



## Evaluation of changes in diesel fuel type on the injection rate of diesel common rail injectors

Mojtaba Forozandehnasab<sup>1\*</sup>, Hossein Rahimi Asiabaraki<sup>2</sup>

1- Department of Agriculture Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Diesel Engine  
Injector  
Fuel Injection  
Common Rail  
Bosch Measurement Method

### ABSTRACT

The use of common rail diesel engines is increasing in commercial, road construction, mining, and agricultural machinery due to their compliance with environmental standards. The fuel system in these engines operates at high rail pressures up to 2000 bar. At such pressures, a temperature rise in the fuel system and physical changes in the fuel are inevitable. In this applied research, three injector nozzles from Bosch, Denso, and Delphi—with different manufacturing technologies but similar operational principles—were tested using the Bosch measurement method on a CRT2000 injector test bench. The evaluation was performed using four types of domestic diesel fuel (Mahshahr 0.5%, Mahshahr 1%, Bandar Abbas 1%, and Lavan 500 ppm) with identical density ( $820 \text{ kg/m}^3$ ), viscosity (3 cSt), and cetane number (49), alongside one foreign diesel fuel (D6) with a density of  $870 \text{ kg/m}^3$ , viscosity of 5 cSt, and a cetane number of 49. The results indicated that in all three injectors, the mass of fuel injected into the combustion chamber increased with rising pressure. However, the amount of fuel injected for the foreign diesel (D6) was greater than that for the domestic types. Based on the performance data, it was concluded that this increase is due to the higher density and viscosity of the foreign diesel fuel. Another finding was that the fuel injection rate at a constant pressure increased with a longer pulse width applied to the injector.



© 2025 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

\* Corresponding author

E-mail address: [mforoozande@tvu.ac.ir](mailto:mforoozande@tvu.ac.ir) (M. Forozandehnasab)

Received 27 July 2025; Accepted 9 October 2025

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

**Cite this article:** Forozandehnasab M, Rahimi Asiabaraki H. Evaluation of changes in diesel fuel type on the injection rate of diesel common rail injectors. 2025 Nov 22;72(3):43-63. doi: [10.22034/ER.2025.2066216.1096](https://doi.org/10.22034/ER.2025.2066216.1096)

## ارزیابی تغییرات نوع گازوئیل بر مقدار پاشش افشانه‌های لوله مشترک دیزلی

مجتبی فروزنده نسب<sup>۱\*</sup>، حسین رحیمی آسیابراکی<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

### چکیده

استفاده از موتورهای لوله مشترک دیزلی به دلیل رعایت استانداردهای محیط زیستی، در سطح موتورهای تجاری، راه‌سازی، معدنی و کشاورزی رو به افزایش است. کارکرد سامانه سوخت‌رسانی این موتورها بر اساس فشار شدید لوله تا حدود ۲۰۰۰ بار است. در این فشار شدید، افزایش دما در سامانه سوخت‌رسانی و تغییرات فیزیکی سوخت امری بدیهی است. در تحقیق کاربردی حاضر با استفاده از بهره‌مندی از روش اندازه‌گیری بوش در دستگاه آزمون سوزن افشانه CRT2000، سه نمونه از سوزن‌های افشانه بوش، دنسو و دلفی با فناوری ساخت متفاوت اما با اصول کارکردی مشابه با چهار نوع گازوئیل داخلی ماهشهر ۰.۵ درصد، ماهشهر ۱ درصد، بندرعباس ۱ درصد و لاوان 500 ppm با چگالی یکسان ۸۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب، لزجت ۳ سانتی استوکس و عدد ستان ۴۹ با یک عدد گازوئیل خارجی دی ۶ با چگالی ۸۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب و لزجت ۵ سانتی استوکس و عدد ستان ۴۹ ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که در هر سه افشانه مورد آزمایش، مقدار سوخت پاشش شده به درون محفظه احتراق با افزایش فشار، افزایش می‌یابد؛ اما مقدار سوخت تزریق شده برای گازوئیل خارجی در مقایسه با انواع داخلی بیشتر بود. با توجه به عملکرد این گازوئیل‌ها، علت این افزایش تزریق در گازوئیل خارجی، بالا بودن چگالی و لزجت سوخت در مقایسه با گازوئیل نوع داخلی نتیجه‌گیری شد. افزایش مقدار تزریق سوخت در فشار ثابت با افزایش تکانه اعمالی به سوزن‌های افشانه از دیگر نتایج این تحقیق بود.

