

# بررسی تاثیر زمان پاشش سوخت بر عملکرد و میزان آلاینده‌ها در موتورهای انژکتوری با پاشش چند نقطه‌ای (MPFI)

فتح اله امی<sup>i</sup>، احسان موحد نژاد<sup>ii</sup>، مصطفی حسینی پور<sup>iii</sup>

## چکیده

یکی از پارامترهای موثر بر عملکرد موتورهای انژکتوری و میزان آلاینده‌های خروجی از آنها، تعیین سازوکار زمانی پاشش و زمان مناسب برای پاشش در هر کدام از مکانیسم‌ها (ترتیبی، نیمه ترتیبی و همزمان) است. زمان پاشش سوخت به طور مستقیم بر چگونگی تبخیر سوخت، اختلاط هوا و سوخت، میزان تشکیل فیلم مایع در درگاه ورودی<sup>1</sup> و میزان سوخت وارد شده به سیلندر تاثیر می‌گذارد و بر این اساس، نقش مهمی در عملکرد مناسب موتور و کنترل میزان آلاینده‌های خروجی بخصوص UHC ایفا می‌کند. در این مقاله، تاثیر زمان پاشش سوخت در سازوکار زمانی ترتیبی<sup>1</sup>، با استفاده از مدل ایجاد شده از موتور XU7JP-L3 (مورد استفاده در خودرو سمند) در کد مهندسی Wave و با استفاده از مدل انژکتور پالس ویدس<sup>2</sup> بررسی می‌شود و با نتایج تست موتور در سرعت‌های ۲۶۰۰ تا ۶۰۰۰ RPM و در حالت تمام بار و نیمه بار مقایسه می‌شود. دقت مدل‌سازی با استفاده از داده‌های حاصل از تست گرم موتور تایید شده و تطابق زیادی را با داده‌های واقعی موتور نشان می‌دهد. با توجه به میزان گشتاور موتور و آلاینده‌های خروجی از موتور، زمان بهینه پاشش در سرعت‌ها و بارهای مختلف بدست می‌آید.

## کلمات کلیدی

موتور، انژکتور، زمان پاشش، آلاینده، عملکرد

## *Investigation of Injection Timing on Performance and Exhaust Emissions in a MPFI Gasoline Engine*

F. Ommi, E. Movahednejad, M. Hosseinalipour

### ABSTRACT

For spark ignition engines, the fuel-air mixture preparation process is known to have a significant influence on engine performance and exhaust emissions. In this paper, an experimental study is made to characterize the spray characteristics of an injector with multi-disc nozzle used in the engine. The distributions of the droplet size and velocity and volume flux were characterized by a PDA system. Also a model of a 4 cylinders multi-point fuel injection engine was prepared using a fluid dynamics code. By this code one-dimensional, unsteady, multiphase flow in the intake port has been modeled to study the mixture formation process in the intake port. In addition, one-dimensional air flow and wall fuel film flow and a two-dimensional fuel droplet flow have been modeled, including the effects of in-cylinder mixture back flows into the port. The accuracy of model was verified using experimental results of the engine testing showing good agreement between the model and the real engine. As a result, predictions are obtained that provide a detailed picture of the air-fuel mixture properties along the intake port. A

<sup>i</sup> استادیار، دانشگاه تربیت مدرس تهران، دانشکده فنی، صندوق پستی ۱۴۲-۱۴۱۱۵ : E-mail: f\_ommi@yahoo.com

<sup>ii</sup> دانشجوی دکتری دانشگاه تربیت مدرس، تلفکس: ۸۸۰۰۲۸۹۳ : E-mail: emovahed@yahoo.com

<sup>iii</sup> استادیار دانشگاه علم و صنعت

comparison was made on engine performance and exhaust emission in different fuel injection timing for 2600 and 6000 rpm and different loads. According to the present investigation, optimum injection timing for different engine operating conditions was found.

#### KEYWORDS

Engine, Injector, Injection Timing, Emission, Performance

#### ۱- مقدمه

در این مقاله، تاثیر مکانیسم زمانی پاشش بر عملکرد و میزان آلاینده‌ها مطالعه شده است. برای این منظور، مدل این موتور از ورودی هوا به دریچه گاز تا خروجی گاز از اگزوز شبیه سازی شده است. دقت مدل سازی با استفاده از داده های حاصل از تست گرم موتور با دستگاه دینامومتر برای محدوده سرعت ۲۶۰۰ تا ۶۰۰۰ RPM و با مقایسه نمودار فشار سیلندر، راندمان حجمی و گشتاور تایید شده و تطابق زیادی با داده های واقعی موتور داشته است.

