

مطالعه پاشش سوخت در راهگاه ورودی موتورهای افشانه‌ای با پاشش غیر مستقیم با نگاه ویژه به تأثیر زمان پاشش سوخت بر عملکرد و میزان آلاینده‌ها

فتح‌اله امی*

دانشیار، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی
fommi@modares.ac.ir

کورس نکوفر

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس
nekoufar@iauc.ac.ir

احسان موحدنژاد

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بین‌المللی جلفا
movahed@iauj.ac.ir

* نویسنده مسئول تاریخ دریافت: ۹/۰۲/۲۰ پذیرش نهایی مقاله: ۹/۰۶/۲۰

چکیده

یکی از متغیرهای موثر بر عملکرد موتورهای افشانه‌ای و میزان آلاینده‌های خروجی از آن‌ها، تعیین سازوکار زمانی پاشش و زمان مناسب برای پاشش در هر کدام از سازوکارها می‌باشد. زمان پاشش سوخت به طور مستقیم بر چگونگی تبخیر سوخت، اختلاط هوا و سوخت، میزان تشکیل غشاء (فیلم) مایع در راهگاه و میزان سوخت وارد شده به استوانه تأثیر گذاشته و بر این اساس تأثیر مهمی در عملکرد مناسب موتور و پایش میزان آلاینده‌های خروجی به خصوص HC ایفا می‌کند. در این مقاله تأثیر زمان پاشش سوخت در سازوکار زمانی تربیتی با استفاده از الگوی ایجاد شده از موتور XU7JP-L3 (استفاده شده در خودروی سمند) در نرم‌افزار مهندسی Wave و با استفاده از الگوی افشانه پالس ویدس بررسی می‌شود و با نتایج آزمایش موتور در سرعت‌های ۲۶۰۰ و ۶۰۰۰ د.د.د در حالت تمام بار و نیمه بار مقایسه می‌شود. دقت شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش گرم موتور تأیید شده و با توجه به میزان گشتاور موتور و آلاینده‌های خروجی از موتور، حالت پاشش باید به گونه‌ای باشد که بیشتر قطرات سوخت در انتهای مرحله تخلیه و در زمان باز شدن دریچه ورودی به پشت آن برسند.

به متغیرهای عملکردی افشانه و طراحی هندسه راهگاه صورت گرفته است. [۱۰-۱۳] بسیاری از این تحقیقات از تأثیر متقابل حالت‌های مختلف در چندراهه یا راهگاه ورودی صرف نظر کرده و یا حالت جریان یکنواخت در نظر گرفته‌اند. برخی نیز با انتخاب سوخت تک جزئی از تأثیر دیفیوژن صرف نظر کرده‌اند. چن (Gang Chen, ۱۹۹۶) با شبیه‌سازی جریان چند حالتی گذرا در راهگاه موتور افشانه‌ای، فرآیند اختلاط سوخت و هوا و چگونگی تأثیر سه حالت گاز، قطرات و غشاء مایع سوخت بر هم را بررسی کرد [۱۰]. روند این مطالعات و نتایج آن در جدول زیر به طور خلاصه ارائه شده است.

کلید واژه‌ها: موتور، افشانه، زمان پاشش، آلاینده‌ها، پاشش غیر مستقیم

۱- مقدمه

فهم بهتر خصوصیات پاشش در افشانه‌های پاشش غیر مستقیم تأثیر مهمی در تطبیق متغیرهای پاشش با شرایط مختلف عملکرد موتور ایجاد می‌کند و بر این اساس تحقیقات زیادی در این زمینه روی پاشش افشانه‌های با پاشش غیر مستقیم انجام می‌شود. [۱-۹]. همچنین تحقیقات زیادی در زمینه بهبود فرآیند تشکیل مخلوط در راهگاه با توجه

محقق	عنوان تحقیق	نتیجه
Q. Zhao (1995)	بررسی ساختار پاشش و مشخصه‌های پاشش چند نوع افشانه	استخراج مشخصه‌های پاشش و بررسی تأثیر آنها بر عملکرد موتور
Fulcher (1995)	مقایسه دو نمونه افشانه پینتل و هواکمک	مقایسه متغیرهای ریزپاشی (اتمیزاسیون)، تبخیر و اختلاط در افشانه‌ها و تأثیر آن بر آلاینده‌ها
Chen (1996)	ایجاد الگوی یک بعدی گذرا از جریان چند حالتی در چندراهه ورودی با وجود سوخت چند جزئی	بررسی فرآیند تشکیل مخلوط سوخت و هوا در طول راهگاه ورودی
R.Meyer (1999)	بررسی تأثیر متغیرهای طراحی موتور و مشخصه‌های سوخت آن بر روی نحوه انتقال سوخت	اندازه‌گیری مقدار آلاینده‌های خروجی از موتورها تغییر متغیرهای سوخت
M. Behnia (2001)	بررسی تأثیر محل قرارگیری افشانه بر نحوه ورود سوخت به استوانه	مطالعه کیفیت شکل‌گیری مخلوط در استوانه و اندازه‌گیری میزان غشاء سوخت و اندازه قطرات در ورود به استوانه

فرآیندهای داخل استوانه، بر پایه حل معادلات جرم و انرژی با فرض احتراق دو ناحیه‌ای^۱ است که در آن استوانه به دو ناحیه سوخته و نسوخته تقسیم می‌شود. در الگوی احتراق استفاده شده، کسر جرمی مخلوط سوخته شده بر اساس احتراق پیش مخلوط و با استفاده از محاسبات ترمودینامیکی شبیه‌سازی می‌شود.

۳- معادلات حاکم

نرم‌افزار مهندسی Wave با استفاده از معادلات حاکم بر حرکت و تبخیر قطرات، قادر به پیش‌بینی فرآیند پاشش، توزیع و تبخیر قطرات و تشکیل غشاء سوخت و انتقال آن در راهگاه می‌باشد. این نرم افزار دارای دو الگو برای پیش‌بینی تبخیر سوخت است. در الگوی عمومی اول سوخت مایع وارد شده به استوانه در شرایط فشاری بیشتر از فشار بخار مخلوط تبخیر می‌شود. اگر شرایط داخل استوانه به گونه‌ای تغییر کند که فشار بخار اشباع در سطح سوخت مایع تا پایین‌تر از فشار بخار سوخت مخلوط داخل استوانه تغییر کند، آنگاه سوخت مجدداً به حالت مایع چگالیده می‌شود. نرخ تبخیر سوخت مایع با تخمین اولیه قطر ساتر قطرات (SMD) و زمان مشخصه تبخیر بر اساس الگوی زیر محاسبه می‌گردد.

$$\frac{dm_v}{dt} = \frac{(m_l - m_v)}{\tau_{eva}} \quad (1)$$

که m_l و m_v به ترتیب جرم بخار و سوخت مایع می‌باشند. τ_{eva} با استفاده از ترازنامه انرژی بین هوا و سوخت مایع محاسبه می‌گردد. الگوی جامع دوم، حرکت پاشش سوخت مایع را در دو شکل جابجایی قطرات و غشاء مایع و همچنین تبخیر آن‌را در مسیر جریان پیش بینی می‌کند. قطر ساتر قطرات با استفاده از معادله هیرویاسا (Hiroyasu, 1989) برای

با توجه به نتایج تحقیقاتی که نویسندگان مقاله حاضر بر روی سازوکار پاشش و تأثیر متغیرهای عملکرد پاشش در موتور XU7JP-L3 انجام داده‌اند، خصوصیات و الگوی پاشش افشانه این موتور شناخته شد و تأثیر فشار و دمای سوخت بر عملکرد و مصرف سوخت و میزان تولید آلاینده‌ها بررسی گردید. [۱۴-۱۵]

در کارهای اشاره شده نحوه تأثیر گذاری زمان پاشش بر عملکرد موتور به طور تحلیلی بررسی نشده است. در مقاله حاضر تأثیر سازوکار زمانی پاشش بر عملکرد و میزان آلاینده‌ها با توجه به متغیرهای بالادستی جریان و کیفیت اختلاط سوخت و هوا مطالعه شده است. برای این منظور الگوی این موتور از ورودی هوا به دریچه گاز تا خروجی گاز شبیه‌سازی شده است. دقت شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش گرم موتور با لگام ترمز برای محدوده سرعت ۲۶۰۰ تا ۶۰۰۰ دور در دقیقه و با مقایسه نمودار فشار استوانه، بازده تنفسی و گشتاور تأیید شده و تطابق زیادی با داده‌های واقعی موتور داشته است.