### اطلاعات مقاله

#### کلیدواژه‌ها:

موتور دیزل  
افشانه  
تزریق سوخت  
لوله مشترک  
روش اندازه‌گیری بوش



© 2025 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

\* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: [mforoozande@tvu.ac.ir](mailto:mforoozande@tvu.ac.ir) (مجتبی فروزنده نسب)

دریافت ۵ مرداد ۱۴۰۴؛ پذیرش ۱۸ آبان ۱۴۰۴

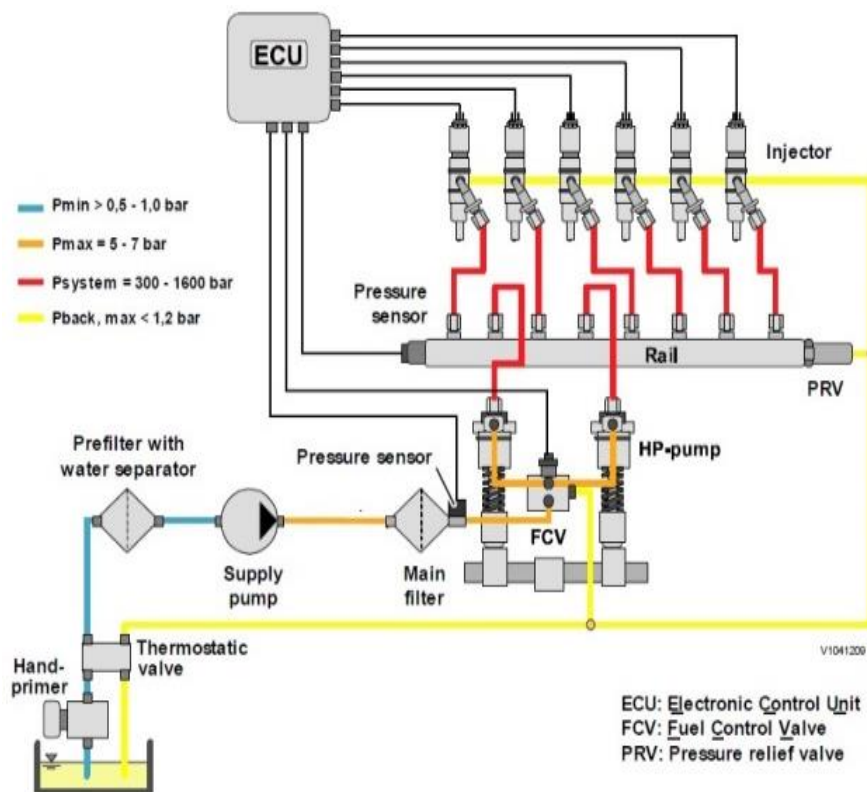
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

## ۱- مقدمه

سامانه سوخت‌رسانی لوله مشترک، مدت‌ها توسط شرکت‌هایی نظیر دیترویت و کاترپیلار مورد استفاده قرار گرفته است. نوع مشابه دیگر این سامانه سوخت‌رسانی در موتورهای کامنز تحت عنوان PT به صورت انبوه استفاده شده است [۱]. در این نوع موتورها، سرعت موتور تعیین‌کننده مقدار مدت و زمان تزریق سوخت است. در سامانه سوخت‌رسانی لوله مشترک در مقایسه با دیگر سامانه‌های سوخت‌رسانی دیزل معروف که پاشش‌های متعدد را در سیکل‌های انجام کار مهیا می‌کنند، تفاوت‌هایی وجود دارد. این سامانه نامش را از ذخیره‌کننده (آکومولاتور) که فشار مشترک لوله سوخت را برای همه سیلندرها تأمین می‌نماید گرفته است [۱].