#### ۲- مدل سازی عددی

نرم افزار Wave یک کد دینامیک گازی یک بعدی برای تحلیل دینامیک امواج فشاری، جریان جرمی و افت انرژی در انواع سیستم‌ها است. اساس کار این نرم افزار بر پایه حرکت امواج فشاری رفت و برگشتی در طول سیستم و انعکاس آنها از انتهای باز یا بسته و محاسبه دما و فشار سیال می باشد. این نرم افزار به مدل سازی جریان سیال تراکم پذیر با استفاده از انواع مختلف حجم، کانال، لوله، ارفیس و به کارگیری شرایط مرزی به عنوان محیط قادر است و انواع مختلف نمودارها از پارامترهای مختلف موتور را در خروجی ایجاد می کند. نرم افزار Wave با داشتن مدل های مختلف انژکتور و با استفاده از معادلات حاکم بر حرکت و تبخیر قطرات، می تواند فرایند پاشش، توزیع و تبخیر قطرات و تشکیل فیلم سوخت و انتقال آن در درگاه ورودی را پیش بینی کند. این نرم افزار دو مدل برای پیش بینی تبخیر سوخت دارد. در مدل عمومی اول سوخت مایع وارد شده به سیلندر در شرایط فشاری بالاتر از فشار بخار مخلوط تبخیر می شود. اگر شرایط داخل سیلندر به گونه ای تغییر کند که فشار بخار اشباع در سطح سوخت مایع تا پایین تر از فشار بخار سوخت مخلوط داخل سیلندر تغییر کند، آنگاه سوخت مجدداً به حالت مایع چگالیده می شود. مدل جامع دوم، حرکت جت سوخت مایع را در دو شکل جابجایی قطرات و فیلم مایع و همچنین تبخیر آن را در مسیر جریان پیش بینی می کند. در مدل پاشش این نرم افزار، محل و زاویه قرار گرفتن انژکتور روی درگاه ورودی، مکان برخورد جت و همچنین زاویه برخورد (برای پیش بینی نوع برخورد) به وسیله کاربر وارد می شود و مدل می تواند سطح پوشیده شده از فیلم

یکی از عوامل موثر بر احتراق کامل و در نتیجه میزان آلاینده های خروجی و عملکرد موتور SI همگنی مخلوط سوخت و هوا در سیلندر است. به این منظور لازم است بیشترین حد ممکن از سوخت پاشیده شده در درگاه ورودی تبخیر شده و با هوای ورودی ترکیب شود و کمترین میزان سوخت به صورت فیلم مایع بر روی دیواره های درگاه ورودی و سیلندر 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 درگاه ورودی پاشیده شود، از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

فهم بهتر خصوصیات پاشش در موتورهای با پاشش غیر مستقیم (Port Fuel Injection Engines) نقش مهمی در تطبیق پارامترهای پاشش با شرایط مختلف عملکرد موتور ایفا می کند و بر این اساس، تحقیقات زیادی در این زمینه روی پاشش انژکتور این دسته از موتورها انجام می شود [۱]-[۷].

همچنین تحقیقات زیادی در زمینه بهبود فرایند تشکیل مخلوط در درگاه ورودی با توجه به پارامترهای عملکردی انژکتور و طراحی هندسه درگاه ورودی صورت گرفته است [۸]-[۱۱].

بسیاری از این تحقیقات از تاثیر متقابل فازهای مختلف در منی فولد یا درگاه ورودی صرف نظر کرده و یا حالت جریان یکنواخت در نظر گرفته اند. برخی نیز با انتخاب سوخت تک جزئی از تاثیر دیفیوژن صرف نظر کرده اند. چن (Chen 1996) با مدل سازی جریان چندفازی گذرا در درگاه ورودی موتور انژکتوری، فرایند اختلاط سوخت و هوا و چگونگی تاثیر سه فاز گاز، قطرات سوخت و لایه نازک سوخت مایع بر هم را بررسی کرد [۸].

با توجه به نتایج تحقیقاتی که نویسندگان این مقاله بر روی سازوکار پاشش و تاثیر پارامترهای عملکرد پاشش در موتور XU7JP-L3 انجام داده اند، خصوصیات و الگوی پاشش انژکتور این موتور شناخته شده و تاثیر فشار و دمای سوخت بر عملکرد و مصرف سوخت و میزان تولید آلاینده ها بررسی شد [۱۲]، [۱۳].

## ۲-۲- مدل انژکتور

مدل استفاده شده برای انژکتور از نوع پالس ویدس است که در آن، دیاگرام پاشش انژکتور، که بیانگر میزان جرم سوخت پاشیده شده بر حسب عرض پالس است، به وسیله کاربر وارد می‌شود. این داده‌ها با استفاده از نتایج تست گرم موتور در شرایط سرعت و بار مورد نظر و با توجه به میزان مصرف سوخت موتور و مقدار عرض پالس پاشش در آن شرایط به دست می‌آیند. داده‌های لازم برای مدل کردن انژکتور عبارتند از: (۱) دمای سوخت، (۲) قطر نازل، (۳) قطر متوسط قطرات (SMD)، (۴) زاویه مخروط پاشش، (۵) سرعت اولیه سوخت، (۶) منحنی پاشش انژکتور، (۷) زمان شروع پاشش بر حسب زاویه لنگ، (۸) عرض پالس پاشش. داده‌های ذکر شده با استخراج مشخصه‌های پاشش از طریق اندازه گیری به وسیله دستگاه PDA به دست آمده و خلاصه نتایج برای شرایط عملکرد واقعی در جدول (۲) ارائه شده است [۱۲].

جدول (۲): مشخصه‌های پاشش انژکتور در دمای ۲۵ درجه

فشار سوخت (kpa)	۲۰۰
سرعت اولیه متوسط (m/sec)	۱۲۰۱
قطر متوسط SMD (Micron)	۷۷
نرخ پاشش (kg/hr)	۸۰۲۹
زاویه مخروط پاشش (Deg.)	۱۵

## ۲-۳- کالیبراسیون مدل

همان‌طور که قبلاً گفته شد، برخی از داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی، مانند دمای دیواره‌های قسمت‌های مختلف موتور و اجزای سیلندر، ضرایب افزایش انتقال حرارت، ضرایب افت اصطکاکی داخل سیلندر 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 مدل‌سازی و میزان تطابق مدل با حالت واقعی، با تنظیم مجدد این دسته از پارامترها تایید شود. برای این منظور، پارامترهای راندمان حجمی، فشار بیشینه سیلندر، گشتاور و دمای اگزوز به ترتیب تنظیم شده و نتایج مدل‌سازی برای شرایط بار مشخص و در محدوده سرعت ۲۶۰۰ تا ۶۰۰۰ rpm با داده‌های حاصل از آزمون گرم موتور با دستگاه دینامومتر مقایسه شده است.

