیدا کند، در حالتی که فشار محیط پایین باشد، پدیده‌ی جوشش ناگهانی⁸ دیده می‌شود حال آن‌که چنانچه فشار بالا رود این پدیده دیگر مشاهده نمی‌گردد. همچنین در پاشش سوخت بیواتانول، تبخیر دیرتر از بنزین صورت گرفته است چرا که اجزای سبک‌تر بنزین سریعتر بخار می‌شوند اما در نهایت بیواتانول زودتر تبخیر خواهد شد زیرا بنزین دارای اجزایی بسیار سنگین‌تر از بیواتانول است. همچنین هنگامی که انرژی پاشش سوخت، ثابت در نظر گرفته شود، بیواتانول بیشترین و بنزین کمترین مساحت سوخت تصویر و طول نفوذ را دارد. پارک و همکارانش [17] در مطالعه‌ی دیگر به بررسی خصوصیات پاشش و احتراق در سوخت‌های ترکیبی بیواتانول و دیزل پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هرچند بیواتانول سبب افزایش تاخیر اشعال و کاهش بازده می‌شود اما به دلیل خاصیت خنک‌کنندگی اتانول مقدار اکسیدهای نیتروژن تولیدی کاهش پیدا می‌کند و مقدار مونوکسیدکربن تولیدی و هیدروکربن‌های نسوخته نیز کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزودن بیواتانول

2- Spray tip penetration
3- Spray cone angle
4- Swirl-type injector
5- Spray width
6- Schlieren imaging technique
7- Spray area
8- Flash boiling

1- MTBE



شکل 1 تعریف شماتیک طول نفوذ پاشش و زاویه مخروط پاشش.

3- روش شبیه سازی پاشش

در این تحقیق، شبیه سازی پاشش سوخت در محفظه احتراق بصورت عددی توسط نرم افزار فایر که یک نرم افزار تخصصی برای مدل سازی پاشش سوخت است، انجام شده است. همچنین برای اطمینان از صحت شبیه سازی طول نفوذ و زاویه مخروط بنزین با نتایج تجربی قهرمانی [20] مقایسه شده است.

3-1- بررسی مدل عددی

در حالت کلی معادله مومنوم بصورت رابطه (1) است:

$$m_a \frac{du_{id}}{dt} = F_{idr} + F_{igr} + F_{ip} + F_{ib} \quad (1)$$

که در رابطه (1) F_{idr} نیروی پسا، F_{igr} اثرات نیروی گرانش و شناوری، F_{ip} نیروی فشاری و F_{ib} بیان کننده سایر نیروهای حجمی از جمله نیروهای الکترومغناطیس می باشد. با مقایسه با نیروی پسا صرف نظر کرد. به این ترتیب تنها نیروی با اهمیت در پاشش سوخت نیروی پسا می باشد. با در نظر گرفتن این نیرو معادله مومنوم را می توان به شکل (2) بازنویسی کرد:

$$\frac{du_{id}}{dt} = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_g}{\rho_d} \frac{1}{D_d} |u_{ig} - u_{id}| (u_{ig} - u_{id}) + \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_d}\right) g_i \quad (2)$$

با توجه به معادله (2) می توان سرعت ذره را تعیین کرد. بدین ترتیب با داشتن سرعت و استفاده از معادله (3) و با انتگرال گیری نسبت به زمان می توان مکان ذره را در زمان دلخواه تعیین نمود.

$$\frac{dx_{id}}{dt} = u_{id} \quad (3)$$

در شبیه سازی پاشش در موتورهای پاشش مستقیم، برای برخورد و انعقاد قطرات، از پیشرفته ترین مدل موجود در نرم افزار که مدل نوردین⁴ باشد، استفاده شده است. عمده مزیت این مدل نسبت به مدل ارونکه⁵ عدم وابستگی به اندازه شبکه بندی می باشد. در این روش با دانستن مکان و سرعت هر ذره که از طریق معادله (3) امکان پذیر است، حداقل فاصله میان دو ذره و مقدار زمان لازم برای طی این مسافت به دست می آید. سپس با توجه به مدل نوردین مقدار احتمال برخورد تعیین گشته و یک عدد تصادفی بین صفر و یک انتخاب می گردد. اگر عدد تصادفی انتخاب شده کمتر

به سوخت، طول نفوذ پاشش تغییری نمی کند اما زاویه مخروط پاشش افزایش می یابد. همچنین قطر متوسط سوتر¹ کاهش و در نتیجه اتمیزاسیون بهبود می یابد. کاتاپانا و همکارانش [18] خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سوخت های بنزین و بیواتانول را در یک موتور پاشش مستقیم مورد بررسی قرار دادند. آن ها با تغییرات روی بار و سرعت موتور به بررسی اثرات آن ها روی عملکرد موتور، آلاینده های خروجی و پارامترهای پاشش پرداختند. آن ها به این نتیجه رسیدند که حساسیت بیواتانول روی فشار تزریق بیش از بنزین می باشد. همچنین یکی از بهترین راهکارها برای کاهش آلاینده های خروجی بدون کاهش بازده، تزریق بیواتانول با فشار بالا به عنوان سوخت به محفظه احتراق می باشد. همچنین برای فشار تزریق بالا طول نفوذ پاشش اتانول و بنزین تقریباً با هم برابر است اما در فشارهای تزریق پایین اتانول دارای طول نفوذ بزرگتری نسبت به بنزین می باشد. چن و نیشیدا [19] به بررسی خصوصیات پاشش و احتراق سه نسبت مختلف بنزین و اتانول در یک محفظه احتراق با حجم ثابت پرداختند. آن ها به این نتیجه رسیدند که نرخ تبخیر اتانول بیشتر از بنزین می باشد. همچنین استفاده از مخلوط بنزین و بیواتانول کیفیت احتراق را نسبت به استفاده از بنزین بهبود می بخشد.

با توجه به مطالعات گذشته، در این پژوهش اثر افزایش نسبت بیواتانول موجود در ترکیب، در رفتار پاشش، اثر فشار تزریق بر میزان جرم بخار شده ی سوخت پس از پاشش و خصوصیات ماکروسکوپی و میکروسکوپی پاشش و همچنین تغییرات این خصوصیات با ثابت بودن کل انرژی ورودی به محفظه احتراق در مدت زمان پاشش سوخت ثابت به طور کامل بررسی شده است. بدین منظور سوخت های بنزین، بیواتانول خالص، بیواتانول 10 درصد و بیواتانول 85 درصد بصورت عددی توسط نرم افزار فایر² و برنامه ی کامپیوتری در نرم افزار متلب³ شبیه سازی شده اند. لازم به ذکر است که طول نفوذ پاشش، زاویه ی مخروط پاشش و مساحت پاشش بعنوان خصوصیات ماکروسکوپی و قطر متوسط سوتر بعنوان خصوصیت میکروسکوپی مورد بررسی قرار گرفته اند.

2- تعاریف

در بررسی پاشش سوخت، طول نوک نفوذ (طول نفوذ پاشش) برابر فاصله میان سوراخ نازل و نوک پاشش است. همچنین مساحت پاشش نیز مساحت تصویر شده ی پاشش روی یکی از صفحاتی که محور نازل را شامل می شود، در نظر گرفته می شود. زاویه ی مخروط پاشش، زاویه ای با راس نازل است که در فاصله ای مشخص، محیط بیرونی پاشش را پوشش دهد. در این پژوهش به منظور امکان مقایسه ی دقیق تر داده های عددی و تجربی زاویه ی مخروط پاشش به کمک خطی که فاصله ی آن از مرکز نازل تقریباً 0/85 طول نفوذ پاشش می باشد، بدست آمده است. شکل 1 مقدار طول نفوذ و زاویه ی مخروط پاشش را بصورت شماتیک نشان می دهد. همچنین قطر متوسط سوتر یک ذره برابر قطر کره ای است که نسبت حجم به مساحت آن با نسبت حجم به مساحت ذره ی مورد نظر برابر باشد. به این ترتیب مقدار قطر متوسط سوتر هر ذره از تقسیم 6 برابر حجم ذره به مساحت ذره به دست می آید.

هرچه طول نوک نفوذ، زاویه ی مخروط و مساحت پاشش بیشتر و مقدار قطر متوسط سوتر کوچکتر باشد، سوخت در بخش وسیعتری از محفظه احتراق پاشیده شده و اتمیزاسیون بهتر صورت گرفته است. در نتیجه اختلاط هوا و سوخت بهتر و به تبع آن احتراق کامل تر، هیدروکربن های نسوخته کمتر و بازده بالاتر خواهد بود.