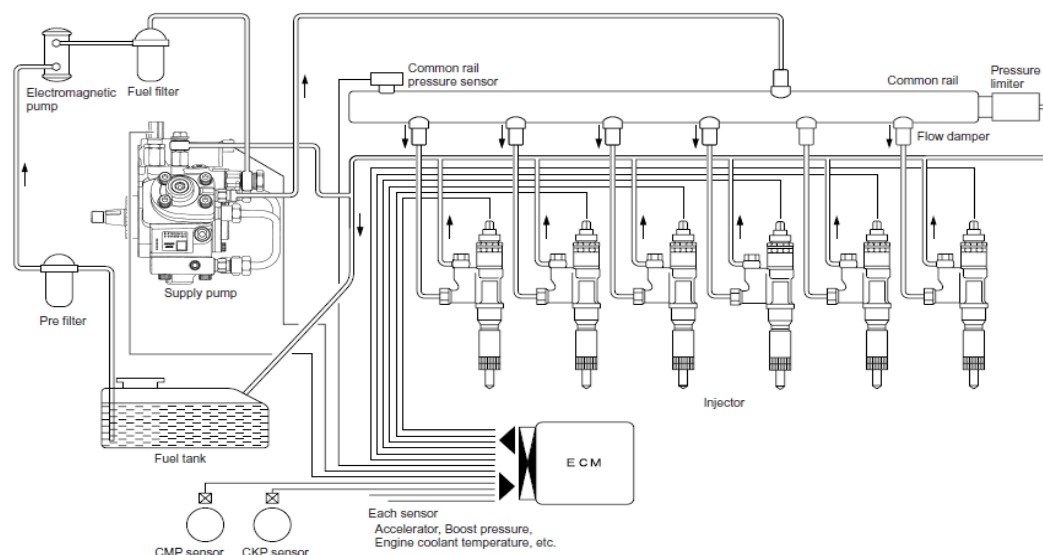
سامانه سوخت‌رسانی لوله مشترک برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ در خودروهای سواری معرفی شد و در سال ۱۹۹۹ به صورت تجاری خود را در عرصه بازار خودرو مطرح نمود [۲]. اولین فناوری شرکت بوش برای تولید در بازار تجاری اروپا به سال ۱۹۹۹ بازمی‌گردد که فشار پاشش ۱۴۰۰ بار را دارا بود. با پیشرفت فناوری، این شرکت دومین محصول خود را با فشار ۱۶۰۰ بار در سال ۲۰۰۱ به بازار عرضه نمود. فشار پاشش شدیدتر این سامانه سوخت‌رسانی و بخار شدن بهتر سوخت توسط سامانه پاشش، امکان بازده احتراق بیشتر را فراهم آورد [۳].

در سال ۲۰۰۵ بوش سومین نسل از سامانه لوله مشترک تولیدی خود را با فشار ۱۸۰۰ بار برای وسایل نقلیه تجاری سبک معرفی نمود. این نسخه از سامانه لوله مشترک برای خودروهای نیمه سنگین در سال ۲۰۰۷ به بازار عرضه گردید و در سال ۲۰۰۸ به طور کامل بر روی موتورهای دیزلی طرف قرارداد با شرکت بوش نصب و روانه بازار شد. در برابر قوانین سخت‌گیرانه آلاینده‌های خروجی، فشار سوخت در این سامانه‌های پاشش به ۲۰۰۰ تا ۲۲۰۰ بار گسترش یافت [۳]. طرح کلی این سامانه سوخت‌رسانی در شکل ۱ نشان داده شده است [۴].



شکل ۱ سامانه لوله مشترک بوش

در دیگر شرکت‌های تولید موتور، سازوکار سامانه لوله مشترک به همین ترتیب آرایش یافته است با این تفاوت که تلمبه تولید فشار سوخت به صورت دوار با اجزاء بادامکی طراحی شده است. شکل ۲، طرح سامانه لوله مشترک ساخت شرکت دنسو را نمایش می‌دهد [۵].



شکل ۲ سامانه لوله مشترک دنسو

فشار درون لوله سوخت در سامانه‌های سوخت‌رسانی لوله مشترک به حدود ۲۰۰۰ بار می‌رسد. بنابراین در این سامانه بایستی از قطعات مقاوم در برابر فشار و گرما استفاده کرد تا علاوه بر فراهم نمودن احتراق مناسب و گرد کردن بهتر ذرات گازوئیل، مقدار آلایندگی نیز به حداقل ممکن کاهش یابد. در این راستا، دو نکته کلیدی در بهره‌برداری از این سامانه‌ها حائز اهمیت است:

۱) بروز هرگونه نشتی در سامانه لوله مشترک می‌تواند به مشکلات عمده‌ای همچون عدم روشن شدن دستگاه و بویژه عدم زیر بار رفتن دستگاه منجر شود. با توجه به اینکه سامانه‌های تنظیمی ناظر بر روی سامانه لوله مشترک تابع شرایط محیطی نصب خود می‌باشند مسلم است که بروز هرگونه ایرادی در این سامانه عدم تزریق مناسب سوخت توسط افشانه‌ها را به دنبال دارد.

۲) استفاده از گازوئیل مناسب و مدیریت سرویس فوق‌العاده برای این سامانه‌ها حیاتی است [۶]. در موتورهایی که بر اساس نوع سوخت دیزل و مطابق با استانداردهای آلایندگی طراحی می‌شوند [۷] تزریق سوخت در طول سیکل کاری موتور به ۲ تا ۷ بخش تقسیم می‌شود تا شاخص احتراق آرمانی را از میان عملکرد موتور و آلایندگی ناقص حفظ کنند [۸، ۹]. این استاندارد آلایندگی، با تغییرات در زمان پاشش، فشار و مدت پاشش [۱۰] و تنها با استفاده از سامانه‌های پاشش لوله مشترک و با تولید فشارهای شدید، دست‌یافتنی است [۱۱].