در شکل (۱-الف) مقادیر راندمان حجمی و گشتاور و در شکل (۱-ب) فشار بیشینه سیلندر مدل در محدوده سرعت ۲۶۰۰ تا ۶۰۰۰ RPM با نتایج عملکرد واقعی موتور مقایسه شده است.

سوخت و رژیم برخورد قطرات به سطوح مختلف درگاه ورودی و سوپاپ را پیش بینی کند. رژیم برخورد قطرات پس از برخورد به سطح، بستگی به خصوصیات قطره از جمله سرعت، اندازه، زاویه برخورد، دما و صافی سطح، ضخامت فیلم سوخت و خصوصیات فیزیکی سوخت دارد که با اعداد بدون بعد وبر و لاپلاس بیان می‌شود [۱۴].

مدل احتراق در این نرم افزار، یک مدل ترمودینامیکی گذرا از فرایندهای داخل سیلندر، بر پایه حل معادلات جرم و انرژی با فرض احتراق دو ناحیه ای است که در آن سیلندر به دو ناحیه سوخته و نسوخته تقسیم می‌شود. معادلات جرم، تغییرات جرم داخل سیلندر در نتیجه جریان عبوری از سوپاپ‌ها و پاشش سوخت را تعیین کرده و نرخ هوای عبوری، سوخت تیخیر شده و سوخت مایع و نرخ محصولات احتراق را محاسبه می‌کند. در مدل احتراق استفاده شده، احتراق پیش مخلوط با استفاده از تابع وایب (Wiebe) که کسر جرمی مخلوط سوخته شده را با استفاده از محاسبات ترمودینامیکی توصیف می‌کند، مدل می‌شود.

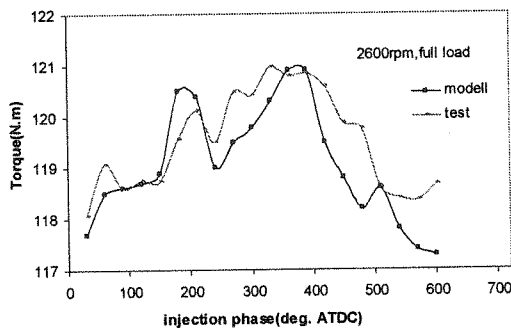
## ۲-۱- مراحل مدل‌سازی

داده‌های لازم برای مدل‌سازی عبارتند از: (۱) داده‌های هندسی و ضریب اصطکاکی اجزای جانبی موتور، (۲) مشخصات موتور از قبیل قطر، کورس، نسبت تراکم، زمانبندی سوپاپ‌ها و جرعه، (۳) داده‌های عملکرد موتور به همراه دمای دیواره‌های کانال‌ها، اتصالات و اجزای موتور. تعدادی از این پارامترها مانند خصوصیات هندسی از اندازه‌گیری مستقیم روی قطعات به دست می‌آیند و برخی نیز مانند زمانبندی سوپاپ‌ها و دیاگرام پاشش از نتایج تست قطعات و یا تست گرم موتور گرفته می‌شوند. برخی از داده‌ها نیز مانند خصوصیات احتراقی و دمای دیواره‌ها با کمک حدس مهندسی وارد می‌گردند و در حین کالیبره کردن مدل با حالت واقعی تصحیح می‌شوند [۱۳].

موتور مورد بررسی، یک موتور ۴ سیلندر انژکتوری با پاشش در درگاه ورودی (Port fuel Injection Engine) و با مکانیسم پاشش نیمه ترتیبی<sup>۱</sup> است که مشخصات عمومی آن در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات موتور و مشخصه‌های عملکرد در 2600rpm

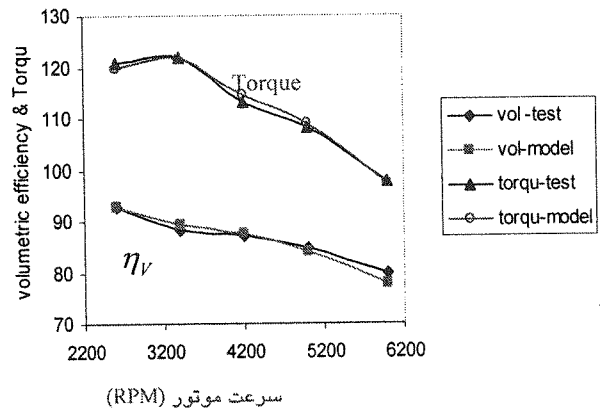
قطر پیستون	81.4(mm)	عرض پالس پاشش	230
طول کورس	83(mm)	زمانبندی سوپاپ دود	116.3-377.0
حجم	1680(cc)	زمانبندی سوپاپ هوا	625-604
سیلندر	4	نسبت تراکم	9.3