1- Sauter mean diameter
2- AVL Fire
3- Matlab

4- Nordin
5- O'Rourke

از مقدار احتمال باشد، آن‌گاه فرض می‌شود که برخورد صورت گرفته است و در غیر این صورت برخوردی صورت نمی‌گیرد. مدل‌سازی تیخیر سوخت درون محفظه توسط مدل‌های آبرامزون¹ برای سوخت‌های تک جزئی و مدل چندجزئی² برای سوخت‌های دو جزئی می‌باشد. مدل چند جزئی در واقع همان مدل آبرامزون است با این تفاوت که در این مدل انتقال جرم هر جز به طور جداگانه ولی انتقال حرارت به صورت یک مکانیزم کلی محاسبه می‌شود. در این مدل‌ها بر مبنای تئوری کلاسیک لایه‌مرزی، مقاومت‌ها در انتقال حرارت و انتقال جرم به صورت لایه‌های فرضی گازی با ضخامت ثابت مدل‌سازی می‌شوند. در این روش ابتدا عدد انتقال حرارت که B_T نام دارد، با توجه به گام زمانی قبلی، حدس زده می‌شود. سپس مقدار عدد ناسلت با توجه به رابطه‌ی (4) محاسبه می‌شود.

$$Nu = \frac{\dot{m}_d}{\pi \frac{k_g}{c_{pf}} D_d \ln(1 + B_T)} \quad (4)$$

حال با داشتن عدد ناسلت، عدد انتقال حرارت، با توجه به رابطه‌ی (5) به دست می‌آید:

$$B_T = (1 + B_y) \left(\frac{c_{pf} \times sh}{c_{pg} \times Nu \times Le} \right) \quad (5)$$

این روند سعی و خطا تا جایی ادامه می‌یابد که مقدار عدد انتقال حرارت فرض شده در ابتدای حل، با مقدار عدد انتقال حرارت به دست آمده از رابطه‌ی (5) برابر شود. حال با داشتن مقدار عدد انتقال حرارت، انتقال حرارت در این روش از رابطه‌ی (6) به دست می‌آید:

$$Q_s = \dot{m} \left(\frac{c_{pf}(T_\infty - T_s)}{B_T} - L(T_s) \right) \quad (6)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بزرگترین عیب این روش محاسبه‌ی انتقال حرارت با روش سعی و خطا می‌باشد.

در شبیه‌سازی پاشش در موتورهای پاشش مستقیم، برای انهدام قطرات دو مدل تب³ و ها-گوسمن⁴ پیشنهاد می‌شود. از آنجا که مدل ها-گوسمن برای تریق توسط نازل‌های چندسوراخه و مدل تب برای نازل‌های مخروط مناسب است، در این شبیه‌سازی از مدل تب استفاده شده است. در مدل تب هر قطره‌ی مرتعش به صورت یک سیستم جرم و فنر شبیه‌سازی می‌شود. کشش سطحی، ویسکوزیته‌ی مایع و نیروی آیرودینامیک گازهای اطراف به ترتیب به نیروی فنر، نیروی دمپر و نیروی خارجی وارد بر سیستم متناظر می‌شوند. در این مدل، معادله‌ی حرکت بی بعد شده‌ی مرکز قطره از رابطه‌ی (7) به دست می‌آید:

$$r^3 \ddot{y} + k_1 r \dot{y} + k_2 \sigma y = k_3 \rho_g r u^2 \quad (7)$$

که در این معادله k_j ها ضرایب ثابتی هستند که به نوع سیال بستگی داشته و از طریق آزمایش‌های تجربی و یا تحلیل‌های ریاضی به دست می‌آیند. در مدل تب، چنانچه γ که همان جابجایی بی‌بعد شده‌ی قطره‌ی مرتعش می‌باشد، بیشتر از یک به دست بیاید، فرض می‌شود که قطره منهدم شده و به قطرات کوچکتر تبدیل خواهد شد. سپس از طریق معادله‌های مومنتوم و انرژی قطر جدید قطرات منهدم شده محاسبه می‌شود [21,22].

3-2- پیش‌پردازش‌های انجام شده برای شبیه‌سازی

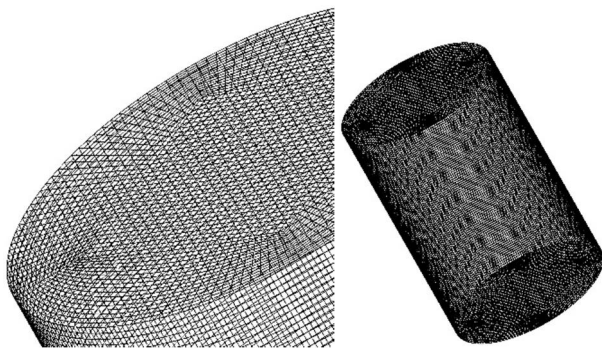
با توجه به این‌که هدف، مدل‌سازی پاشش سرد در یک محفظه‌ی احتراق برای موتورهای پاشش مستقیم بنزینی می‌باشد، بنابراین درون محفظه‌ی احتراق مانند مطالعات نیشیدا و همکارانش [23] یا پارک و همکارانش [24]

1- Abramzon
2- Multi-Component
3- Tab
4- Huh-gosman

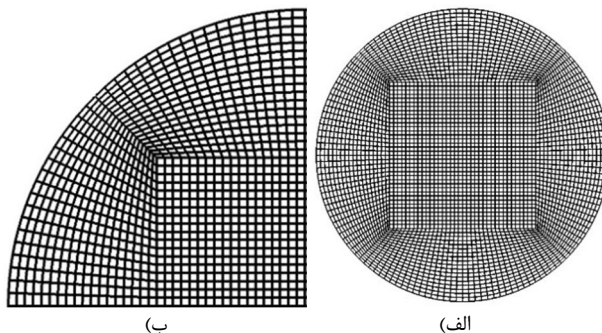
برای شبیه‌سازی پاشش نیز در جدول 2 آمده است. در هر شبیه‌سازی عددی، حل مورد نظر می‌تواند وابسته به تعداد شبکه‌های موجود و از این‌رو غیر دقیق باشد. با افزایش تعداد شبکه‌های موجود در هندسه، دقت حل افزایش اما سرعت حل عددی کم و مدت زمان محاسبات افزایش می‌یابد. به همین منظور لازم است که شبیه‌سازی با تعداد شبکه‌ی بهینه انجام شود. پارامتری که در این جا معیار تعیین استقلال از شبکه قرار گرفته است، طول نفوذ سوخت درون محفظه‌ی احتراق در فواصل زمانی 0/012 میلی‌ثانیه می‌باشد.

جدول 1 مشخصات سوخت‌های شبیه‌سازی شده

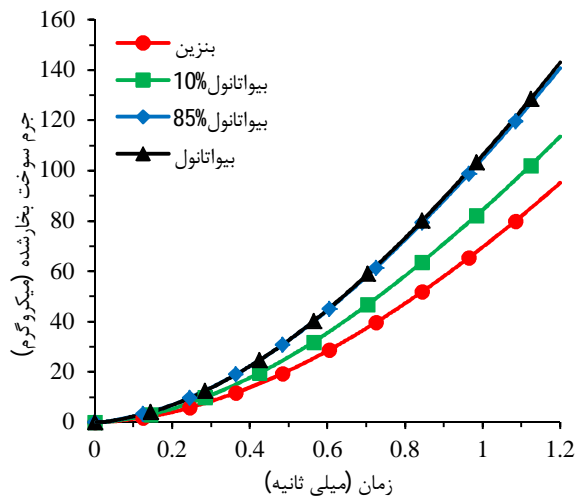
بنزین بیواتانول 10%	بیواتانول 85%	فرمول شیمیایی	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	درصد جرمی اتانول	درصد جرمی بنزین
C ₆ H ₆	C ₂ H ₅ OH	C ₈ H ₁₇	735	0	100
C ₂ H ₆	C ₂ H ₅ OH	C ₈ H ₁₇	789	100	0
C ₂ H ₆	C ₂ H ₅ OH	C ₈ H ₁₇	740	10/7	85/9
C ₂ H ₆	C ₂ H ₅ OH	C ₈ H ₁₇	781	14/1	89/3



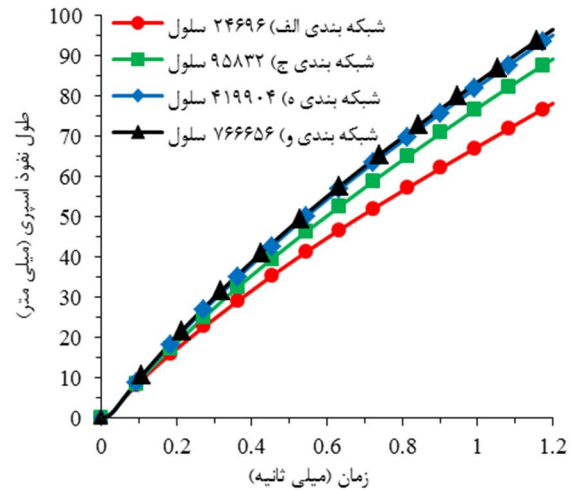
شکل 2 الف) قلمرو محاسباتی ب) نمای دقیق‌تر از قلمرو محاسباتی