۲- شبیه‌سازی عددی

نرم‌افزار Wave یک برنامه گاز دینامیکی یک بعدی جهت تحلیل دینامیک امواج فشاری، جریان جرمی و افت انرژی در انواع سامانه‌ها می‌باشد. اساس کار این نرم‌افزار بر پایه حرکت امواج فشاری رفت و برگشتی در طول سامانه و انعکاس آن‌ها از انتهای باز یا بسته و محاسبه دما و فشار سیال می‌باشد. این نرم افزار قادر به شبیه‌سازی جریان سیال تراکم پذیر با استفاده از انواع مختلف حجم، داکت، لوله، روزنه و به کارگیری شرایط مرزی به عنوان محیط بوده و انواع مختلف نمودارها از متغیرهای مختلف موتور را در خروجی ایجاد می‌کند.

الگوی احتراق در این نرم‌افزار، یک الگوی ترمودینامیکی گذرا از

۱- Two Zone Combustion

شده از غشاء سوخت و رژیم برخورد قطرات^۴ به سطوح مختلف راهگاه و دریچه را پیش‌بینی کند. رژیم برخورد قطرات پس از برخورد به سطح، بستگی به خصوصیات قطره از جمله سرعت، اندازه، زاویه برخورد، دما و صافی سطح، ضخامت غشاء سوخت و خصوصیات فیزیکی سوخت دارد که با اعداد بدون بعد وبر و لاپلاس بیان می‌شود.

نرخ تبخیر غشاء سوخت نیز با توجه به معادله^۵ (۷) محاسبه می‌شود که در آن h_D ضریب انتقال جرم و B_M عدد انتقال جرم است.

$$\omega = h_D B_M \quad (7)$$

معادله^۶ تعادل گرمایی برای غشاء سوخت نیز بدین صورت می‌باشد.

$$\rho_f c_{pf} \delta \frac{d(T_{fm})}{dt} = h \xi (T_\infty - T_{fs}) - \omega h_v - \frac{k_f (T_\infty - T_{fs})}{\delta} \quad (8)$$

عبارات اول، دوم و سوم در سمت راست معادله به ترتیب نرخ انتقال گرما بین غشاء و گاز اطراف، گرمای لازم برای تبخیر و نرخ انتقال گرما از دیواره راهگاه به غشاء می‌باشد.

الگوی احتراق در این نرم افزار، یک الگوی ترمودینامیکی گذرا از فرآیندهای داخل استوانه، بر پایه حل معادلات جرم و انرژی با فرض احتراق دو ناحیه‌ای^۷ است که در آن استوانه به دو ناحیه سوخته و نسوخته تقسیم می‌شود. معادلات جرم، تغییرات جرم داخل استوانه در نتیجه جریان عبوری از دریچه‌ها و پاشش سوخت را تعیین کرده و نرخ هوای عبوری، سوخت تبخیر شده و سوخت مایع و نرخ محصولات احتراق را محاسبه می‌نماید. معادله انرژی حاکم بر منطقه سوخته بدین صورت می‌باشد.

$$m_{ul} u_{ul} - m_{u0} u_{u0} + m_{ul} R_{ul} T_{ul} P V_{u0} + Q_u \Delta m_{ui} h_{ui} = 0 \quad (9)$$

به همین ترتیب برای منطقه سوخته معادله انرژی عبارت است از

$$m_{bt} u_{bt} - m_{b0} u_{b0} + m_{bt} R_{bt} T_{bt} P V_{b0} + Q_b + \Delta m_{bi} h_{bi} = 0 \quad (10)$$

از طرفی فرض می‌شود مجموع حجم منطقه سوخته و نسوخته برابر با کل حجم استوانه باشد. بنابراین

$$M_{ul} R_{ul} T_{ul} + m_{bt} R_{bt} T_{bt} - P V_C = 0 \quad (11)$$

۴- Adhesion & Rebound & Spread & Splash
۵- Two zone combustion

پاشش فشار کم به کمک معادله^۲ (۲) به دست می‌آید. [۱۴]

$$SMD = 4.12 d_{nozz} Re^{0.12} We^{-0.75} \left(\frac{\mu_f}{\mu_n}\right)^{0.54} \left(\frac{\rho_f}{\rho_n}\right)^{0.18} \quad (2)$$

μ_g و μ_f ویسکوزیته دینامیکی سوخت و گاز و We و Re به ترتیب اعداد بدون بعد "وبر" و "رینولدز" هستند.

در این الگو فرض می‌شود قطرات دارای اندازه‌های یکسان و برابر با قطر ساتر می‌باشند و یا دارای توزیع سایز غیر یکنواخت مطابق با تابع رزین و راملر^۱ می‌باشند. در این تحلیل از تابع توزیع رزین و راملر استفاده شده است. همچنین فرض شده است غشاء سوخت دارای توزیع دمای یکنواخت می‌باشد. نرخ تبخیر قطرات با استفاده از معادله^۳ (۳) محاسبه می‌شود.

$$\omega = \frac{\rho D_{AB}}{d} sh^* \ln(1 + B_M) \quad (3)$$

در این معادله D_{AB} نفوذپذیری گاز، sh^* عدد بدون بعد "شروود" و B_M عدد انتقال جرم است. Y_{fs} و $Y_{f\infty}$ به ترتیب کسر جرمی بخار سوخت در سطح قطره و محیط اطراف می‌باشد.

$$B_M = \frac{Y_{fs} - Y_{f\infty}}{1 - Y_{fs}} \quad (4)$$

معادله^۸ تبادل گرمایی قطره با محیط اطراف بدین صورت می‌باشد.

$$m_f \frac{c_{pf}}{\pi d^2} \frac{d(T_m)}{dt} = \omega \left[\frac{\xi c_{p\infty} (T_\infty - T_S)}{B_M} - L_v \right] \quad (5)$$

عبارت اول سمت راست نرخ انتقال حرارت به قطره و عبارت دوم گرمای لازم برای تبخیر قطره می‌باشد.