تغییرات شاخص جریان پاشش سوخت را می‌توان بر حسب زمان یا زاویه چرخش میل‌لنگ ترسیم نمود که این تغییرات به‌طور معمول به مقدار پاشش سوخت ارجاع داده می‌شود. نمودار فشار و مقدار سوخت پاشش شده، توان خروجی موتور را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. مقدار سوخت پاشش شده بر فرآیند احتراق مؤثر است و این موضوع دلیلی است بر اینکه چرا غالب مطالعات پژوهشی در بررسی نحوه احتراق سوخت در اتاقک احتراق، بر مقدار پاشش سوخت استوار است [۱۲-۱۴].

با توجه به قابلیت نفوذ سوخت تزریق شده به درون هوای فشرده داخل اتاقک احتراق در مرحله پاشش و تزریق

سوخت، روش اندازه‌گیری مقدار سوخت پاشش شده از سوراخ‌های افشانه سامانه لوله مشترک در مرحله پاشش سوخت، با علم به این که استفاده از این نوع سامانه سوخت در موتورهای دیزلی رو به افزایش است، ضروری به نظر می‌رسد. از نخستین روش‌های اندازه‌گیری شاخص جریان جرمی سوخت می‌توان به روش چرخش‌بینی<sup>۱</sup> و تنظیم اشاره کرد که در آن پاشش سوخت به چندین مرحله تقسیم و سپس سوخت تزریق شده در لیوان‌های آزمایشگاه جداگانه جمع‌آوری می‌شد. روش دیگری که مورد نشر قرار گرفت شامل استفاده از انتقال باردار ذرات سوخت و جابه‌جایی حرکت سمبه منتج از تزریق حجم سوخت بود [۱۵].

تنظیم و ابزار دقیق استفاده از این سامانه‌ها را مشکل‌ساز می‌کرد به همین دلیل کمتر مورد اقبال واقع شدند. در سال ۱۹۶۶ بوش<sup>۲</sup> استفاده از یک سامانه جدید را که بر اساس اندازه‌گیری موج انتشار فشار حاصل از تزریق در یک سیال تحت فشار کار می‌کرد پیشنهاد داد. آزمایش‌ها نشان دادند که دقت هر دو روش بوش و زاک<sup>۳</sup> رضایت‌بخش است. این آزمایش‌ها نتایج مشابهی در نرخ جریان و مقدار جریان پیش‌گویی می‌کردند [۱۶، ۱۷].

با این وجود، روش بوش در زمینه‌های پژوهشی کاربردی‌تر بود. کارهای دیگری که بر تبادل اندازه‌گیری شاخص پاشش بر اساس تغییرات فشار دلالت داشت [۱۸، ۱۹]، انجام گرفت که افزایش فشار پیامد تزریق سوخت در یک محفظه به‌جای یک لوله بود. یک پرده غشایی مجهز به کرنش‌سنج برای ثبت تغییرات فشار استفاده شد که مشابه روش بوش بود. به دلیل این که هر سوزن افشانه دارای یک محفظه جداگانه تزریق بود شاخص جریان جرمی هر سوزن افشانه به‌طور مجزا اندازه‌گیری می‌شد. نخستین تلاش و مطالعه بر روی وسایل اندازه‌گیری جریان سوخت بر اساس تغذیه برقی تولیدی به‌وسیله شاخص جریان با استفاده از الکترودهای اندازه‌گیری به‌وسیله ماریک<sup>۴</sup> انجام شد [۲۰].

این وسایل همچنین در اندازه‌گیری جریان سوخت به روش بوش قابل‌مقایسه است. روش‌های بسیار مشابه دیگری همچون روش بلوین و واگنر<sup>۵</sup> در سال ۱۹۹۹ نیز پیشنهاد شدند که تفاوت این روش با روش بوش در نقاط راهبردی گلوگاه‌ها نزدیک به سوزن افشانه بود. با این همه، روش بوش به‌عنوان یک روش اندازه‌گیری قابل‌اعتماد و عاری از مشکلات است. آرکومانیس و بنی‌اسد [۲۱] گزارش کردند که روش بوش مقادیر بالاتر سوخت به ازای هر سوزن افشانه نسبت به روش زاک نشان می‌دهد و این در حالی بود که پایی و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۴ یک روش‌شناسی را تهیه کردند که بر اساس این وضعیت پدیده افزاینده نامیده شد.

از سوی دیگر، پژوهشگرانی مانند پاستریوتی و همکاران [۲۳] از روش زاک برای تحلیل سامانه‌های پاشش لوله مشترک و تعیین زمان پاشش استفاده کردند. محققان در سال‌های اخیر از روش آنالیز حساسیت به کمک ابزارهای شبیه‌سازی برای درک بهتر فرایند داخلی سامانه‌های اندازه‌گیری استفاده کرده‌اند [۲۴].