شکل 3 الف) سطح مقطع قلمرو محاسباتی ب) نمای دقیق‌تر از شبکه‌بندی سطح مقطع قلمرو محاسباتی



شکل 5 جرم سوخت بخار شده در حین تزریق در فشار محیط 600 کیلوپاسکال و فشار تزریق 10 مگاپاسکال



شکل 4 نمودار طول نفوذ سوخت درون محفظه احتراق بر حسب زمان در شبکه بندی های مختلف

جدول 2 اطلاعات ورودی برای شبیه سازی پاشش سوخت

توضیحات	مشخصه
دیواره	شرایط مرزی
419904	تعداد سلول های محاسباتی
1/44	متوسط ابعاد هر سلول (میلی متر مکعب)
0/004	بازه زمانی (میلی ثانیه)
1/2	کل زمان پاشش (میلی ثانیه)
300	تعداد گام های زمانی
(0,0,0/059)	مختصات محل قرارگیری نازل
1	تعداد سوراخ های نازل
0/71	ضریب تخلیه نازل
0	قطر داخلی نازل (میلی متر)
0/3	قطر خارجی نازل (میلی متر)
0	زاویه پاشش سوخت از نازل

جدول 3 تغییرات طول نفوذ سوخت درون محفظه احتراق در شبکه بندی های مختلف

نام	تعداد سلول	نفوذ نسبت به شبکه بندی	تغییرات طول نفوذ	تغییرات طول نفوذ
شبکه بندی محاسباتی	قبل در فواصل	قبل در انتهای	زمانی 0/012 میلی ثانیه (%)	شبیه سازی (%)
الف	24696	-	-	-
ب	52488	8/2	8/2	8/2
ج	95832	4/9	4/9	4/5
د	197568	4/2	4/2	3/6
ه	419904	3/8	3/8	2/7
و	766656	2/2	2/2	1/5

همان طور که در جدول 3 و شکل 4 مشاهده می شود، شبکه در 419904 سلول استقلال از شبکه داشته و این تعداد شبکه مبنای انجام شبیه سازی قرار گرفته است.

3-3- محاسبه زاویه مخروط و مساحت پاشش

برای تعیین زاویه مخروط اسپری و مساحت اسپری لازم است، تا مرز میان هوا و سوخت در محفظه احتراق شبیه سازی شده به طور دقیق تعیین گردد. بدین منظور ابتدا شکل های ظاهری سوخت اسپری شده در زمان های مختلف که خروجی نرم افزار فایر هستند، به عنوان ورودی به نرم افزار متلب داده می شوند.

سپس به کمک دستور مربوطه شکل ظاهری پاشش به ماتریس شدت نور¹ تبدیل شده که با بررسی داده های این ماتریس می توان مرز بین سوخت و هوا را مشخص کرد. حال با تعیین مرز دقیق میان هوا و سوخت و داشتن شکل ظاهری اسپری سوخت می توان زوایای مخروط اسپری و مساحت اسپری را به طور دقیق محاسبه کرد.

4- نتایج و یافته های تحقیق

4-1- اثر افزایش نسبت بیواتانول موجود در ترکیب در رفتار پاشش

4-1-1- میزان جرم بخار شده

در شکل 5 میزان جرم بخار تولید شده از پاشش سوخت های بنزین، بیواتانول، بیواتانول 10 درصد و بیواتانول 85 درصد تا 1/2 میلی ثانیه پس از آغاز تزریق سوخت مشاهده می شود. با توجه به این شکل، میزان جرم بخار تولید شده با افزایش درصد حجمی بیواتانول افزایش پیدا کرده و در بیواتانول به بیشترین مقدار ممکن می رسد. با بررسی شکل 5، می توان نتیجه گرفت که در انتهای زمان پاشش مقدار جرم سوخت بخار شده در بیواتانول به ترتیب 1/5 درصد، 25/9 درصد و 50/3 درصد بیشتر از سوخت های بیواتانول 85 درصد، بیواتانول 10 درصد و بنزین می باشد.

دو عامل مهم که سبب افزایش مقدار جرم بخار شده می شوند عبارتند از:

الف) کل جرم ورودی سوخت به داخل محفظه سیلندر؛ مقدار دبی جرمی با فرض شرایط محیطی ثابت با $\sqrt{\rho_f}$ متناسب است. با توجه به جدول 1 چگالی سوخت های مورد بررسی با افزایش درصد حجمی بیواتانول افزایش می یابد و در نتیجه دبی جرمی سوخت نیز با افزایش درصد حجمی بیواتانول افزایش می یابد. افزایش دبی جرمی سبب می شود که سوخت بیشتری وارد محفظه احتراق شود و لذا مقدار جرم بخار تولید شده با افزایش درصد حجمی بیواتانول افزایش می یابد.

ب) با توجه به این که فرمول شیمیایی بیواتانول $C_{20}H_{42}O_2$ و فرمول شیمیایی متوسط بنزین در این مدل سازی C_8H_{17} می باشد، بیواتانول به طور متوسط دارای هیدروکربن های سبکتر و در نتیجه دمای جوش پایین تری نسبت به بنزین است. لذا برای تبخیر بیواتانول به انرژی کمتری مورد نیاز است. در نتیجه با افزایش میزان بیواتانول در سوخت، مقدار بیشتری از سوخت تبخیر خواهد شد.

1- Light intensity

4-1-2- خصوصیات ماکروسکوپی پاشش

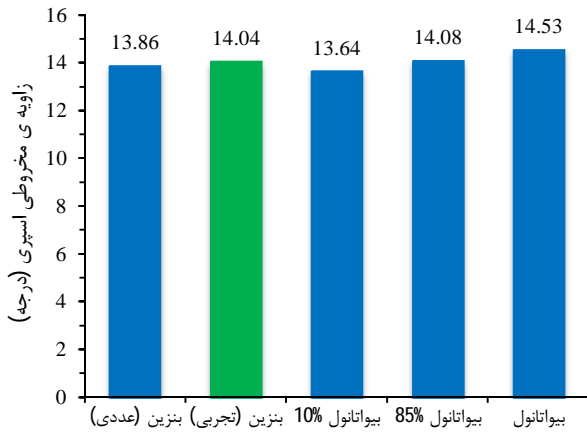
در شکل 6 زاویه‌ی مخروط سوخت‌های موردنظر پس از پایان پاشش مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، زاویه‌ی مخروط پاشش محاسباتی بنزین با زاویه‌ی مخروط پاشش بنزین که از آزمایش تجربی به دست آمده است، انطباق خوبی با یکدیگر دارند که نشان از صحت شبیه‌سازی موردنظر است. همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، بیواتانول دارای بیشترین زاویه‌ی مخروط و بیواتانول ده درصد، دارای کمترین زاویه‌ی مخروط می‌باشد. با توجه به شکل 5 با افزایش میزان بیواتانول در سوخت مقدار بیشتری از سوخت تبخیر می‌شود و از طرفی بخارات تولید شده با آزادی بیشتری از قطرات مایع مشابه حرکت خواهند کرد لذا از لحاظ تئوری انتظار می‌رود با افزایش میزان بیواتانول موجود در سوخت زاویه‌ی مخروط سوخت افزایش پیدا کند. هرچند در این قسمت این روند دقیقاً مشاهده نمی‌شود چرا که زاویه‌ی مخروط بیواتانول ده درصد کمتر از زاویه‌ی مخروط بنزین است که احتمالاً به خطای محاسبه‌ی زاویه‌ی مخروطی اسپری در برنامه‌ی کامپیوتری متلب باز می‌گردد.

در شکل 7 طول نفوذ پاشش سوخت‌های مورد بررسی در حین پاشش رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، طول نفوذ همه‌ی سوخت‌های مورد بررسی به جز بنزین با هم برابر بوده و طول نفوذ بنزین کمتر از سایر سوخت‌ها می‌باشد به طوری که پس از اتمام زمان پاشش، طول نفوذ سایر سوخت‌ها 3/9 درصد بیش‌تر از بنزین می‌باشد. همچنین طول نفوذ پاشش بنزین با داده‌های تجربی انطباق خوبی دارد و این نشان از اعتبار مدل‌سازی انجام گرفته می‌باشد. بنابراین علی‌رغم این که برخی از خصوصیات فیزیکی سوخت‌های بیواتانول و بنزین مانند کشش سطحی و ویسکوزیته، با هم تفاوت دارند و این خصوصیات هریک به تنهایی روی طول نفوذ پاشش تاثیر دارد، اما در نهایت مشاهده می‌شود که طول نفوذ پاشش بنزین و بیواتانول زمانی که فشار تزریق 10 مگا پاسکال و فشار محیط 600 کیلوپاسکال باشد، تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.