دمای حالت گازی با استفاده از معادله^۹ چن^۳ محاسبه می‌شود.

$$T_G = T_S + (T_\infty - T_S) / 3 \quad (6)$$

در الگوی پاشش این نرم افزار محل و زاویه قرار گیری افشانه روی راهگاه، مکان برخورد جت روی راهگاه و همچنین زاویه برخورد (جهت پیش‌بینی نوع برخورد) را کاربر وارد می‌کند و الگو می‌تواند سطح پوشیده

۱- Rosin & Rammler ۱۹۳۳
۲- Bird, ۲۰۰۲
۳- Chen & Yuen, ۱۹۷۶

معادلات ۱ و ۲ و ۳ با استفاده از روش تکرار نیوتن حل می‌شوند. در الگوی احتراق استفاده شده، احتراق پیش مخلوط با استفاده از تابع وایب (Wiebe) که نرخ سوختن مخلوط را با استفاده از محاسبات ترمودینامیکی توصیف می‌کند، شبیه‌سازی می‌شود. در تابع وایب، جزء جرمی سوخته شده از مخلوط به صورت تابعی از زاویه لنگ به صورت زیر بیان می‌گردد. [۱۵]

$$W = 1 - \exp\left[-AWI\left(\frac{\Delta\theta}{BDUR}\right)^{(wexp+1)}\right] \quad (12)$$

W جزء جرمی سوخته شده، $BDUR$ محدوده ۱۰ تا ۹۰٪ سوختن بر حسب درجه، $wexp$ توان تابع وایب و AWI متغیری است که به صورت داخلی محاسبه می‌شود. در این الگو نرخ سوختن با استفاده از سه متغیر که توسط کاربر تعیین می‌گردد، پایش می‌شود. این متغیرها عبارتند از:

(۱) زاویه متعلق به ۵۰٪ سوختن در منحنی رهایی انرژی (heat release)،

(۲) محدوده سوختن از ۱۰ تا ۹۰٪ سوختن،

(۳) توان تابع وایب که موجب انتقال محدوده سوختن می‌شود.

جهت اطلاع از نحوه محاسبه آلاینده‌های HC و Nox و الگوهای استفاده شده برای این منظور مراجع ۱۶ و ۱۷ معرفی می‌شود.

۴- الگوی افشانه

الگوی استفاده شده برای افشانه از نوع "Pulse Width" بوده که در آن نمودار پاشش افشانه که بیانگر میزان جرم سوخت آزاد شده بر حسب عرض پالس است، توسط کاربر وارد می‌شود. این داده‌ها با استفاده از نتایج آزمایش گرم موتور در شرایط سرعت و بار تعریف شده و با توجه به میزان مصرف سوخت موتور و مقدار عرض پالس پاشش در آن شرایط به دست می‌آیند.

داده‌های لازم برای شبیه‌سازی افشانه عبارتند از:

(۱) دمای سوخت،

(۲) قطر افشانه،

(۳) قطر متوسط قطرات (SMD)،

(۴) زاویه مخروط پاشش،

(۵) سرعت اولیه سوخت،

- (۶) منحنی پاشش افشانه،
 (۷) زمان شروع پاشش بر حسب زاویه لنگ،
 (۸) عرض پالس پاشش.

داده‌های ذکر شده با استخراج مشخصه‌های پاشش با استفاده از اندازه‌گیری با کمک دستگاه PDA به دست آمده و خلاصه نتایج برای شرایط عملکرد واقعی در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است. لازم به یادآوری است اندازه‌گیری کسر جرمی بخار سوخت در آزمایشگاه PDA دانشگاه تهران صورت گرفته است. [۱۴]

۵- مراحل شبیه‌سازی

داده‌های لازم برای شبیه‌سازی عبارتند از:

(۱) داده‌های هندسی و ضریب اصطکاکی اجزاء جانبی موتور،

(۲) مشخصات موتور از قبیل قطر، خیز سمبه، نسبت تراکم، زمان بندی دریچه‌ها و جرجه،

(۳) داده‌های عملکرد موتور به همراه دمای دیواره‌های داکت‌ها، اتصالات و اجزاء موتور.

تعدادی از این متغیرها مانند خصوصیات هندسی از اندازه‌گیری مستقیم روی قطعات بدست می‌آیند و برخی نیز مانند زمان بندی دریچه‌ها و نمودار پاشش از نتایج آزمایش قطعات و یا آزمایش گرم موتور گرفته می‌شوند. برخی از داده‌ها نیز مانند خصوصیات احتراقی و دمای دیواره‌ها با کمک حدس مهندسی وارد می‌گردند و در حین نگاشت الگو با حالت واقعی تصحیح می‌شوند [۱۶، ۱۷، ۱۵]. موتور بررسی شده، یک موتور ۴ استوانه افشانه‌ای با پاشش غیر مستقیم در راهگاه ورودی بوده که مشخصات عمومی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ مشخصات موتور و مشخصه‌های عملکرد در ۲۶۰۰ د.د.د

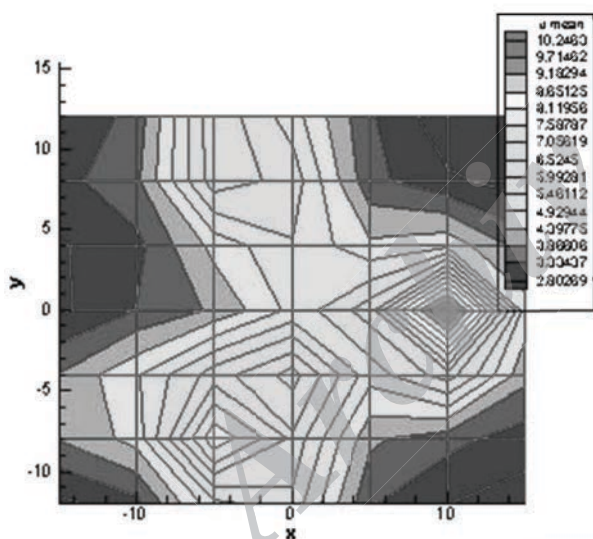
قطر سمبه	۸۱،۴ میلی‌متر
خیز سمبه	۸۳ میلی‌متر
حجم	۱۶۸۰ (CC)
تعداد استوانه	۴
عرض پالس پاشش	۲۳۰ درجه
زمان بندی دریچه دود	۱۱۶،۳ تا ۳۷۷،۰
زمان بندی دریچه هوا	۶۰۴،۲ تا ۳۲۵،۵
نسبت تراکم	۹،۳

۱- Phase Doppler Anemometry

۶- نگاهت الگو

بین داده‌های ۱۵۰۰ قطره در طول مدت ۱۵ ثانیه انجام می‌شود. با توجه به این میانگین‌گیری، نتایج به ازای هر تکرار مشابه بوده و نیاز به تکرار آزمون نخواهد بود. آزمون برای مجموعه نقاط واقع در صفحه‌های عمود بر محور افشانه در خروجی از نازل و در فاصله ۱۰ سانتیمتری از نازل صورت گرفته است. علت انتخاب فاصله ۱۰ سانتیمتری، صفحه هدف‌گیری افشانه در راهگاه ورودی به استوانه در موتور نمونه است که در این فاصله از نازل قرار گرفته است.

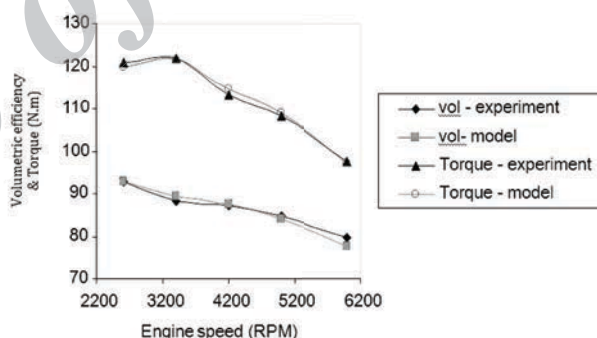
افشانه مورد نظر از نوع افشانه‌ها با شیر برقی ساچمه‌ای (Ball valve) با جریان چندگانه می‌باشد. با باز شدن شیر ساچمه‌ای جریان اصلی سوخت از نازل اولیه عبور کرده و به مرکز یک صفحه که دارای سه سوراخ در اطراف است برخورد می‌کند و سپس به سه جت مجزا تقسیم می‌شود. شکل ۲ کانتور توزیع سرعت در راستای محوری را در صفحه عمود بر محور پاشش در فاصله ۱۰۰ میلی‌متری از نازل نشان می‌دهند.