دیسانتز و همکاران [۲۵] با تحقیق بر روی سوخت‌های بیودیزل B5، B30 و RME دریافتند که در سامانه اندازه‌گیری بوش خواص سوخت مانند چگالی و لزجت در روغن‌های گیاهی نسبت به سوخت‌های شیمیایی بالاتر هستند و اثر قابل توجهی بر مقدار پاشش سوخت دارند. در سوخت‌های بیودیزل تاخیر هیدرولیکی باعث افزایش پاشش در سامانه اندازه‌گیری پاشش می‌شود. این یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که روش بوش برای بررسی تأثیر خواص سوخت بر مقدار پاشش کاملاً مناسب و حساس است.

بر این اساس، هدف از انجام این پژوهش، بررسی مقدار پاشش در افشانه‌های موتورهای لوله مشترک دیزلی با استفاده از روش بوش و با تمرکز بر تأثیر نوع گازوئیل مصرفی در ایران، تحت شرایط کنترل‌شده فشار تزریق و تکانه تحریک است.

1 Stroboscope

2 Bosch

3 Zeuch

4 Marcic

5 Blevins and Wagner

## ۲- مواد و روش‌ها

در روش بوش برای اندازه‌گیری شاخص پاشش سوخت، زمانی که پاشش در طول یک سیال تحت فشار صورت می‌گیرد یک موج فشاری ایجاد می‌شود. اصول این روش ثبت تغییرات فشار بر حسب زمان از جایی که شاخص خروجی حجمی یا جرمی در پدیده پاشش روی می‌دهد بایستی محاسبه شود. این مفهوم بر پایه معادله اساسی انتشار موج فشار در یک سیال تراکم‌ناپذیر در حالت جریان پایا قرار دارد:

$$p = c \cdot \rho \cdot u \quad (1)$$

با ترکیب معادله ۱ با معادله پیوستگی جریان، معادله روش بوش بدین صورت تغییر می‌کند:

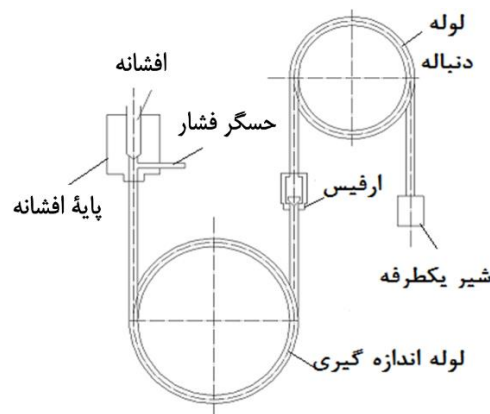
$$\frac{dq}{dt} = \frac{A \cdot p}{c \cdot \rho} \quad (2)$$

معادله ۲ نشان می‌دهد که نرخ جریان حجمی لحظه‌ای را می‌توان از روی سطح مقطع لوله، فشار لحظه‌ای، چگالی و سرعت صوت در سیال محاسبه کرد.

با ضرب کردن دو طرف معادله ۲ در چگالی سیال، می‌توان معادله ۳ که بیانگر نرخ جریان جرمی لحظه‌ای است را به دست آورد:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{A \cdot p}{c} \quad (3)$$

معادله ۳ نشان می‌دهد که نرخ جریان جرمی لحظه‌ای با حاصل ضرب فشار و سطح مقطع نسبت مستقیم و با سرعت صوت در سیال نسبت عکس دارد. سرعت صوت در سیال خود تابعی از ضریب تراکم‌پذیری و چگالی سیال است. نوسانات فشار در هنگام پاشش سوخت یکی از عواملی است که روی عملکرد موتور دیزل تأثیر منفی می‌گذارد [۲۶]. در روش اندازه‌گیری بوش، با محدود کردن تغییرات فشار در حین عملکرد، اثر این نوسانات بر اندازه‌گیری شاخص جریان پاشش به حداقل می‌رسد و قابل چشم‌پوشی در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، با ثابت فرض کردن سایر متغیرها در معادله ۳، تغییرات نرخ جریان جرمی تنها به تغییرات فشار وابسته است. شماتیک مجموعه اندازه‌گیری نرخ جریان پاشش به روش بوش در شکل ۳ نشان داده شده است که متشکل از پنج قطعه اصلی می‌باشد. این سامانه با سوخت دیزل به عنوان سیال واسطه پر می‌شود.