مساحت تصویرشده‌ی پاشش یکی از شاخصه‌های مهم در بررسی رفتار ماکروسکوپی پاشش می‌باشد چرا که در مساحت پاشش اثر طول نفوذ پاشش و زاویه‌ی مخروط پاشش دیده می‌شود. از آن‌جا که مساحت پاشش به طور مستقیم توسط نرم‌افزار فایر محاسبه نمی‌شود برای محاسبه‌ی آن از کدنویسی در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. با توجه به شکل 6 ترتیب بزرگی زاویه‌ی مخروط سوخت‌ها به ترتیب بیواتانول، بیواتانول 85 درصد، بنزین و بیواتانول ده درصد می‌باشد و با توجه به شکل 7 طول نفوذ سه سوخت بیواتانول، بیواتانول 85 درصد و بیواتانول 10 درصد برابر و کمی بیشتر از طول نفوذ بنزین می‌باشد. بنابراین، انتظار می‌رود، بیواتانول و بیواتانول 85 درصد مساحت پاششی بزرگتر از بنزین و بیواتانول 10 درصد داشته باشند، که همین روند در شکل 8 مشاهده می‌شود. بنابراین سوخت بیواتانول در شرایط محیطی خاص مورد بررسی دارای زاویه‌ی مخروط پاشش و مساحت پاشش بزرگتر و طول نفوذ بلندتر می‌باشد که تمامی این موارد می‌تواند به اختلاط بهتر هوا و سوخت منجر شود.

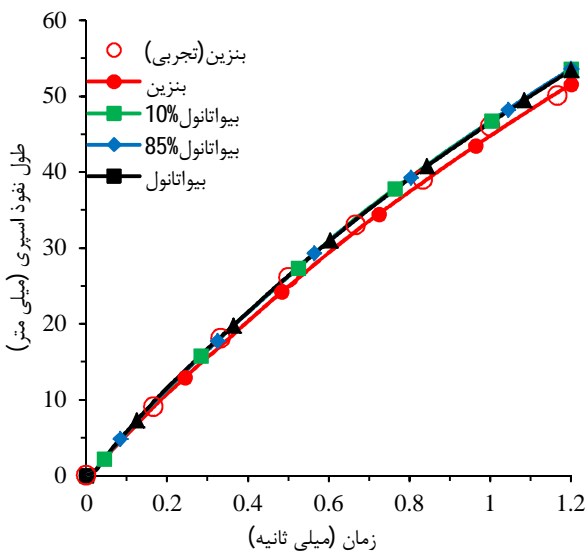
4-1-3- خصوصیت میکروسکوپی پاشش

در موتورهای پاشش مستقیم قطر متوسط سوتر سوخت اهمیت بالایی در کیفیت احتراق و ترکیبات گازهای خروجی دارد. در شکل 9 قطر متوسط سوتر سوخت‌های مورد نظر تا پایان پاشش سوخت و در شرایط محیطی ذکر شده مشاهده می‌شود.

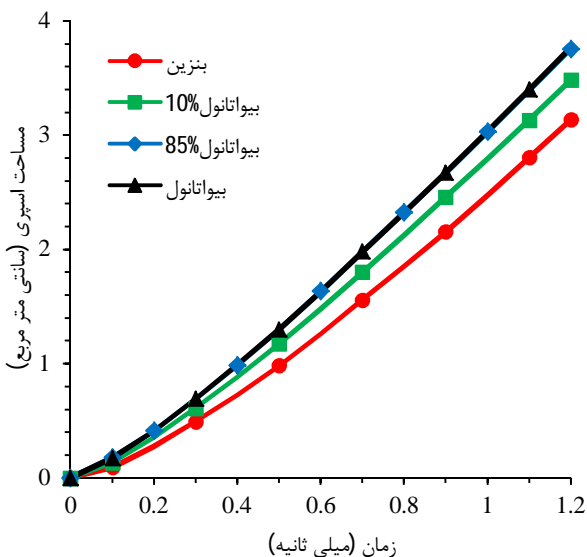


نوع سوخت اسپری شده در محفظه احتراق

شکل 6 زاویه‌ی مخروط سوخت‌های مختلف در فشار محیط 600 کیلوپاسکال و فشار تزریق 10 مگا پاسکال



شکل 7 مقایسه‌ی طول نفوذ سوخت‌های مختلف در فشار محیط 600 کیلوپاسکال و فشار تزریق 10 مگا پاسکال



شکل 8 مقایسه‌ی مساحت پاشش سوخت‌های مختلف در فشار محیط 600 کیلوپاسکال و فشار تزریق 10 مگا پاسکال

در این شکل برای تمامی سوخت‌ها مقدار قطر متوسط سوتر در ابتدای تزریق بالا است و پس از گذشت زمان، قطر متوسط سوتر سوخت‌های مختلف تقریباً ثابت می‌ماند. علت این امر آن است که سرعت تزریق سوخت از صفر شروع شده و به تدریج زیاد شده تا در نهایت به یک مقدار تقریباً ثابت برسد. کم بودن سرعت تزریق در ابتدای شبیه‌سازی سبب می‌شود که مقدار قطر متوسط سوتر در ابتدای تزریق بالا باشد. پس از گذشت زمان کافی با ثابت شدن سرعت تزریق سوخت، قطر متوسط سوتر سوخت‌ها نیز تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین با توجه به آن که سرعت تزریق و مساحت موثر دهانه‌ی نازل سوخت‌های مختلف در هنگام پاشش تقریباً با هم برابر است و از طرفی کشش سطحی و ویسکوزیته‌ی بیواتانول بیشتر از بنزین می‌باشد، عدد رینولدز¹ و عدد وبر² قطرات بیواتانول که معیاری از انهدام آن‌ها می‌باشند کمتر است. بنابراین انهدام قطرات بیواتانول زمانبرتر از قطرات بنزین می‌باشد و نتیجتاً قطر متوسط سوتر بیواتانول بیشتر از بنزین است و با افزایش مقدار بیواتانول موجود در سوخت مقدار قطر متوسط سوتر نیز افزایش می‌یابد [3] که همین روند شکل 9 مشاهده می‌شود.

بنابراین می‌توان گفت که هرچه میزان بنزین موجود در سوخت‌های مورد بررسی بیشتر باشد، اتمیزاسیون بهتر صورت می‌گیرد. در نتیجه هرچند کیفیت خصوصیات ماکروسکوپی پاشش مانند زاویه مخروط و مساحت پاشش با افزایش مقدار بیواتانول موجود در سوخت بهبود یافته است، اما کیفیت خصوصیت میکروسکوپی مورد بررسی که همان قطر متوسط سوتر باشد، با افزایش بیواتانول موجود در سوخت کاهش پیدا کرده است.

4-2- اثر فشار تزریق روی خصوصیات پاشش سوخت

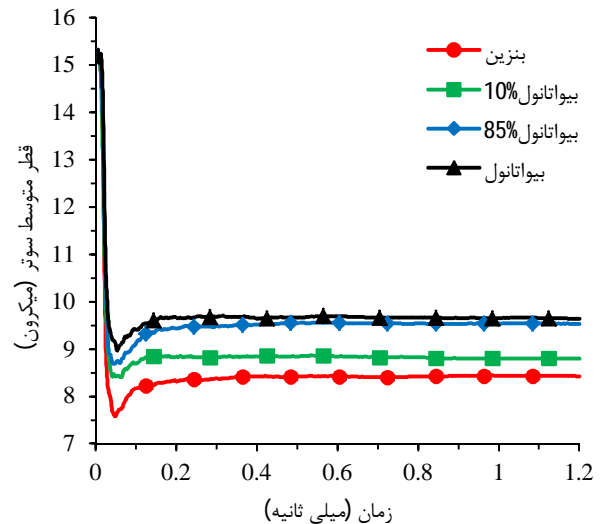
فشار تزریق سوخت یکی از پارامترهای تأثیرگذار روی خصوصیات میکروسکوپی و ماکروسکوپی پاشش سوخت می‌باشد. برای بررسی اثر فشار تزریق روی این خصوصیات، فشار محیط داخل سیلندر 600 کیلو پاسکال، دمای هوای داخل سیلندر 300 کلوین، فشار تزریق سوخت 10 و 15 مگاپاسکال و دمای سوخت 293/15 کلوین در نظر گرفته شده‌اند.