شکل ۲ کانتور توزیع سرعت محوری در فاصله ۱۰ cm از نازل (m/s)

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود سه ناحیه با سرعت زیاد وجود دارد که بیانگر وجود سه جت مجزا در پاشش افشانه است که دارای نرخ جرمی یا به عبارتی قدرت متفاوت هستند به طوری که سرعت قوی‌ترین جت در حدود دو برابر ضعیف‌ترین جت است. یکی از شاخص‌های مهم در معرفی ساختار یک افشانه و خصوصیات پاشش آن، نمودار توزیع فراوانی قطرات بر حسب ابعاد است که بیانگر نحوه توزیع قطرات در

همان‌طور که قبلاً گفته شد، برخی از داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی، مانند دمای دیواره‌های قسمت‌های مختلف موتور و اجزاء استوانه، ضرایب افزایش انتقال حرارت، ضرایب افت اصطکاکی داخل استوانه و مشخصه‌های احتراقی بر اساس حدس مهندسی به دست می‌آیند و در حل‌های اولیه نتایج شبیه‌سازی با نمونه واقعی اندکی اختلاف دارد. بنابراین پس از شبیه‌سازی موتور، لازم است صحت شبیه‌سازی و میزان تطابق الگو با حالت واقعی، با تنظیم مجدد این دسته از متغیرها، تأیید شود. برای این منظور متغیرهای بازده تنفسی، فشار بیشینه استوانه، گشتاور و دمای دود خروجی به ترتیب تنظیم و نتایج شبیه‌سازی برای شرایط بار مشخص و در محدوده سرعت ۲۶۰۰ تا ۶۰۰۰ د.د.د با داده‌های حاصل از آزمون گرم موتور با لگام ترمز مقایسه شده است. [۱۷،۱۶] در شکل ۱ مقادیر بازده تنفسی و گشتاور الگو در محدوده سرعت ۲۶۰۰ تا ۶۰۰۰ د.د.د با نتایج عملکرد واقعی موتور مقایسه شده است.



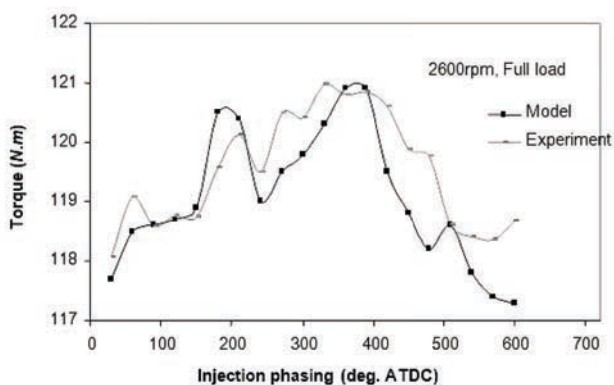
شکل ۱ مقایسه بازده تنفسی و گشتاور الگو با داده‌های آزمایش گرم در دوره‌های مختلف

۷- اندازه‌گیری مشخصه‌های پاشش

مشخصه‌های پاشش افشانه با استفاده از روش PDA شناسایی شده است. دستگاه PDA که با استفاده از پدیده اختلاف بسامد داپلر به اندازه‌گیری خصوصیات پاشش می‌پردازد و قادر به اندازه‌گیری متغیرهایی چون قطر میانگین و قطر ساتر (SMD) ^۱، سرعت ذرات در دو راستا، میزان اغتشاش ذرات، درصد کروی بودن و تعداد قطرات در حجم اندازه‌گیری می‌باشد. دستگاه PDA قادر به اندازه‌گیری سرعت در دو راستا می‌باشد (در شرایط آزمایش سرعت‌های محوری و شعاعی) دارای دو جفت پرتو با رنگ‌های آبی و سبز می‌باشد. اندازه‌گیری در هر نقطه با میانگین‌گیری

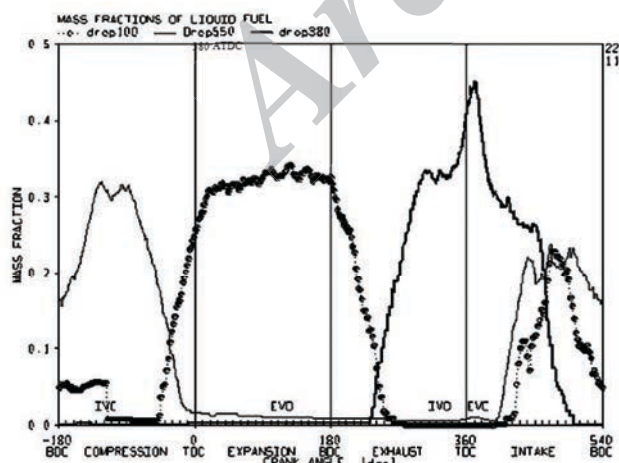
^۱ - Sauter Mean Diameter

انتهای راهگاه و نزدیک دریچه ورودی می‌رسد. عرض پالس پاشش در این حالت برابر ۲۳۰ درجه زاویه لنگ می‌باشد. در شکل ۴ نمودار تغییرات گشتاور ترمزی موتور، حاصل از حل الگوی نرم‌افزاری و نتایج آزمایش موتور، برای شرایط ذکر شده، نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، مقدار بیشینه گشتاور در حالتی رخ می‌دهد که انتهای زمان پاشش یا حالت پاشش در زاویه ۳۶۰ تا ۳۹۰ ATDC یعنی ابتدای مرحله مکش قرار گیرد.



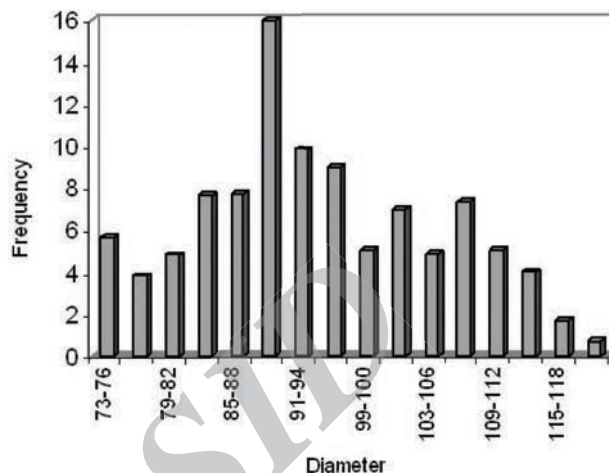
شکل ۴ تغییرات گشتاور ترمزی موتور، حاصل از حل الگو نرم‌افزاری و نتایج آزمایش موتور

به منظور بررسی علت بیشینه بودن گشتاور در این زاویه، چگونگی ورود قطرات سوخت به داخل استوانه برای چند حالت با زمان انتهای پاشش متفاوت (حالت‌های پاشش) ۱۰۰ و ۳۸۰ و ۵۰۰ بعد از نقطه مکث بالا و با مدت زمان پاشش یکسان در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی کسر جرمی قطرات سوخت در انتهای راهگاه برای حالت‌های پاشش ۱۰۰، ۳۸۰ و ۵۵۰ درجه زاویه لنگ

مخروط پاشش است. این نمودار که به منظور بررسی نحوه توزیع قطرات در پشت دریچه ورودی، در فاصله ۱۰۰ میلی‌متر از نازل افشانه و در فشار پاشش ۳۰۰ kpa به دست آمده، در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ درصد توزیع ابعادی قطرات در فاصله ۱۰۰ میلی‌متر از نازل (پشت دریچه) برای فشار ۳۰۰ kpa

در این نمودار محور افقی، قطر ذرات و محور عمودی فراوانی آن‌ها را نشان می‌دهد. خلاصه نتایج برای استفاده در الگوی افشانه در جدول ۲ ارائه شده است.