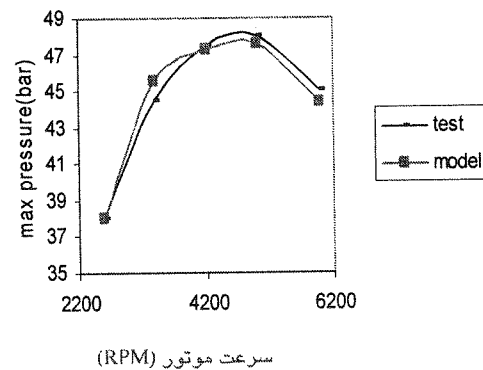
شکل (۲): تغییرات گشتاور ترمزی موتور، حاصل از حل مدل نرم افزاری و نتایج تست موتور

با توجه به شکل، در حالتی که انتهای پاشش در ۱۰۰ ATDC قرار دارد، بیشتر سوخت در مرحله انبساط به پشت سوپاپ می‌رسد. در حالت ۵۵۰ ATDC، قطرات در طول مرحله مکش به پشت سوپاپ می‌رسند و قسمتی از سوخت در ابتدای مرحله تراکم در اثر شتاب منفی جریان هوا، به پورت پس زده می‌شود و پس از بسته شدن سوپاپ ورودی در پورت باقی می‌ماند. باقی ماندن قسمتی از سوخت در پورت، علت کاهش گشتاور موتور در این حالت می‌باشد. در حالتی که انتهای پاشش در زاویه ۲۸۰ ATDC قرار دارد، بیشتر قطرات در مرحله تخلیه و در زمان باز شدن سوپاپ ورودی به پشت سوپاپ می‌رسند و تمام قطرات سوخت در نیمه اول مرحله تراکم، وارد سیلندر می‌شوند. در این حالت علاوه بر اینکه جریان برگشتی گازهای داغ سیلندر موجب اتمیزاسیون فیلم سوخت جمع شده در انتهای پورت و تبخیر بهتر آن می‌شود، با ورود سوخت به سیلندر در ابتدای مرحله مکش، فرصت کافی برای تبخیر سوخت در سیلندر و اختلاط بهتر سوخت و هوا مهیا می‌شود. بنابراین، مقدار بیشینه گشتاور در این فاز پاشش رخ می‌دهد. زمانی که بیشترین قطرات به انتهای پورت می‌رسند، با توجه به سرعت پاشش، طول پورت و عرض پالس پاشش قابل محاسبه است.

در شکل (۴) 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 فاز پاشش حدود ۵۵۰ deg. ATDC، و در نتیجه کم بودن ماکزیم فشار سیلندر در این حالت و همچنین تبخیر مناسب سوخت در پورت قبل از باز شدن سوپاپ ورودی، میزان آلاینده HC در فاز پاشش ۵۰۰ حداقل است. افزایش چشمگیر میزان تبخیر سوخت در پورت در فاز پاشش ۵۵۰ که به کاهش فیلم مایع سوخت در سیلندر و تشکیل مخلوط بهتر منجر می‌شود، در مقایسه با حالت‌های دیگر، در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۱-الف): مقایسه راندمان حجمی و گشتاور مدل با داده های تست گرم

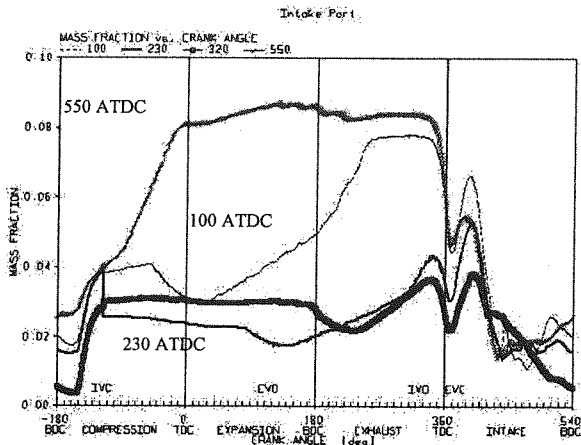


شکل (۱-ب): مقایسه تئوری و تجربی فشار بیشینه سیلندر

### ۳- بررسی زمان پاشش سوخت در سرعت پایین

در ابتدا تاثیر زمان پاشش برای سرعت 2600RPM و حالت تمام بار با تغییر آن در طول سیکل کامل عملکرد موتور بررسی می‌شود. با توجه به زمان شروع پاشش سوخت در دور ۲۶۰۰ (۹۰ ATDC)، اولین قطرات سوخت پس از گذشت تقریباً ۷۰ درجه یا ۴.۵ ms به انتهای درگاه ورودی می‌رسند و به دنبال آن پس از ۲۰ ms پس از شروع پاشش، فیلم سوخت به انتهای درگاه ورودی و نزدیک سوپاپ ورودی می‌رسد. عرض پالس پاشش در این حالت برابر ۲۲۰ درجه زاویه لنگ است. در شکل (۲) نمودار تغییرات گشتاور ترمزی موتور، حاصل از حل مدل نرم افزاری و نتایج تست موتور، برای شرایط ذکر شده در بالا نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، مقدار بیشینه گشتاور در حالتی رخ می‌دهد که انتهای زمان پاشش در زاویه ۲۶۰ تا ۲۹۰ ATDC یعنی ابتدای مرحله مکش قرار گیرد.