4-2-1- اثر فشار تزریق روی جرم سوخت بخار شده

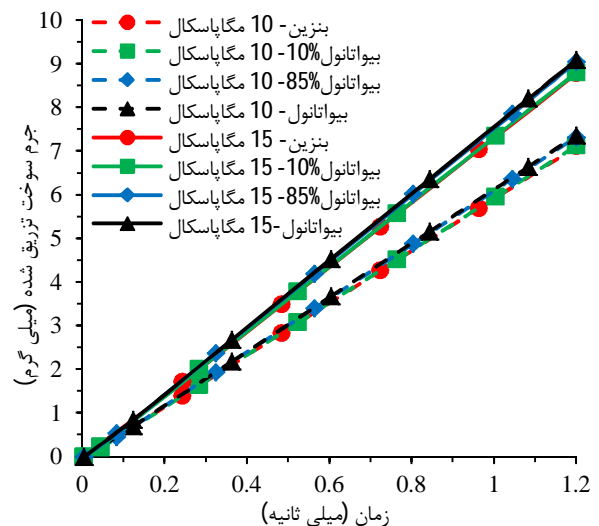
با توجه به این که دبی جرمی خروجی از نازل با $\sqrt{\Delta p}$ یا جذر تفاضل فشار تزریق و فشار محیط متناسب است، با افزایش فشار تزریق از ده به پانزده مگاپاسکال دبی جرمی خروجی از نازل در حدود 23/8 درصد افزایش خواهد یافت. شکل 10 مقدار جرم سوخت تزریق شده را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود مقدار جرم تزریق شده سوخت‌های مورد بررسی در فشار تزریق ثابت، اختلاف اندکی با یکدیگر دارد اما با افزایش فشار تزریق مقدار جرم تزریق شده هر سوخت به طور محسوسی افزایش می‌یابد. علاوه بر افزایش جرم سوخت داخل شده به محفظه احتراق، مقدار انرژی وارد شده به محفظه نیز به دلیل افزایش فشار تزریق نیز افزایش می‌یابد. این دو عامل در کنار هم سبب خواهند شد که همانطور که در شکل 11 نیز مشاهده می‌شود، با افزایش فشار تزریق مقدار جرم بخار تبخیر شده نیز افزایش یابد. مقدار افزایش جرم بخار تبخیر شده همان‌طور که انتظار می‌رود، بیشتر از 23/8 درصد یعنی درصد افزایش جرم پاشش شده به محفظه به واسطه‌ی افزایش فشار تزریق و مطابق شکل 11 حداقل 45/3 می‌باشد.

4-2-2- اثر فشار تزریق روی خصوصیات ماکروسکوپی پاشش

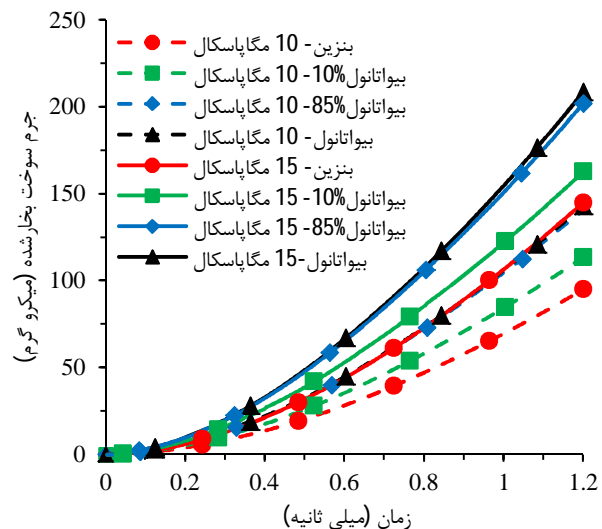
هرچند با افزایش فشار تزریق از 10 مگاپاسکال به 15 مگاپاسکال، مقدار جرم



شکل 9 مقایسه‌ی قطر متوسط سوتر سوخت‌های مختلف در فشار محیط 600 کیلو پاسکال و فشار تزریق 10 مگاپاسکال

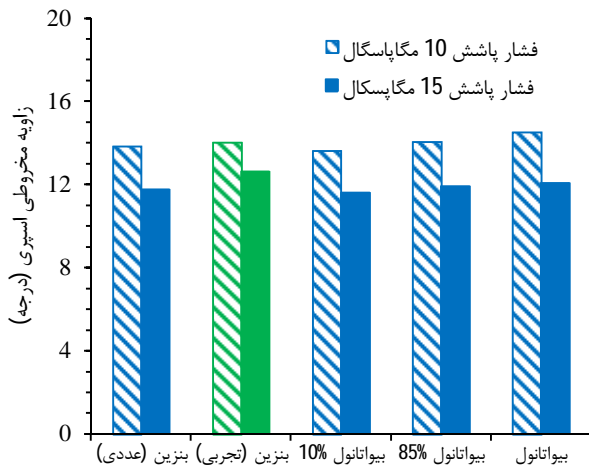


شکل 10 مقایسه‌ی جرم سوخت تزریق شده با افزایش فشار تزریق از 10 مگاپاسکال به 15 مگاپاسکال

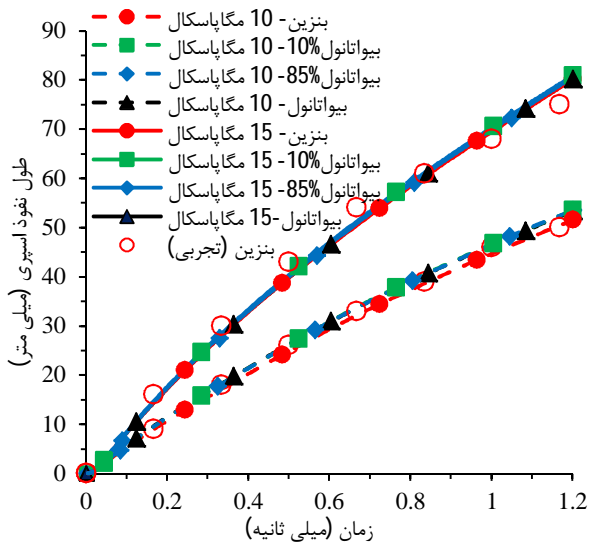


شکل 11 مقایسه‌ی جرم سوخت بخار شده در حین تزریق با افزایش فشار تزریق از 10 مگاپاسکال به 15 مگاپاسکال

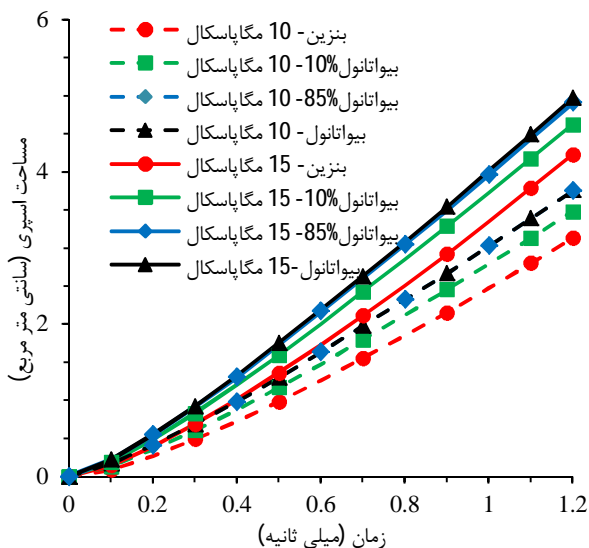
1- Reynolds number
2- Weber number



شکل 12 مقایسه‌ی زاویه‌ی مخروط سوخت‌های مورد بررسی با افزایش فشار تزریق از 10 مگاپاسکال به 15 مگاپاسکال



شکل 13 مقایسه‌ی طول نفوذ سوخت‌های مورد بررسی با افزایش فشار تزریق از 10 مگاپاسکال به 15 مگاپاسکال



شکل 14 مقایسه‌ی مساحت پاشش سوخت‌های مورد بررسی با افزایش فشار تزریق از 10 مگاپاسکال به 15 مگاپاسکال

بخار شده‌ی سوخت بیواتانول از 0/11 میلی گرم به 0/16 میلی گرم افزایش پیدا می‌کند، اما از طرف دیگر مقدار جرم تزریق شده‌ی سوخت نیز 7/1 به 8/6 میلی گرم افزایش پیدا کرده است. بنابراین برخلاف حالت قبل، در این حالت افزایش جرم بخار شده‌ی سوخت به واسطه‌ی تغییر ایجاد شده در جرم کل سوخت ورودی نمی‌تواند عاملی برای افزایش زاویه‌ی مخروط پاشش باشد. در واقع در این حالت افزایش مونتوم سوخت در راستای پاشش سبب افزایش حرکت سوخت در راستای پاشش می‌شود. همچنین قدرت ورتکس¹ ایجاد شده در راستای پاشش افزایش یافته و نتیجتاً ذرات سوخت به سمت محور پاشش هدایت می‌شوند. این عوامل سبب می‌شوند که زاویه‌ی مخروط پاشش با افزایش فشار تزریق همانطور که در شکل 12 نیز مشاهده می‌شود، چه در بررسی عددی و چه در بررسی تجربی کاهش پیدا کند.