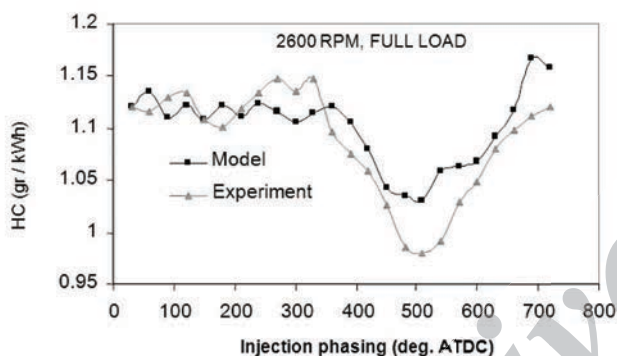
جدول ۲ مشخصات موتور و مشخصه‌های عملکرد در ۲۶۰۰ د.د.د

فشار سوخت (KPA)	۳۰۰
سرعت اولیه متوسط (S/M)	۱۲٫۱
قطر متوسط SMD (میکرون)	۷۷
نرخ پاشش (HR/KG)	۸٫۳۹
زاویه مخروط پاشش (درجه)	۱۵

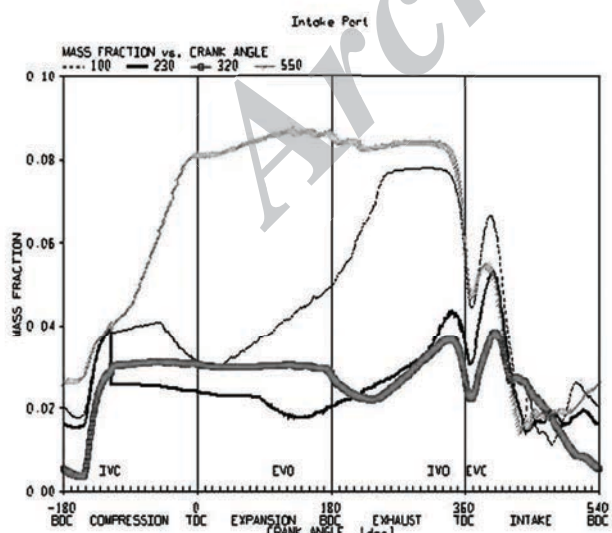
۸- بررسی زمان پاشش سوخت در سرعت کند

در این قسمت با استفاده از شبیه‌سازی صورت گرفته توسط نرم افزار Wave که در قسمت ۲ توضیح داده شد به بررسی فرآیندهای تأثیر گذار بر فرآیند توزیع مخلوط سوخت و هوا در استوانه پرداخته شد. در ابتدا تأثیر زمان پاشش برای سرعت ۲۶۰۰ د.د.د و حالت تمام بار با تغییر آن در طول چرخه کامل عملکرد موتور بررسی می‌شود. با توجه به زمان شروع پاشش سوخت در دور ۲۶۰۰ (ATDC 90)، اولین قطرات سوخت پس از گذشت تقریباً ۷۰ درجه یا ۴٫۵ ms به انتهای راهگاه می‌رسند و به دنبال آن پس از ۲۰ ms پس از شروع پاشش، غشاء سوخت به

کم سطوح و عدم ورود شعله به شکاف‌ها مانع از سوختن مناسب آن‌ها می‌شود. با افزایش فشار محفظه احتراق در مرحله تراکم و به خصوص زمان احتراق، میزان نفوذ سوخت به بیشینه مقدار خود می‌رسد و با کاهش فشار در مرحله انبساط و تخلیه، سوخت مخفی شده در شکاف‌ها مجدداً وارد محفظه استوانه می‌شود و همراه با گازهای خروجی از استوانه خارج می‌شود. شکاف‌ها و رواداشتهای موجود در اجزاء استوانه با توجه به خصوصیات هندسی اجزاء، در شبیه‌سازی محفظه احتراق اعمال می‌شوند. با افزایش فشار بیشینه محفظه احتراق و همچنین نفوذ بیشتر سوخت به داخل لایه روغن و شکاف‌ها و درزها، میزان تولید HC ناشی از به همین افتادن سوخت در شکاف‌های محفظه احتراق افزایش می‌یابد و به همین علت در بعضی از حالات علی‌رغم بهبود در خصوصیات پاشش و تبخیر سوخت با افزایش میزان HC روبرو می‌شویم.



شکل ۶ تغییرات میزان آلاینده HC بر حسب gr/kwh با تغییر زمان انتهای پاشش (حالت پاشش) با استفاده از نتایج شبیه‌سازی و آزمایش



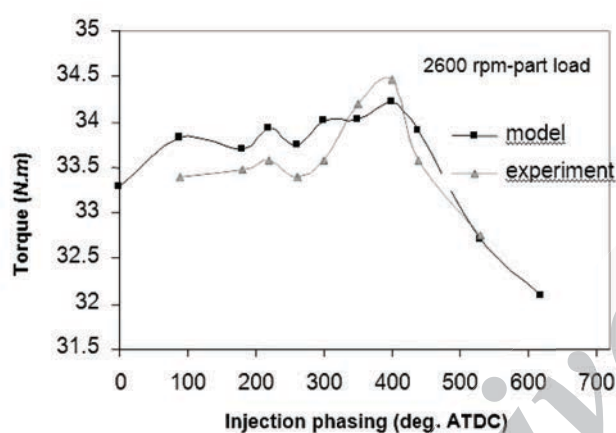
شکل ۷ کسر جرمی بخار سوخت در انتهای راهگاه به ازای پاشش سوخت در زمان‌های مختلف

این نتایج با توجه به شبیه‌سازی یک بعدی جریان در راهگاه ورودی بدست می‌آید. با توجه به شکل در حالتی که انتهای پاشش در ATDC ۱۰۰ قرار دارد، بیشتر سوخت در مرحله انبساط به پشت دریچه می‌رسد. در حالت ATDC ۵۵۰، قطرات در طول مرحله مکش به پشت دریچه می‌رسند و قسمتی از سوخت در ابتدای مرحله تراکم در اثر شتاب منفی جریان هوا، به راهگاه پس زده می‌شود و پس از بسته شدن دریچه ورودی در راهگاه باقی می‌ماند. باقی ماندن قسمتی از سوخت در راهگاه، علت کاهش گشتاور موتور در این حالت می‌باشد. در حالتی که انتهای پاشش در زاویه ATDC ۳۸۰ قرار دارد، بیشتر قطرات در مرحله تخلیه و در زمان باز شدن دریچه ورودی به پشت دریچه می‌رسند و تمام قطرات سوخت در نیمه اول مرحله تراکم وارد استوانه می‌شوند. در این حالت علاوه بر اینکه جریان برگشتی گازهای داغ استوانه موجب ریزپاشی غشاء سوخت جمع شده در انتهای راهگاه و تبخیر بهتر آن می‌شود، با ورود سوخت به استوانه در ابتدای مرحله مکش، فرصت کافی برای تبخیر سوخت در استوانه و اختلاط بهتر سوخت و هوا مهیا می‌شود. بنابراین مقدار بیشینه گشتاور در این حالت پاشش رخ می‌دهد. زمانی که بیشترین قطرات به انتهای راهگاه می‌رسند، با توجه به سرعت پاشش، طول راهگاه و عرض پالس پاشش قابل محاسبه می‌باشد.