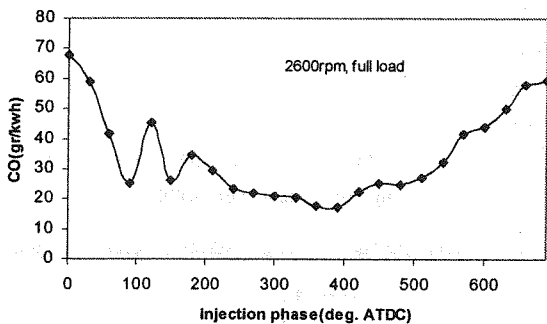
به منظور بررسی علت بیشینه بودن گشتاور در این زاویه، چگونگی ورود قطرات سوخت به داخل سیلندر برای چند حالت پاشش با فازهای مختلف ۱۰۰ و ۲۸۰ و ۵۰۰ بعد از نقطه مرگ بالا (زمان انتهای پاشش) در شکل (۳) نشان داده شده است.



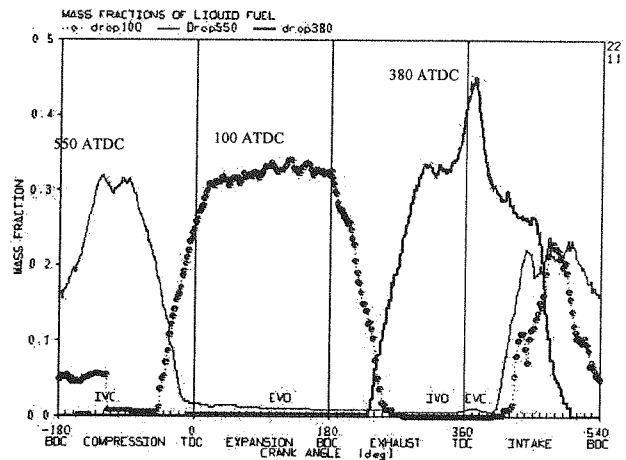
شکل (۵): کسر جرمی بخار سوخت در انتهای پورت به ازای پاشش سوخت در زمان‌های مختلف

شکافها و فضاهای موجود در اجزای سیلندر با توجه به خصوصیات هندسی اجزا، در مدل‌سازی محفظه احتراق اعمال می‌شوند. با افزایش فشار ماکزیمم محفظه احتراق و همچنین نفوذ بیشتر سوخت به داخل لایه روغن و شکافها و درزها، میزان تولید UHC ناشی از به تله 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 UHC روبرو می‌شویم.

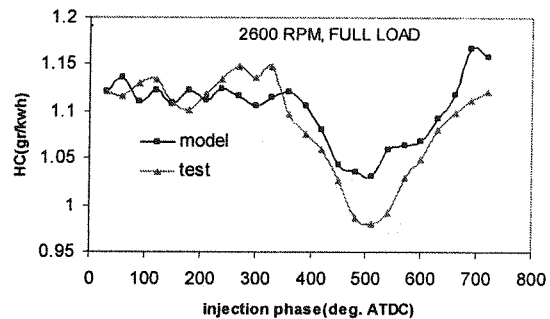
در شکل‌های (۶) و (۷) تغییرات آلاینده CO و NOx همانند نمودارهای قبل نشان داده شده است. میزان CO در حالت ماکزیمم گشتاور، یعنی فاز پاشش حدود ۳۹۰ درجه به علت احتراق مناسب، که به دما و فشار بالا در محفظه احتراق منجر می‌شود، دارای حداقل مقدار است. در عوض، میزان آلاینده NOx در این حالت در اثر دمای بالا، محصولات احتراق نرخ تولید زیادی دارد، به طوری که مطابق شکل (۷) میزان NO از فاز پاشش ۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه دارای ماکزیمم مقدار است.



شکل (۶): تغییرات میزان آلاینده CO با تغییر زمان انتهای پاشش از آنجا که بسیاری از مسافرت‌های درون شهری در سرعت‌های تقریباً پایین و با بار میانی<sup>۸</sup> صورت می‌گیرد، تحلیل



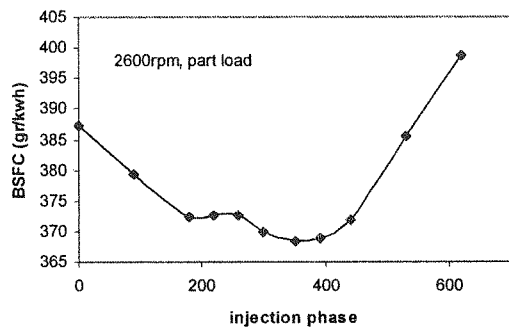
شکل (۳): کسر جرمی قطرات سوخت در انتهای درگاه ورودی برای فازهای پاشش ۱۰۰، ۳۸۰ و ۵۵۰ درجه زاویه لنگ



شکل (۴): تغییرات میزان آلاینده UHC با تغییر زمان انتهای پاشش (فاز پاشش) با استفاده از نتایج مدل‌سازی و تست

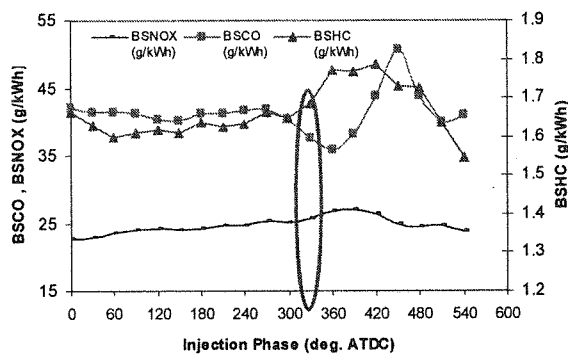
از طرف دیگر، زیاد بودن میزان گشتاور ترمزی موتور در محدوده فاز پاشش حدود 230-380 deg. ATDC و در نتیجه زیاد بودن ماکزیمم فشار سیلندر در این حالت، دلیلی بر افزایش میزان آلاینده UHC در این گستره فاز پاشش می‌باشد.