در شکل 13 اثر افزایش فشار تزریق سوخت روی طول نفوذ پاشش مشاهده می‌شود. از آن‌جا که با افزایش فشار تزریق انرژی و مومنتوم سوخت افزایش پیدا می‌کند، می‌توان گفت که سرعت نسبی میان هوا و سوخت در راستای پاشش سوخت نیز افزایش پیدا می‌کند. این افزایش سرعت سبب جابجایی بیشتر سوخت در راستای محور در زمان ثابت می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که طول نفوذ پاشش سوخت با افزایش فشار تزریق افزایش پیدا کند. همچنین همانطور که شکل 13 مشاهده می‌شود، داده‌های عددی انطباق خوبی با داده‌های تجربی دارند.

علیرغم آن‌که با توجه به شکل 12 زاویه‌ی مخروط پاشش با افزایش فشار تزریق کاهش می‌یابد، اما با توجه به شکل‌های 10 و 13 طول نفوذ سوخت‌ها و مقدار کل جرم سوخت پاشش شده با افزایش فشار تزریق، افزایش می‌یابد. با توجه به شکل 14 مشاهده می‌شود که تقابل کاهش زاویه‌ی مخروط و افزایش طول نفوذ در نهایت سبب افزایش مساحت پاشش شده است.

3-2-4- اثر فشار تزریق روی خصوصیات میکروسکوپی پاشش

در شکل 15 قطر متوسط سوتر سوخت‌های بنزین، بیواتانول، بیواتانول 10 درصد و بیواتانول 85 درصد در فشارهای 10 و 15 مگاپاسکال رسم شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود روند قطر متوسط سوخت‌های مورد بررسی در فشار 15 مگاپاسکال مشابه فشار 10 مگاپاسکال می‌باشد که در بخش 3-1-4 بررسی گردید. همچنین با افزایش فشار تزریق، تمیزاسیون بهتر صورت می‌گیرد و قطر متوسط سوتر کاهش پیدا می‌کند. علت این امر آن است که با افزایش فشار تزریق، انرژی مولکول‌های سوخت افزایش پیدا می‌کند و با افزایش انرژی، احتمال انهدام قطرات سوخت در حین برخورد یکدیگر و برخورد با هوا افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه انتظار می‌رود، با افزایش فشار تزریق قطر متوسط سوتر کاهش پیدا می‌کند.

3-4- خصوصیات پاشش با فرض ثابت بودن ارزش حرارتی سوخت

تزریقی و مدت زمان پاشش سوخت

طبیعتاً یکی از مقایسه‌های کاربردی میان سوخت بیواتانول و بنزین، پاشش کردن مقدار ثابتی انرژی درون محفظه‌ی احتراق می‌باشد. بدین منظور فشار محیط داخل سیلندر 600 کیلو پاسکال، دمای هوای داخل سیلندر 300 کلوین، و دمای سوخت 293/15 کلوین در نظر گرفته شده‌اند. همچنین مقدار فشار تزریق سوخت‌ها مطابق جدول 4 به گونه‌ای تغییر داده شده است که در همه‌ی حالت‌ها مقدار انرژی تزریق شده برابر 316 ژول باشد.

محسوسی بالاتر و به ترتیب 21 درصد، 172 درصد و 250 درصد بیشتر از مقدار جرم بخار شده‌ی بیواتانول 85 درصد، بیواتانول 10 درصد و بنزین باشد.

2-3-4- تغییرات خصوصیات ماکروسکوپیک پاشش با ثابت بودن انرژی تزریق شده

در شکل 17 زاویه‌ی مخروط و در شکل 18 طول نفوذ سوخت‌های مختلف در شرایطی که انرژی سوخت تزریق شده و مدت زمان پاشش ثابت باشد، رسم شده است. با توجه به این که برای ثابت نگه‌داشتن انرژی ورودی این سوخت‌ها لازم است سوخت با درصد بیواتانول بیشتر با فشار تزریق بطور محسوسی بالاتری تزریق شود و از طرفی افزایش فشار تزریق، زاویه‌ی مخروط پاشش و طول نفوذ را همانگونه که شکل‌های 12 و 13 نشان می‌دهد، به ترتیب کاهش و افزایش می‌دهد، انتظار می‌رود برخلاف دو حالت بررسی شده‌ی قبل که زاویه‌ی مخروطی و طول نفوذ سوخت‌های مختلف در یک شرایط محیطی مشخص تقریباً برابر بود، در اینجا زاویه‌ی مخروط با افزایش مقدار بیواتانول موجود در سوخت بطور محسوسی افزایش می‌یابد. این افزایش محسوس سبب می‌شود که علی‌رغم کاهش مقدار زاویه‌ی مخروط پاشش با افزایش مقدار بیواتانول موجود در سوخت نظیر شکل 17، مساحت پاشش نیز با افزایش مقدار بیواتانول موجود در سوخت مطابق شکل 19 افزایش یابد.

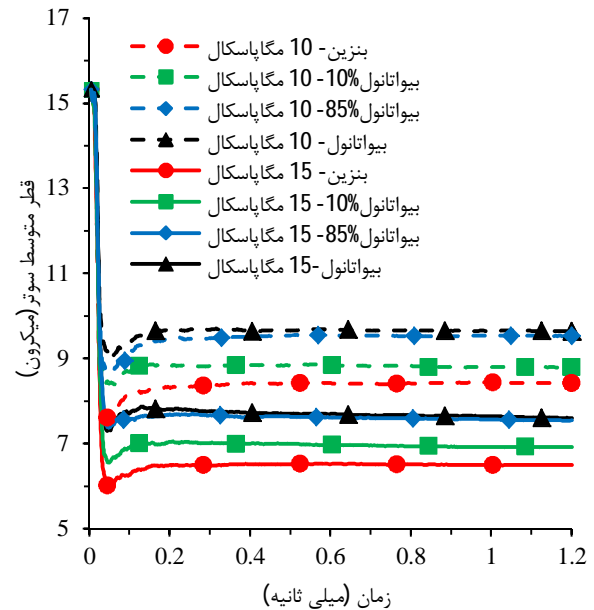
به این ترتیب در صورت استفاده سوخت با درصد حجمی بیواتانول بالا در موتورهای مرسوم احتمال آن که پاشش سوخت به پیستون و یا دیواره‌های سیلندر برخورد کند و در نتیجه‌ی آن بازده موتور کاهش و مقدار دوده‌ی خروجی از موتور افزایش پیدا کند، افزایش پیدا خواهد کرد.

3-3-4- تغییرات روی خصوصیات میکروسکوپیک پاشش در صورت ثابت بودن انرژی تزریق شده

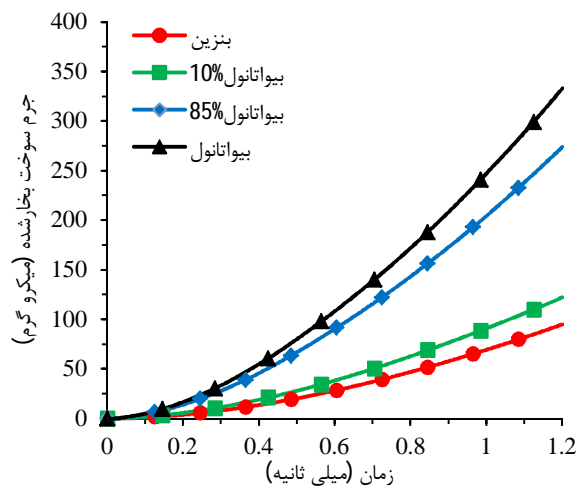
همان‌طور که در بخش 3-1-4 بیان شد، با توجه به ویسکوزیته و کشش سطحی بالاتر بیواتانول انتظار می‌رود قطر متوسط سوتر بیواتانول بیشتر از قطر متوسط سوتر بنزین باشد، اما در حالتی که انرژی تزریق شده و مدت زمان پاشش برابر باشد، با توجه به جدول 4 فشار تزریق سوخت با افزایش مقدار بیواتانول موجود افزایش می‌یابد. این افزایش فشار تزریق همانطور که در بخش 3-2-4 نیز بررسی گردید، باعث کاهش قطر متوسط سوتر می‌شود. در نهایت همانطور که در شکل 20 نیز مشاهده می‌شود، برای سوخت بیواتانول 10 درصد، اثر کاهش قطر متوسط سوتر به واسطه‌ی افزایش فشار تزریق، با اثر افزایش قطر متوسط سوتر به واسطه‌ی بالاتر بودن ویسکوزیته و کشش سطحی بالاتر بیواتانول تقریباً برابر بوده و در نتیجه سوخت‌های بنزین و بیواتانول 10 درصد دارای قطر متوسط سوتر مشابه هستند. اما برای سوخت‌های بیواتانول و بیواتانول 85 درصد اثر کاهش قطر متوسط سوتر به واسطه‌ی افزایش فشار تزریق بر اثر افزایش قطر متوسط سوتر به واسطه‌ی بالاتر بودن ویسکوزیته و کشش سطحی غلبه کرده و در نتیجه این دو سوخت قطر متوسط سوتر کوچکتری نسبت به بنزین و بیواتانول 10 درصد دارند.