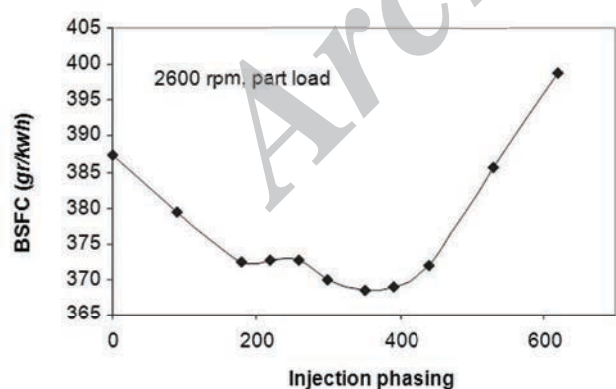
در شکل ۶ تغییرات میزان آلاینده HC بر حسب gr/kwh با تغییر زمان انتهای پاشش دیده می‌شود. با توجه به کم بودن میزان گشتاور ترمزی موتور در حالت پاشش حدود ATDC ۵۰۰، و در نتیجه کم بودن بیشینه فشار استوانه در این حالت و همچنین تبخیر مناسب سوخت در راهگاه قبل از باز شدن دریچه ورودی، میزان آلاینده HC در حالت پاشش ATDC ۵۰۰ کمینه می‌باشد. افزایش چشمگیر میزان تبخیر سوخت در راهگاه در حالت پاشش ATDC ۵۵۰ که منجر به کاهش غشاء مایع سوخت در استوانه و تشکیل مخلوط بهتر می‌شود، در مقایسه با حالت‌های دیگر در شکل ۷ نشان داده شده است. از طرفی دیگر زیاد بودن میزان گشتاور ترمزی موتور در محدوده حالت پاشش حدود ATDC ۳۸۰-۳۳۰ و در نتیجه زیاد بودن بیشینه فشار استوانه در این حالت دلیلی بر افزایش میزان آلاینده HC در این محدوده حالت پاشش می‌باشد.

یکی از عوامل موثر در تولید آلاینده HC، نفوذ سوخت به لایه روغن و همچنین داخل شکاف‌ها و درزهای موجود در بستار، جداره‌های سمیه با استوانه، حلقه‌ها و محل قرار گرفتن شمع می‌باشد. نفوذ سوخت به داخل این شکاف‌ها و خاموش شدن شعله در این مکان‌ها در اثر دمای

در شکل ۱۰ تغییرات گشتاور ترمزی موتور در شرایط ذکر شده در حالت‌های پاشش مختلف نشان داده شده، و نتایج برای نمونه شبیه‌سازی شده و آزمایش شده مقایسه شده است. گشتاور بیشینه در حالتی رخ می‌دهد که پایان پاشش سوخت یا حالت پاشش در زاویه ۳۹۰ ATDC یعنی در ابتدای مرحله مکش قرار گیرد. در این صورت بیشترین مقدار قطرات سوخت در لحظه باز شدن دریچه ورودی به انتهای راهگاه و پشت دریچه می‌رسند و کمترین میزان سوخت در راهگاه باقی می‌ماند. در این حالت مقدار مصرف سوخت ویژه نیز کمینه می‌باشد (شکل ۱۱). در انتخاب حالت پاشش بهینه لازم است علاوه بر در نظر گرفتن میزان گشتاور مناسب، تا حد امکان از زیاد بودن آلاینده‌های خروجی جلوگیری کرد.



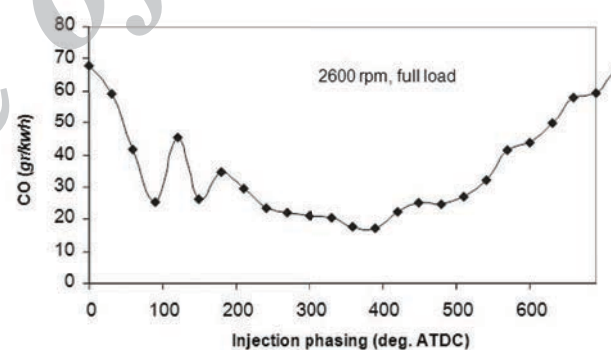
شکل ۱۰ تغییرات گشتاور ترمزی در حالت‌های پاشش مختلف برای الگو و آزمایش



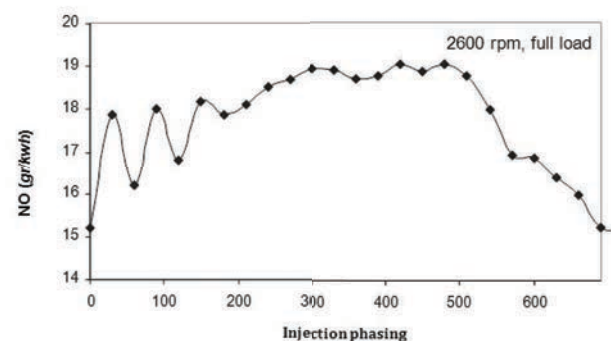
شکل ۱۱ تغییرات مصرف سوخت ویژه ترمزی در حالت‌های پاشش مختلف

به این منظور میزان آلاینده‌های NO_x , HC , CO که از آزمایش موتور بدست آمده در حالت‌های پاشش مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده

در شکل‌های ۸ و ۹ تغییرات آلاینده CO و NO_x همانند نمودارهای قبل نشان داده شده است. میزان CO در حالت گشتاور بیشینه یعنی حالت پاشش حدود ۳۹۰ درجه به علت احتراق مناسب که منجر به دما و فشار زیاد در محفظه احتراق می‌شود دارای مقدار کمینه است. در عوض میزان آلاینده NO_x در این حالت در اثر دمای داغ محصولات احتراق دارای نرخ تولید زیادی می‌باشد، به طوری که مطابق شکل ۹ میزان NO_x از حالت پاشش ۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه دارای بیشینه مقدار است. زیادی با توجه به مقادیر گشتاور و آلاینده‌ها برای سرعت ۲۶۰۰ د.د.د با بار بیشینه، حالت پاشش ۳۹۰ درجه پس از نقطه مکث بالا بهترین زمان برای انتهای پاشش می‌باشد. چون بسیاری از مسافرت‌های درون شهری در سرعت‌های تقریباً کند و با بارمیانمی صورت می‌گیرد، تحلیل نتایج و یافتن زمان پاشش بهینه در این شرایط عملکرد موتور از اهمیت خاصی برخوردار است. به این منظور روش‌های ذکر شده، در این قسمت برای سرعت ۲۶۰۰ د.د.د و Part Load ($MAP=40kpa$) انجام شده و زمان پاشش بهینه بدست می‌آید. لازم به ذکر است عرض پالس پاشش در این حالت برابر با ۱۰۰ درجه زاویه لنگ می‌باشد.