یکی از عوامل موثر در تولید آلاینده UHC، نفوذ سوخت به لایه روغن و همچنین داخل شکافها و درزهای موجود در سر سیلندر، جداره های پیستون با سیلندر، رینگها و محل قرارگرفتن شمع است. نفوذ سوخت به داخل این شکافها و خاموش شدن شعله در این مکانها در اثر دمای پایین سطوح و عدم ورود شعله به شکافها، مانع از سوختن مناسب آنها می‌شود. با افزایش فشار محفظه احتراق در مرحله تراکم و خود می‌رسد و با کاهش فشار در مرحله انبساط و تخلیه، سوخت مخفی شده در شکافها مجدداً به محفظه سیلندر وارد و همراه با گازهای خروجی از سیلندر خارج می‌شود.



شکل (۹): تغییرات مصرف سوخت ویژه ترمزی در فازهای پاشش مختلف به این منظور میزان آلاینده های  $NO, UHC, CO$  که از تست موتور به دست آمده، در فازهای پاشش مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به شکل میزان  $HC$  محدود  $360-420$  deg. ATDC دارای بیشترین مقدار است. علت آن بیشینه بودن فشار ماکزیمم محفظه احتراق در این گستره فاز پاشش در نتیجه احتراق بهتر می باشد. به همین علت، میزان  $CO$  در این محدوده ( $330-390$  deg. ATDC) کمترین مقدار را دارد. همچنین با توجه به شکل (۱۰) میزان آلاینده  $NO$  در فازهای پاشش  $330-420$  به علت دمای احتراق بالاتر مقادیر بیشینه دارد. بنابراین با در نظر گرفتن مقادیری تا حد امکان بهینه برای گشتاور، مصرف سوخت و میزان آلاینده های موتور، پیش بینی می شود، فاز پاشش  $330$  deg. ATDC نقطه ای مناسب برای انتهای پاشش در سرعت  $2600$  RPM و با بار میانی است. زیرا در این زاویه بدون افت زیاد در مقدار گشتاور، میزان آلاینده ها در حد نسبتاً کمی می باشد.

test results, 2600rpm, 40 kPa

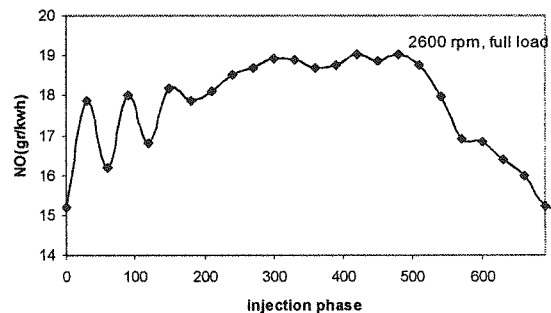


شکل (۱۰): تغییرات میزان آلاینده های  $NO, HC, CO$  حاصل از تست موتور در فازهای پاشش مختلف

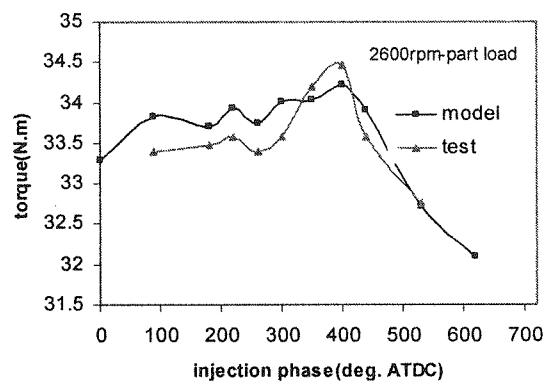
## ۴- بررسی زمان پاشش سوخت در سرعت بالا

در این قسمت، مراحل انجام شده در قسمت قبل برای سرعت  $6000$  RPM و با بار حداکثر، که بیانگر سخت ترین

نتایج و یافتن زمان پاشش بهینه در این شرایط عملکرد موتور از اهمیت خاصی برخوردار است. به این منظور، روش های ذکر شده در بالا، در این قسمت برای سرعت  $2600$  RPM و نیمه با (Part Load, MAP=40 Kpa) انجام شده و زمان پاشش بهینه به دست می آید. عرض پالس پاشش در این حالت  $100$  درجه زاویه لنگ است.

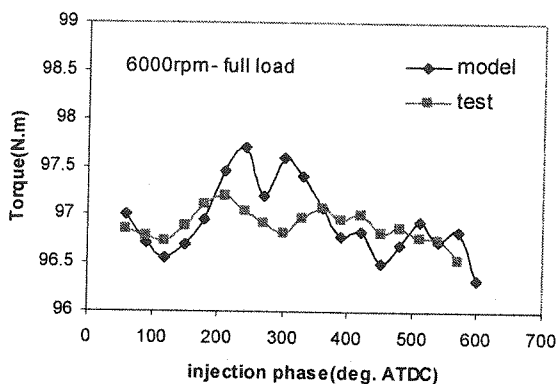


شکل (۷): تغییرات میزان آلاینده  $NO$  با تغییر زمان انتهای پاشش در شکل (۸) تغییرات گشتاور ترمزی موتور در شرایط مذکور در فازهای پاشش مختلف نشان داده شده است و نتایج برای نمونه مدل سازی، آزمایش و مقایسه شده است. ماکزیمم گشتاور در حالتی رخ می دهد که پایان پاشش سوخت یا فاز پاشش در زاویه  $390$  ATDC یعنی در ابتدای مرحله مکش قرار گیرد. در این صورت، بیشترین مقدار قطرات سوخت در لحظه باز شدن سوپاپ ورودی به انتهای درگاه ورودی و پشت سوپاپ می رسند و کمترین میزان سوخت در پورت باقی می ماند. در این حالت، مقدار مصرف سوخت ویژه نیز حداقل می باشد (شکل (۹)).