5- جمع‌بندی

در این پژوهش مدل‌سازی عددی به منظور بررسی خصوصیات پاشش سوخت‌های بیواتانول، بنزین و سوخت ترکیبی بیواتانول و بنزین شامل بیواتانول 10 درصد و بیواتانول 85 درصد در شرایط مختلف انجام شده و نتایج با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است. از مدل‌سازی‌های صورت گرفته نتایج زیر به دست آمده است:



شکل 15 مقایسه‌ی قطر متوسط سوتر سوخت‌های مورد بررسی با افزایش فشار تزریق 10 مگاپاسکال به 15 مگاپاسکال

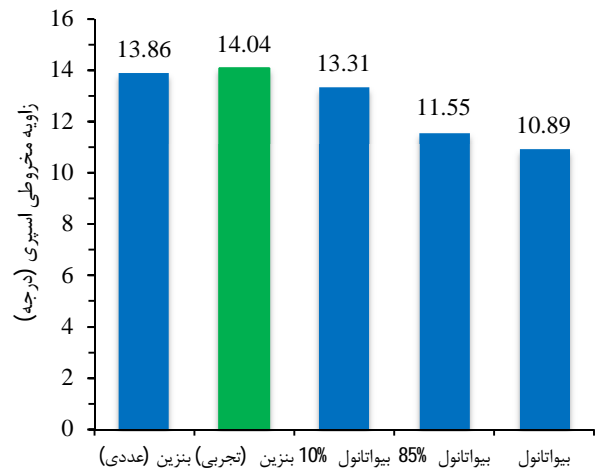
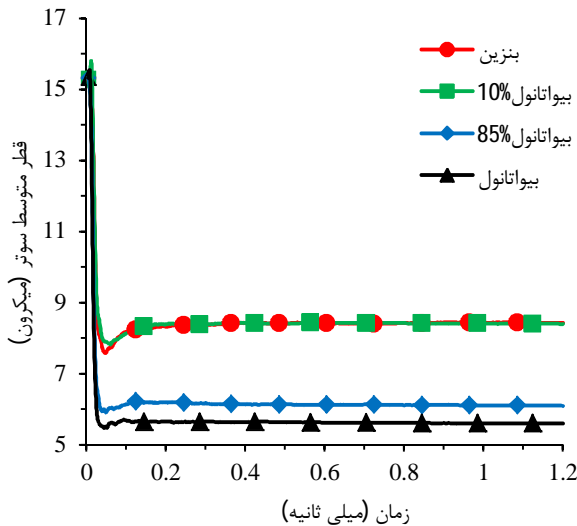


شکل 16 مقایسه‌ی جرم سوخت بخار شده در حین تزریق با ثابت ماندن انرژی سوخت تزریق شده و مدت زمان پاشش

جدول 4 مقدار سوخت تزریق شده برای ثابت ماندن انرژی وارد شده به محفظه

نوع سوخت	ارزش حرارتی [25] (kJ/kg)	فشار تزریق (MPa)	جرم سوخت تزریق شده (mg)
بنزین	-44506/0	10	7/11
بیواتانول	-26811/0	26/5	11/80
بیواتانول 10 درصد	-42612/6	10/9	7/43
بیواتانول 85 درصد	-29306/0	22/3	10/80

3-4-1- تغییرات میزان جرم بخار شده با ثابت بودن انرژی تزریق شده با توجه به بررسی‌های انجام شده در بخش 1-1-4 و 1-2-4، افزایش بیواتانول موجود در سوخت و افزایش فشار تزریق باعث افزایش جرم سوخت بخار شده می‌شود. با توجه به جدول 4 برای ثابت نگه‌داشتن انرژی ورودی سوخت‌های مورد بررسی لازم است سوخت با درصد بیواتانول بیشتر با فشار تزریق بالاتری تزریق شود. در نتیجه همان‌طور که در شکل 16 مشاهده می‌شود این دو عامل تقویت کننده در کنار هم سبب می‌شوند که مقدار جرم بخار شده‌ی بیواتانول به طور



شکل 17 زاویه مخروط سوخت‌های مختلف با ثابت ماندن انرژی سوخت تزریق شده و مدت زمان پاشش

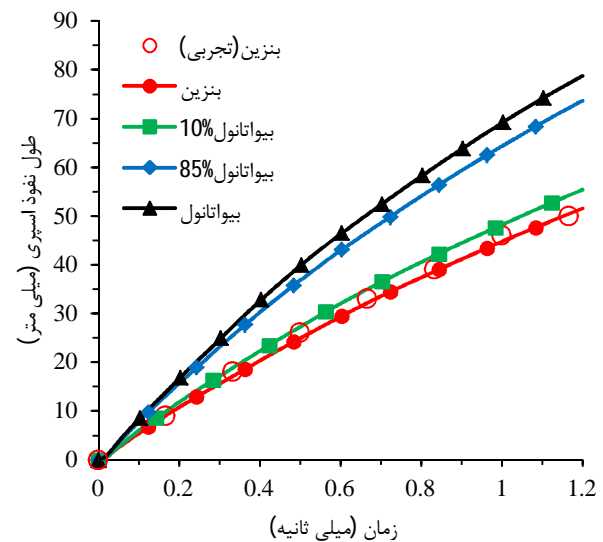
شکل 20 قطر متوسط سوتر با ثابت ماندن انرژی سوخت تزریق شده و مدت زمان پاشش

برای سوخت‌های مورد بررسی چنانچه دمای محیط، فشار محیط و فشار تزریق ثابت باشد، طول نفوذ سوخت‌های بیواتانول، بیواتانول 10 درصد و بیواتانول 85 درصد تقریباً با هم برابر و بیشتر از طول نفوذ بنزین است. به واسطه نقطه جوش پایین‌تر بیواتانول، زاویه مخروط پاشش بیواتانول و بیواتانول 85 درصد بیشتر از بنزین و بیواتانول 10 درصد است. در نتیجه با توجه به این موارد مساحت پاشش بیواتانول و بیواتانول 85 درصد از بنزین و بیواتانول 10 درصد بیشتر خواهد بود. همچنین مقدار قطر متوسط سوتر هر سوخت پس از گذشت زمان کافی از آغاز پاشش تقریباً ثابت است و از طرفی با توجه به کشش سطحی و ویسکوزیته بالاتر بیواتانول نسبت به بنزین، قطر متوسط سوتر با افزایش بیواتانول موجود در سوخت افزایش می‌یابد.

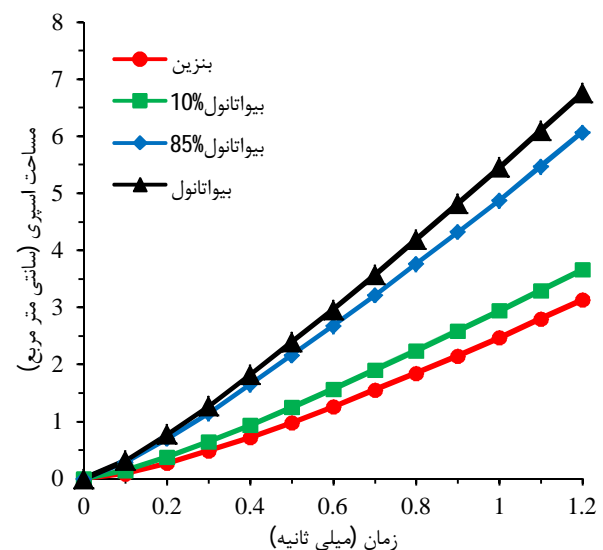
با افزایش فشار تزریق از 10 مگاپاسکال به 15 مگاپاسکال، طول نفوذ سوخت‌ها با توجه به افزایش مومنتوم و افزایش جرم سوخت ورودی افزایش و زاویه مخروط همه سوخت‌ها با توجه به افزایش مومنتوم سوخت‌ها کاهش می‌یابد. افزایش طول نفوذ، علی‌رغم کاهش زاویه مخروط سبب افزایش مساحت پاشش همه سوخت‌ها می‌شود. افزایش فشار تزریق، سبب افزایش انرژی مولکول‌های سوخت و در نتیجه افزایش احتمال انهدام قطرات سوخت در حین برخورد با یکدیگر و برخورد با هوا می‌شود. در نتیجه با افزایش فشار تزریق قطر متوسط سوتر کاهش پیدا می‌کند.