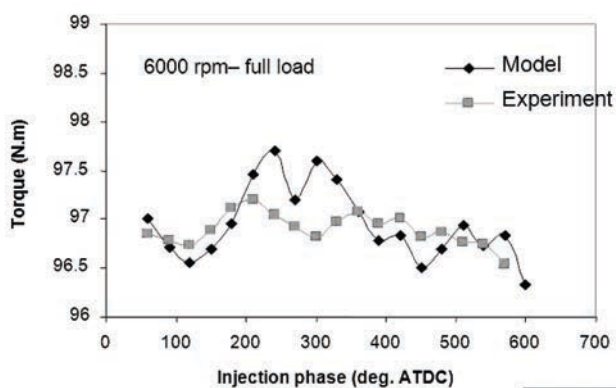
شکل ۸ تغییرات میزان آلاینده CO بر حسب gr/kwh با تغییر زمان انتهای پاشش (حالت پاشش)



شکل ۹ تغییرات میزان آلاینده NO بر حسب gr/kwh با تغییر زمان انتهای پاشش (حالت پاشش)

۱- Part load

مینیمم گشتاور در حالت‌های پاشش ۱۵۰ و ۴۵۰ درجه رخ می‌دهد. با استفاده از نمودار کسر جرمی قطرات در راهگاه و نحوه ورود آن‌ها به استوانه می‌توان علت تغییرات گشتاور در زوایای مختلف را بررسی کرد.



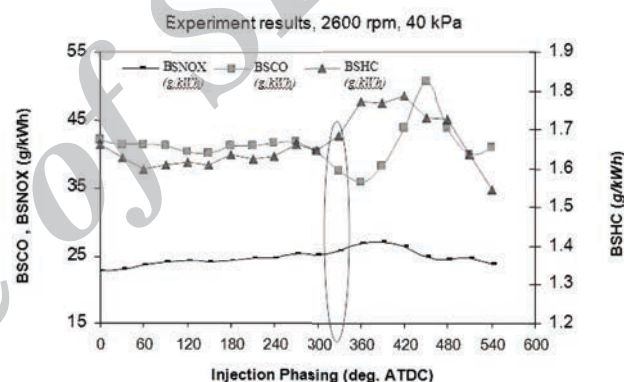
شکل ۱۳ مقایسه مقادیر گشتاور ترمزی موتور در حالت‌های پاشش مختلف در الگوی شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایش موتور

این نمودار برای حالت‌های پاشش ۳۰۰، ۳۶۰ و ۴۵۰ درجه در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در حالت پاشش ۳۰۰ درجه، بیشتر قطرات سوخت کمی قبل از باز شدن دریچه ورودی به انتهای راهگاه می‌رسند و در انتهای مرحله مکش و قبل از بسته شدن دریچه ورودی تمام قطرات وارد استوانه می‌شوند. در این حالت پاشش همزمان با بسته شدن دریچه، قطرات حاصل از پاشش سوخت در چرخه بعدی به انتهای راهگاه می‌رسند در حالت پاشش ۳۶۰ درجه که میزان گشتاور آن کمتر از حالت قبل (حالت پاشش ۳۰۰) می‌باشد، ورود قطرات سوخت به استوانه تا اوایل مرحله تراکم ادامه می‌یابد و در اثر شتاب منفی جریان هوا در شروع مرحله تراکم، همه قطرات نمی‌توانند به راحتی وارد استوانه شوند. در حالت پاشش ۴۵۰ درجه که گشتاور موتور در آن کمترین مقدار را داراست، پاشش سوخت کمی دیر آغاز شده و تمام قطرات قبل از بسته شدن دریچه وارد استوانه نمی‌شوند. به همین دلیل قسمت چشمگیری از سوخت در راهگاه باقی می‌ماند و میزان غشاء مایع سوخت در راهگاه افزایش می‌یابد. در صورتی که مقدار غشاء مایع سوخت در راهگاه پس از بسته شدن دریچه ورودی در حالت پاشش ۳۰۰ درجه بسیار ناچیز می‌باشد. [۱۵]

در سرعت‌های تند و تمام بار، نسبت هوا به سوخت به گونه‌ای تنظیم می‌شود که مخلوطی نسبتاً غنی در استوانه ایجاد شود. به این ترتیب در اثر احتراق نامناسب مخلوط، دمای احتراق کاهش یافته و از افزایش

۱- Full load

است. با توجه به شکل میزان HC در محدوده ۳۶۰-۴۲۰ deg. ATDC دارای بیشترین مقدار می‌باشد. علت آن بیشینه بودن فشار بیشینه محفظه احتراق در این رنج حالت پاشش در نتیجه احتراق بهتر است. به همین علت میزان CO در این محدوده (۳۳۰-۳۹۰ deg. ATDC) دارای کمترین مقدار است. همچنین با توجه به شکل ۱۲ میزان آلاینده NO در حالت‌های پاشش ۳۳۰-۴۲۰ به علت دمای احتراق داغ‌تر دارای مقادیر بیشینه است. بنابراین با در نظر گرفتن مقادیری تا حد امکان بهینه برای گشتاور، مصرف سوخت و میزان آلاینده‌های موتور، پیش‌بینی می‌شود، حالت پاشش ۳۳۰ deg. ATDC نقطه‌ای مناسب برای انتهای پاشش در سرعت ۲۶۰۰ د.د.د. و با بار میانی است، زیرا در این زاویه بدون افت زیاد در مقدار گشتاور، میزان آلاینده‌ها در حد نسبتاً کمی می‌باشد.



شکل ۱۲ تغییرات میزان آلاینده‌های NO, HC, CO حاصل از آزمایش موتور در حالت‌های پاشش مختلف

۹- بررسی زمان پاشش سوخت در سرعت‌های تند

در این قسمت مراحل انجام شده در قسمت قبل برای سرعت ۶۰۰۰ د.د.د. و با بار حداکثر که بیانگر سخت‌ترین شرایط عملکرد موتور است انجام می‌شود. در این حالت عرض پالس پاشش برابر ۵۵۰ درجه زاویه لنگ می‌باشد.

در شکل ۱۳ مقدار گشتاور ترمزی موتور در حالت‌های پاشش مختلف برای نتایج حل الگوی شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایش عملکرد واقعی موتور نشان داده شده است. با مقایسه این نمودار با نمودار گشتاور در دوره‌های کم مشاهده می‌شود، تغییرات گشتاور موتور در سرعت‌های تند کمتر از سرعت‌های کند می‌باشد. با توجه به این نمودار گشتاور بیشینه در محدوده ۲۱۰-۲۴۰ deg. ATDC رخ می‌دهد. بر روی نمودار حاصل از حل الگو، دو پیک گشتاور در زوایای ۲۴۰ و ۳۰۰ درجه وجود دارد و

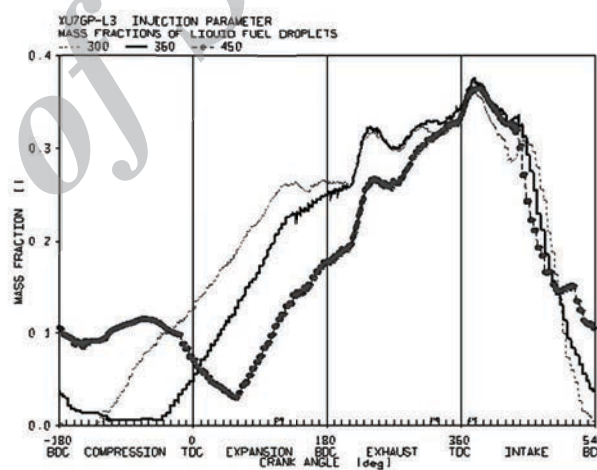
جدول ۳ خصوصیات جریان هوای ورودی به راهگاه

دور موتور	سرعت هوا	دمای متوسط	فشار متوسط	دمای دیواره راهگاه
2600(rpm)	50(m/s)	304(k)	0.862(bar)	360(k)
6000(rpm)	113(m/s)	299(k)	0.806(bar)	460(k)