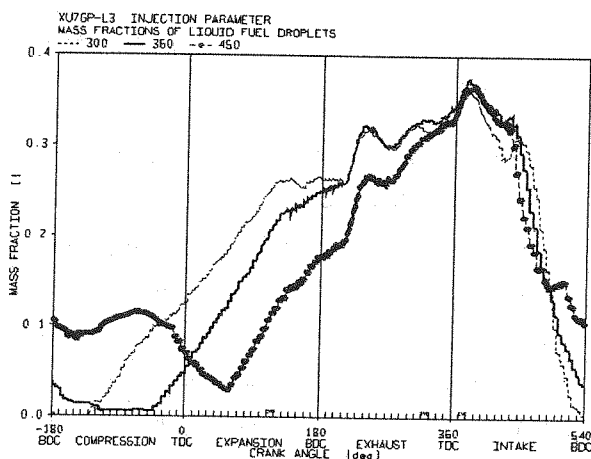


شکل (۸): تغییرات گشتاور ترمزی در فازهای پاشش مختلف برای مدل و تست

در انتخاب فاز پاشش بهینه لازم است علاوه بر در نظر گرفتن میزان گشتاور مناسب، تا حد امکان از زیاد بودن آلاینده های خروجی جلوگیری کرد.



شکل(۱۱): مقایسه مقادیر گشتاور ترمزی موتور در فازهای پاشش مختلف در مدل شبیه سازی شده و نتایج تست موتور



شکل(۱۲): کسر جرمی قطرات سوخت در انتهای پورت ورودی در فازهای پاشش ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۶۰ و ۴۵۰

به این ترتیب، در اثر احتراق نامناسب مخلوط، دمای احتراق کاهش یافته و از افزایش دمای اجزای موتور، کاتالیست و موتور تا بالاتر از میزان مجاز جلوگیری می‌شود. با توجه به این که موتور در این شرایط، که جزء حاد ترین حالات عملکرد موتور است، کمتر قرار می‌گیرد و این شرایط جزء حالات عملکرد متداول موتور نیست، از این رو میزان آلاینده‌های خروجی از موتور در این شرایط از اهمیت کمتری برخوردار است و به توان موتور بیشتر توجه می‌شود. بنابراین میزان آلاینده‌های موتور در این شرایط برای یافتن فاز پاشش بهینه مورد توجه قرار نمی‌گیرد و تنها میزان گشتاور ترمزی و مصرف سوخت ویژه بررسی می‌گردد. با توجه به مطالب ذکر شده و میزان گشتاور ترمزی حاصل از تست موتور، فاز پاشش بهینه در سرعت ۶۰۰۰ RPM و تمام بار، ۲۱۰ یا ۳۶۰ deg. ATDC است.

همچنین با استفاده از نمودار تغییرات گشتاور ترمزی در سرعت ۶۰۰۰ RPM و نیمه بار، که در شکل(۱۳) دیده می‌شود،

شرایط عملکرد موتور است، انجام می‌شود. در این حالت، عرض پالس پاشش با ۵۰ درجه زاویه لنگ برابر است.

در شکل(۱۱) مقدار گشتاور ترمزی موتور در فازهای پاشش مختلف برای نتایج حل مدل شبیه سازی شده و نتایج تست عملکرد واقعی موتور نشان داده شده است. با مقایسه این نمودار با نمودار گشتاور در دورهای پایین، مشاهده می‌شود، تغییرات گشتاور موتور در سرعت‌های بالا کمتر از سرعت‌های پایین است. با توجه به این نمودار، ماکزیمم گشتاور در محدوده ۲۴۰-۲۱۰ ATDC رخ می‌دهد. بر روی نمودار حاصل از حل مدل، دو پیک گشتاور در زوایای ۲۴۰ و ۳۰۰ درجه وجود دارد و مینیمم گشتاور در فازهای پاشش ۱۵۰ و ۴۵۰ درجه رخ می‌دهد. با استفاده از نمودار کسر جرمی قطرات در درگاه ورودی و نحوه ورود آنها به سیلندر می‌توان علت تغییرات گشتاور در زوایای مختلف را بررسی کرد.

این نمودار برای فازهای پاشش ۳۰۰، ۳۶۰ و ۴۵۰ درجه در شکل(۱۲) نشان داده شده است. در فاز پاشش ۳۰۰ درجه، بیشتر قطرات سوخت کمی قبل از باز شدن سوپاپ ورودی به انتهای درگاه ورودی می‌رسند و در انتهای مرحله مکش و قبل از بسته شدن سوپاپ ورودی، تمام قطرات وارد سیلندر می‌شوند. در این فاز پاشش، همزمان با بسته شدن سوپاپ، قطرات حاصل از پاشش سوخت در سیکل بعدی به انتهای درگاه ورودی می‌رسند. در فاز پاشش ۳۶۰ درجه، که میزان گشتاور آن کمتر از حالت قبل (فاز پاشش ۳۰۰) است، ورود قطرات سوخت به سیلندر تا اوایل مرحله تراکم ادامه می‌یابد و در اثر شتاب منفی جریان هوا در شروع مرحله تراکم، همه قطرات نمی‌توانند به راحتی وارد سیلندر شوند. در فاز 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 سوپاپ وارد سیلندر نمی‌شوند.