شکل ۳ نمای مجموعه اندازه‌گیری روش بوش

## ۲-۱- روش آزمون

نخستین و پیچیده‌ترین قطعه این مجموعه نگهدارنده افشانه است. این قطعه شامل رابط افشانه، حسگر فشار گازوئیل، ورودی فشار بالا، خروجی فشار پایین و مکان نصب لوله اندازه‌گیری می‌باشد. نخستین بار بوش از کرنش سنج و یک

سطح مقطع کاهش یافته در نگهدارنده افشانه استفاده کرد؛ اما در این پژوهش از یک فشارسنج استفاده شد. لوله اندازه‌گیری نیز به همان اندازه قطعه مهمی از این سامانه است. قطر داخلی لوله اندازه‌گیری مقدار افزایش فشار در سیال را تعیین می‌کند و طول آن، مدت زمانی را که انعکاس امواج فشاری به حسگر فشار گازوئیل منتقل می‌شود، مشخص می‌نماید. ابعاد این دو مؤلفه با یکدیگر حجم داخلی لوله را معین می‌کند که در میرایی امواج فشاری مؤثر است.

امواج فشاری ایجاد شده بین افشانه و انتهای لوله اندازه‌گیری، در طول لوله به جلو و عقب بازتاب می‌یابند. این پدیده باعث حرکت رفت و برگشتی سوخت دیزل در درون لوله می‌شود. مقدار سوخت خروجی از لوله اندازه‌گیری به شکل خروجی لوله وابسته است. اگر موج فشاری منعکس شده از انتهای لوله اندازه‌گیری منفی باشد، مقدار سوختی که از لوله خارج می‌شود از حجم سوخت پاشش شده بیشتر خواهد بود. این پدیده منجر به ناپایداری در سامانه می‌گردد و باید از وقوع آن جلوگیری شود. به همین دلیل، یک اورفیس صفحه‌ای مجهز به دریچه گاز برای نصب بر روی انتهای لوله اندازه‌گیری مورد نیاز است که اندازه آن وابسته به مقدار سوخت پاشش شده می‌باشد. همچنین، یک شیر یک‌طرفه قابل تنظیم به لوله دوم که به آن لوله دنباله می‌گویند، متصل می‌شود. طول لوله دنباله، بر خلاف لوله اصلی، بر روی شاخص اندازه‌گیری شده تأثیر بحرانی و مؤثری ندارد [۲۴].

شیر یک‌طرفه با لوله دنباله یک پاشش قابل مشاهده تحت وضعیت‌های مشابه در موتورهای دیزل را فراهم می‌کند. بنابراین اگر فشار برگشتی به اندازه فشار تراکمی که در محفظه احتراق موتورهای دیزل به وقوع می‌پیوندد تنظیم شود، اختلاف فشار دوطرفه دریچه اورفیس مشابه یک موتور خواهد شد. سامانه اندازه‌گیری نرخ پاشش بوش که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته و با عنوان CRT2000 شناخته می‌شود، در شکل ۴ نشان داده شده است. ابعاد هندسی اجزای تشکیل دهنده این سامانه در جدول ۱ ارائه گردیده است. حسگر فشار (گیج فشار) در فاصله ۲۰ میلی‌متری از زیر نازل افشانه جایابی شد.



شکل ۴ دستگاه اندازه‌گیری بوش CRT2000

**جدول ۱** مشخصات قطعات سامانه اندازه‌گیری بوش

قطعات	قطر داخلی برحسب (میلی‌متر)	طول برحسب (میلی‌متر)	فشار برحسب (مگا پاسکال)
لوله اندازه‌گیری	۱۶	۱۵۰۰	۵
دریچه تنظیم	قابل تنظیم	-	-
لوله دنباله	۷	۱۰۰۰	۵

افشانه‌های مورد استفاده در این اندازه‌گیری از نوع ۸ سوراخه از نمونه CRIN3، CR12، CRIN4 شرکت‌های بوش، دنسو و دلفی مورداستفاده در موتورهای لوله مشترک ایسوزو، نیوهلند و دویتس انتخاب شدند. اتصالات تغذیه و برگشت سوخت در داخل بستار با استفاده از سطوح اتصالات مخصوص با توجه به عدم نشتی سوخت تعبیه و از اتصالاتی استفاده شده است که از نشتی سامانه جلوگیری کند. در این آزمایش از یک موتور دیزل ۴ استوانه دارای سامانه سوخت‌رسانی لوله مشترک با مشخصات فنی مندرج در جدول ۲ استفاده شد.