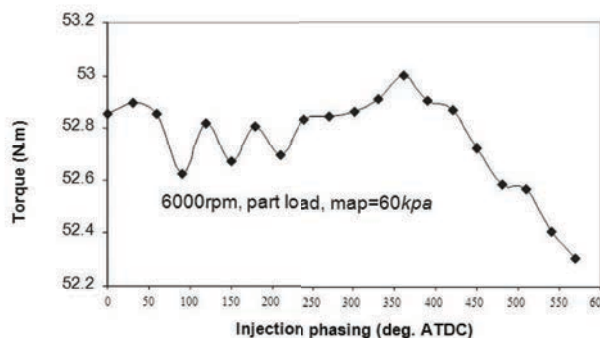
۱- نتیجه‌گیری

یکی از عوامل موثر بر احتراق کامل و در نتیجه میزان آلاینده‌های خروجی و عملکرد موتور ایجاد مخلوط همگنی از سوخت و هوا در استوانه می‌باشد. به این منظور لازم است بیشترین حد ممکن از سوخت پاشیده شده در راهگاه تبخیر شده و با هوای ورودی ترکیب شود و کمترین میزان سوخت به صورت غشاء مایع بر روی دیواره‌های راهگاه و استوانه تشکیل شود. برای رسیدن به این هدف اطلاع از ساختار و الگوی پاشش و اینکه سوخت تحت چه شرایط و در چه زمانی به داخل راهگاه پاشیده شود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در حالتی که زمان انتهای پاشش (حالت پاشش) به گونه‌ای باشد که بیشتر قطرات سوخت در انتهای مرحله تخلیه و در زمان باز شدن دریچه ورودی به پشت دریچه برسند و تمام قطرات سوخت در نیمه اول مرحله تراکم وارد استوانه شوند، فرصت کافی برای ورود تمام سوخت به محفظه احتراق و تبخیر آن در استوانه و اختلاط بهتر سوخت و هوا مهیا می‌شود. بنابراین مقدار بیشینه گشتاور در این حالت پاشش رخ می‌دهد. در این حالت به علت احتراق بهتر و دما و فشار احتراق بیشتر، نرخ تولید آلاینده‌های NO و CO به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. زمانی که بیشترین قطرات به انتهای راهگاه می‌رسند، با توجه به سرعت پاشش، طول راهگاه و عرض پالس پاشش قابل محاسبه می‌باشد.

دمای اجزاء موتور، واکنشگر و موتور تا بیشتر از میزان مجاز جلوگیری می‌شود. با توجه به این که موتور در این شرایط که جزء حادترین حالات عملکرد موتور است کمتر قرار می‌گیرد، لذا میزان آلاینده‌های خروجی از موتور در این شرایط کمتر بررسی شده است و توان موتور از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. بنابراین میزان آلاینده‌های موتور در این شرایط برای یافتن حالت پاشش بهینه مورد توجه قرار نمی‌گیرد و تنها میزان گشتاور ترمزی و مصرف سوخت ویژه بررسی می‌گردد. با توجه به مطالب ذکر شده، با توجه به میزان گشتاور ترمزی حاصل از آزمایش موتور و در نتیجه میزان مصرف سوخت ویژه حالت پاشش بهینه در سرعت ۶۰۰۰ د.د.د و تمام بار ۲۱۰ یا ۳۶۰ deg. ATDC می‌باشد. همچنین با استفاده از نمودار تغییرات گشتاور ترمزی در سرعت ۶۰۰۰ د.د.د و نیمه بار (Part Load) که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، حالت پاشش بهینه ۳۶۰ deg. ATDC به دست می‌آید.



شکل ۱۴ تغییرات مصرف سوخت ویژه ترمزی در حالت‌های پاشش مختلف



شکل ۱۵ تغییرات مصرف سوخت ویژه ترمزی در حالت‌های پاشش مختلف

References:

1. F. Zhao, M.-C. Lai, "The Spray Characteristics of Automotive Port Fuel Injection – A Critical Review", SAE Technical Paper, No. 950506, 1995.
2. W. Min Ren, H. Sayar, "Influence of Nozzle Geometry on Spray Atomization and Shape for Port Fuel Injector", SAE Technical Paper, No. 01-0608, 2001.
3. Lai, M.-C., Zhao, F.-Q., "The Structure of Port Injector in Gasoline Engines", Proceedings of Advanced Spray Combustion (ISASC), Hiroshima, Japan, July 6-8, 1994, pp.79-89.
4. M. Behnia, B.E Milton, "Fundamentals of Fuel Film Formation and Motion in SI Engine Induction Systems", Energy conversion and management 42, P.1751-1768, 2001
5. S.K. Chen, A. Lefebvre, "Influence of Ambient Air Pressure on Effervescent Atomization", AIAA Journal, 1993, pp10-15.
6. S.D. Jackson, P. Williams, "Development of a Fuelling System to Reduce Cold-Start Hydrocarbon Emissions in an SI Engine", SAE Technical Paper, No. 961119, 1996.
7. B.F Fulcher, B.F Gajdeczko, "The Effect of Fuel Atomization, Vaporization, and Mixing on the Cold Start UHC Emissions", SAE paper No. 952482, 1995
8. E. Movahednejad, F. Ommi, S. M. Hosseinalipour, C. P. Chen, S. A. Mahdavi, "Application of maximum entropy method for droplet size distribution prediction using instability analysis of liquid sheet", Heat Mass Transfer, 2011, 47:1591-1600.
9. E. Movahednejad, F. Ommi, S.M. Hosseinalipour, Prediction of Droplet Size and Velocity Distribution in Droplet Formation Region of Liquid Spray, Entropy 2010, 12, 1484-1498.
10. G., Chen, A., Aggarwal, "Unsteady Multiphase Intake Flow in a Port-injected Gasoline Engine", SAE Technical Paper, No. 960074.
11. R. Meyer, J. B. Heywood, "Effect of Engine and Fuel Variables on Liquid Fuel Transport into the Cylinder in Port-Injected SI Engines", SAE Technical Paper, No. 01-0563, 1999.
12. A. A., Amer, T.-H., Chue and M.-C., Lai, "Modeling Turbulence Primary Breakup and Its Application in Director-Plate-Compounded Port Injectors", Proceedings of the eighth Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS-America, May 21-24, 1995, Troy, MI.
13. Aggarwal, S.k., Chen,G., "Vaporization Behavior of Fuel Droplets in a Hot Air Stream", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.30, pp2669-2673, 1.
14. F. Ommi, M. Hosseinali Pour, E. Movahednejad, "Experimental study of spray injectors with multiple flow", Thirteenth Annual Conference on Mechanics, Isfahan, 1384. (in Farsi).
15. E. Movahednejad, "Reducing fuel consumption and pollutants in the injection gasoline engines with improved injector performance parameters", MS Thesis in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tarbiat Modarres University, 1383. (in Farsi).
16. E. Movahednejad, F. Ommi, M. Hossinalipour, M. Karbasforousha, Experimental and Theoretical Study of injection parameters on performance and Fuel Consumption in a Port-Injected Gasoline Engine, SAE technical papers, No. 2005-01-3805.
17. Fathollah Ommi, Ehsan Movahednejad, Kouros Nekofar, Theoretical and Experimental Study of Multi-Phase Flow in the Intake Port of a Port Fuel Injection Engine, Leonardo Journal of Sciences (LJS), Issue 14 (January-June), 2009 (8), p. 31-49.