به همین دلیل، قسمت قابل ملاحظه‌ای از سوخت در درگاه ورودی باقی می‌ماند و میزان فیلم مایع سوخت در پورت افزایش می‌یابد. در صورتی که مقدار فیلم مایع سوخت در پورت پس از بسته شدن سوپاپ ورودی در فاز پاشش ۳۰۰ درجه بسیار ناچیز است [۱۳].

در شرایط عملکرد سرعت بالا و تمام بار، نسبت هوا به سوخت به گونه‌ای تنظیم می‌شود که مخلوطی نسبتاً غنی در سیلندر ایجاد شود.

S.K.Chen,A.Lefebvre, "Influence of Ambient Air Pressure on Effervescent Atomization", AIAA Journal, 1993, pp10-15

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

F.Quan Zhao, J.H Yoo, "The Spray Characteristics of Dual-Stream Port Fuel Injectors for Applications to 4-Valve Gasoline Engines", SAE Technical Paper, No. 952487

G.,Chen,A.,Aggarwal, "Unsteady Multiphase Intake Flow in a Port-injected Gasoline Engine", SAE Technical Paper, No. 960074

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. 010563 1999

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 8th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS-America, May 21-24, 1995 Troy, MI.

Aggarwal,S.k.,Chen,G., "Vaporization Behavior of Fuel Droplets in a Hot Air Stream", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.30, pp669-2673,1

ف.امی، م.حسینعلی پور، ام.محمدنژاد، مطالعه تجربی پاشش در انژکتور با جریان چندگانه، سیزدهمین کنفرانس مکانیک، اصفهان، ۱۳۸۴

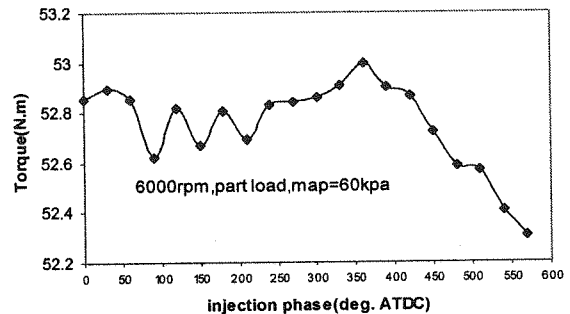
محمدنژاد، ا.، کاهش مصرف سوخت و آلاینده ها در موتورهای انژکتوری بنزینی با اصلاح پارامترهای عملکرد انژکتور، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳

Ashgriz, N., and Poo, J.Y., "Coalescence and separation in binary collisions of liquid drops," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 221, pp. 183-204, 1990

## ۸- زیر نویس ها

- <sup>1</sup> Intake Port
- <sup>2</sup> Sequential
- <sup>3</sup> Pulse width
- <sup>4</sup> Liquid Fuel Film
- <sup>5</sup> Two zone combustion
- <sup>6</sup> Semi-Sequential
- <sup>7</sup> Phase Doppler Anemometry
- <sup>8</sup> Part load
- <sup>9</sup> Full load, High Speed

فاز پاشش بهینه  $360 \text{ deg. ATDC}$  به دست می آید.



شکل (۱۳): گشتاور ترمزی موتور در فازهای پاشش مختلف در

حالت نیمه بار و سرعت 6000 rpm

## ۵- نتیجه گیری

- [۱۱] در حالی که زمان انتهای پاشش (فاز پاشش) به گونه ای باشد که بیشتر قطرات سوخت در انتهای مرحله تخلیه و در زمان باز شدن سوپاپ ورودی به پشت سوپاپ برسند و تمام قطرات سوخت در نیمه اول مرحله تراکم وارد سیلندر شوند، فرصت کافی برای ورود تمام سوخت به محفظه احتراق و تبخیر آن در سیلندر و اختلاط بهتر سوخت و هوا مهیا می شود. بنابراین مقدار بیشینه گشتاور در این فاز پاشش رخ می دهد. در این حالت به علت احتراق بهتر و دما و فشار احتراق بالاتر، نرخ تولید آلاینده  $CO$  و  $NO$  به ترتیب افزایش و کاهش می یابد. زمانی که بیشترین قطرات به انتهای درگاه ورودی می رسند، با توجه به سرعت پاشش، طول درگاه ورودی و عرض پالس پاشش قابل محاسبه است.

## ۶- تشکر و قدردانی

از شرکت تحقیقات موتور ایران خودرو (ایکو)، آزمایشگاه PDA دانشگاه تهران و آزمایشگاه دینامیک گاز دانشگاه تربیت مدرس تشکر می شود.

## ۷- مراجع

- [۱] F.Zhao,M.-C.Lai, "The Spray Characteristics of Automotive Port Fuel Injection - A Critical Review", SAE Technical Paper, No.950506,1995
- [۲] 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
- [۳] 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
- [۴] SAE Recommended Practice, "Gasoline Fuel Injector", SAE J1832NOV 89P: 99f15