لذا در شرایط محیطی ثابت، با افزایش مقدار بیواتانول در ترکیب، زاویه مخروط پاشش، مساحت پاشش و قطر متوسط سوتر بزرگتر و طول نفوذ بلندتر می‌شود.

در یک بررسی کاربردی‌تر خصوصیات پاشش در انرژی کل و مدت زمان پاشش برابر بررسی شده است. جالب آن‌که تمامی خصوصیات پاشش به جز مساحت پاشش در این حالت برخلاف خصوصیات پاشش در حالت شرایط محیطی ثابت به دست آمد یعنی بر خلاف حالت‌های قبل در این حالت طول نفوذ پاشش با افزایش مقدار بیواتانول موجود به طور محسوسی افزایش می‌یابد. زاویه مخروط پاشش به واسطه افزایش مومنتوم سوخت با افزایش مقدار بیواتانول کاهش و مساحت پاشش نیز به واسطه افزایش جرم و افزایش انرژی سوخت با افزایش مقدار بیواتانول افزایش می‌یابد. همچنین در بررسی قطر متوسط سوتر دو عامل متقابل، که یکی ویسکوزیته و کشش سطحی سوخت و دیگری فشار تزریق می‌باشد، سبب خواهد شد که قطر متوسط سوتر بنزین و بیواتانول 10 درصد با هم برابر و بزرگتر از بیواتانول 85



شکل 18 مقایسه طول نفوذ سوخت‌های مختلف با ثابت ماندن انرژی سوخت تزریق شده و مدت زمان پاشش



شکل 19 مساحت پاشش سوخت‌های مورد بررسی با ثابت ماندن انرژی سوخت تزریق شده و مدت زمان پاشش

- [4] J. Gao, D. Jiang and Z. Huang, "Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of ethanol-gasoline blends and gasoline," *Fuel*, vol. 86, pp. 1645-1650, 2007.
- [5] F. Karaosmanoglu, A. Isigigur and H. A. Aksoy, "Effects of a New Blending Agent on Ethanol-Gasoline Fuels," *Energy & Fuels*, vol. 10, pp. 816-820, 1996.
- [6] M. Al-Hasan, "Effect of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission," *Energy Conversion and Management*, vol. 44, pp. 1547-1561, 2003.
- [7] M. Ghazikhani, M. Hatami, B. Safari and D. D. Ganji, "Experimental investigation of exhaust temperature and delivery ratio effect on emissions and performance of a gasoline-ethanol two-stroke engine," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 2, pp. 82-90, 2014.
- [8] F. Yuksel and B. Yuksel, "The use of ethanol-gasoline blend as a fuel in an SI engine," *Renewable Energy*, vol. 29, pp. 1181-1191, 2004.
- [9] X. Wang, J. Gao, D. Jiang, Z. Huang and W. Chen, "Spray Characteristics of High-Pressure Swirl Injector Fueled with Methanol and Ethanol," *Energy & Fuels*, vol. 19, pp. 2394-2401, 2005.
- [10] I. D. C. Macedo, "Greenhouse gas emissions and energy Balances in Bio-Ethanol Production and utilization in Brazil," *Biomass and Bioenergy*, vol. 1, pp. 77-81, 1998.
- [11] L. A. Martinelli and S. Filoso, "Expansion of sugarcane ethanol production in brazil environmental and social challenges," *Ecological Applications*, vol. 18, no. 4, pp. 885-898, 2008.
- [12] A. Matsumoto, W. R. Moore, M.-C. Lai, Y. Zheng, M. Foster and X.-B. Xie, "Spray Characterization of Ethanol Gasoline Blends and Comparison to a CFD Model for a Gasoline Direct Injector," *SAE International*, pp. 402-425, 2010.
- [13] A. Kameoka, K. Nagai, G. Sugiyama and T. Seko, "Effect of Alcohol Fuels on Fuel-Line Materials of Gasoline Vehicles," *SAE Technical Paper*, 2005.
- [14] S. Y. Liao, D. M. Jiang, Q. Cheng, Z. H. Huang and Q. Wei, "Investigation of the Cold-Start Combustion Characteristics of Ethanol-Gasoline Blends in a Constant-Volume Chamber," *Energy & Fuels*, vol. 19, pp. 813-819, 2005.
- [15] B. N. Chisala, N. G. Tait and D. N. Lerner, "Evaluating the risks of methyl tertiary butyl ether (MTBE) pollution of urban groundwater," *Contaminant Hydrology*, vol. 91, pp. 128-145, 2007.
- [16] A.K. Amirrudin, M. H. Razali, and Emishaw D. Iffa, "Imaging Investigation on the Spray Penetration of Gasohol Blends Image," *13th International Conference on Computer and Information Technology*, Dhaka, Bangladesh, 2010.
- [17] Su Han Park, Junepyo Cha, Hyung Jun Kim, Chang Sik Lee, "Effect of early injection strategy on spray atomization and emission reduction characteristics in bioethanol blended diesel fueled engine," *Energy*, vol. 39, pp. 375-387, 2012.
- [18] F. Catapano, P. Sementa, B.M. Vaglieco, "Optical characterization of bio-ethanol injection and combustion in a small DISI engine for two wheels vehicles," *Fuel*, vol.106, pp. 651-666,2013.
- [19] R. Chen, K. Nishida, "Spray evaporation of ethanol-gasoline-like blend and combustion of ethanol-gasoline blend injected by hole-type nozzle for direct-injection spark ignition engines," *Fuel*, vol. 134, pp. 263-273, 2014.
- [20] A. Ghahremani, *Investigation of bio-fuel mixture formation in a direct injection engine*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, 2014. (In progress, In Persian)
- [21] *AVL Fire Guide*, Spray module, 2008
- [22] *AVL Fire Guide*, Spray module, 2013
- [23] Kei-ya Nishida, Jiangping Tian, Yasuki Sumoto, Wuqiang Long, Kiyotaka Sato, Masahisa Yamakawa, "An experimental and numerical study on sprays injected from two-hole nozzles for DISI engines," *Fuel*, vol. 88, pp. 1634-1642, 2009
- [24] Su Han Park, Hyung Jun Kim, Hyun Kyu Suh, Chang Sik Lee, "A study on the fuel injection and atomization characteristics of soybean oil methyl ester," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 30, pp. 108-116,2009
- [25] R. E. Sonntag, C. Borgnakke, G. J. Van Wylen, *Fundamentals of thermodynamics*, Sixth edition, pp. 582, Newyork: John Wiley & Sons, 2002.

درصد و بیواتانول باشند. به این ترتیب قطر متوسط سوتر بیواتانول کمتر از بنزین خواهد بود.

6- فهرست علائم

B_T	عدد انتقال حرارت (-)
B_V	عدد انتقال جرم (-)
C_D	ضریب درگ (-)
C_p	ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
D	قطر (m)
F	نیرو (N)
G	شتاب گرانش (ms^{-2})
K	ضریب انتقال حرارت هدایتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
L	گرمای نهان تبخیر (Jkg^{-1})
Le	عدد لوئیس (-)
m	جرم (kg)
\dot{m}	تغییرات جرم بر حسب زمان (kgs^{-1})
Nu	عدد ناسلت (-)
Q	انتقال حرارت (W)
R	شعاع (معادل) قطره (m)
Sh	عدد شروود (-)
t	زمان (s)
T	دمای (K)
u	سرعت (ms^{-1})
X	مکان (m)
y	جابجایی بی بعد شده (-)

علائم یونانی

ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	ویسکوزیته ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
σ	کشش سطحی (Nm^{-1})
زیر نویس‌ها	
d	قطره
f	سیال
g	گاز (محیط)
i	جهت مختصات
s	سطح
∞	حالت ذره در مکان دوردست

7- مراجع

- [1] M. Koc, Y. Sekmen, T. Topgul and H. S. Yucesu, "The effects of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine," *Renewable energy*, vol. 34, no. 10, pp. 2101-2106, 2009
- [2] C. P. Cooney, Yeliana, J. J. Worm and J. D. Naber, "Combustion Characterization in an Internal Combustion Engine with Ethanol-Gasoline Blended Fuels Varying Compression Ratios," *energy & fuels*, vol. 23, pp. 2319-2324, 2009.
- [3] S. H. Park, H. J. Kim, H. K. Suh and C. S. Lee, "Atomization and spray characteristics of bioethanol and bioethanol blended gasoline fuel injected through a direct injection gasoline injector," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 30, pp. 1183-1192, 2009.