**جدول ۲** مشخصات موتور ولوو مورد مطالعه

نوع موتور	چهارزمانه دیزلی
سامانه احتراق	مستقیم
تعداد استوانه	۴
دهانه استوانه	۱۰۸+۰،۰۲ میلی‌متر
پیمایش سمبه	۱۳۰ میلی‌متر
حجم جابجایی موتور	۷،۱۵ لیتر
تعداد دریچه	۱۲
برای چرخش میل‌لنگ	روبروی چرخ طیار-خلاف عقربه‌های ساعت
نسبت تراکم	۱۸:۱
ترتیب احتراق	۱-۳-۴-۲

افشانه به یک سامانه تحت فشار سوخت موتور دیزل ۴ استوانه پُرخوران با فشارهای بسیار شدید نصب شد و در حین اندازه‌گیری موتور با سه استوانه راه‌اندازی شد درحالی‌که سوزن چهارم بر روی سامانه اندازه‌گیری بوش نصب بود. فشار لوله سوخت توسط حسگر نصب‌شده بر روی آن، خوانش و ثبت می‌شد. یک اتصال جریان ایجاد تکانه برای جریان افشانه و یک حسگر فشار بر روی لوله سوخت برای اندازه‌گیری فشار، نصب گردید.

افشانه مورد آزمایش توسط پایه نگهدارنده (شکل ۵) درون دستگاه اندازه‌گیری محکم شد و لوله‌های سوخت آن به موتور دیزلی مطابق شکل ۶ متصل گردید. جنس لوله اندازه‌گیری و لوله دنباله از فولاد با استاندارد تولیدی ۳۳۶۰ انتخاب شد.

در نصب قطعات در مکان اتصال لوله اندازه‌گیری به لوله دنباله از یک اورفیس متغیر یک‌چهارم دور استفاده شد. همچنین جهت تخلیه فشار از یک تنظیم‌کننده شیر یک‌طرفه با تغییرات فشار ۰ تا ۱۳۷ بار به همراه یک گیج اندازه‌گیری فشار که با گریس به منظور تضعیف نوسانات شاخص پر شده بود، استفاده گردید. تمام اندازه‌گیری‌ها در دور ۱۵۰۰ دور بر دقیقه، جایی که موتور قادر بود ۴۰۰ نیوتن‌متر گشتاور تولید کند، انجام شد (نقطه بار کامل).

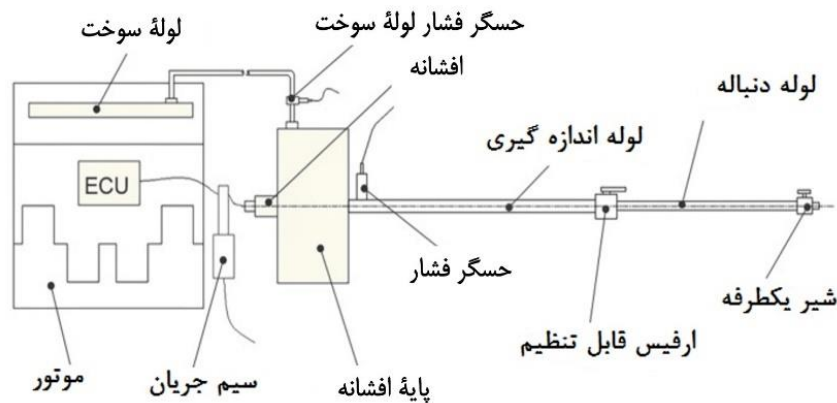


(ب)



(الف)

شکل ۵ سوزن افشانه برقی همراه با پایه (الف) افشانه (ب) پایه اتصال سریع افشانه به دستگاه



شکل ۶ نحوه نصب دستگاه اندازه‌گیر بوش بر روی موتور

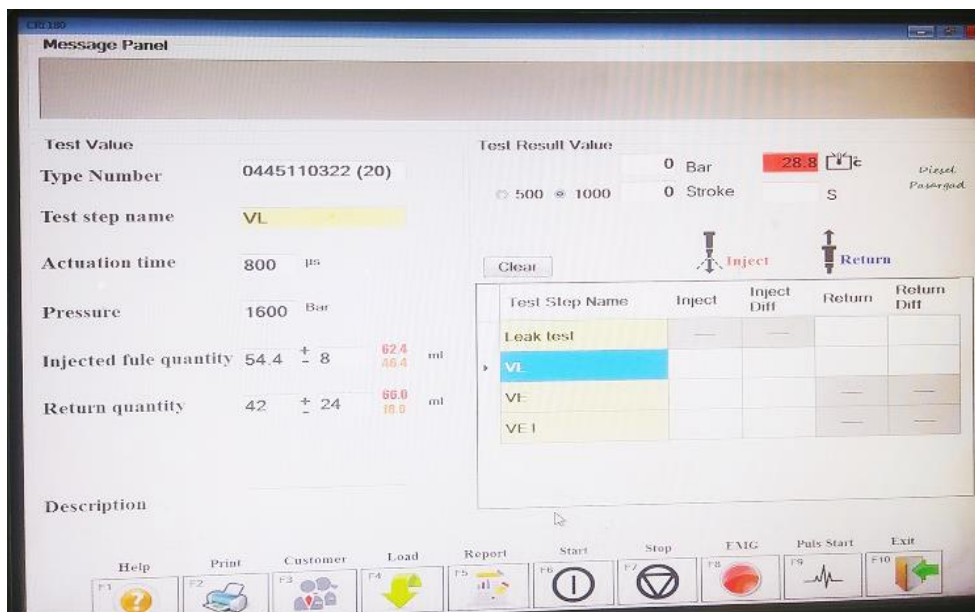
## ۲-۲- تنظیم فشار سنج

قبل از انجام آزمایش اندازه‌گیری فشار و مقدار تزریق سوخت، سوزن افشانه مورد آزمایش بر روی یک عدد دستگاه تعیین فشار و مقدار سوخت تزریق شده نوع CRT2000 ساخت شرکت دلفی نصب شد. گنج فشار (حسگر فشار) درون مدار قرار گرفت و آزمایش‌های تنظیم با ۰، ۱۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد فشار اندازه‌گیری انجام شد. دمای آزمایش در محدوده ۲۷ الی ۳۷ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. درجه عدم قطعیت مقدار سوخت اندازه‌گیری شده با عدم قطعیت ۰,۷۳ میلی‌لیتر و مقدار فشار اندازه‌گیری با ۱۰ بار ثبت شد (شکل ۷).

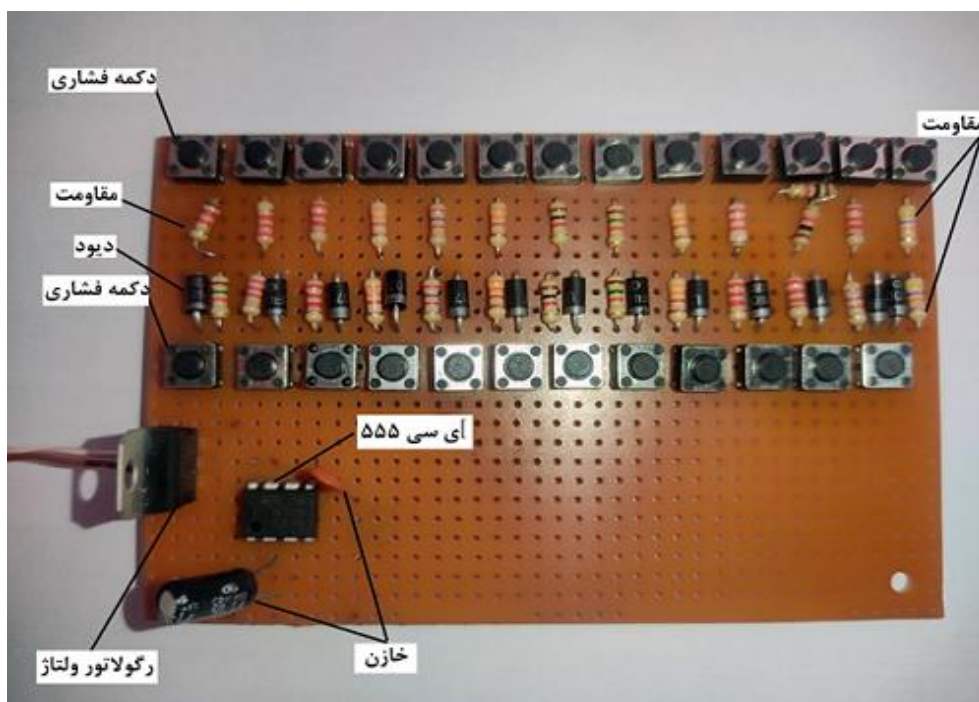
## ۲-۳- مدار تولید تکانه<sup>۱</sup> بر روی سوزن افشانه

در این پژوهش مطابق شکل ۸، یک سامانه الکترونیکی منطبق با زمان‌های پاشش افشانه برای ایجاد تکانه ۲ میلی‌ثانیه و تولید سیگنال‌های گسسته دقیق و منظم برای زمان‌های پاشش طراحی و ساخته شد.

<sup>1</sup> Pulse



شکل ۷ تنظیم فشارسنج و مقدار پاشش توسط دستگاه CRT2000



شکل ۸ سامانه برقی برای تولید تکانه گسسته

#### ۲-۴- اندازه‌گیری جرم سوخت پاشش شده

برای اندازه‌گیری جرم سوخت پاشش شده، سوخت حاصل از ۱۰۰ پاشش متوالی برای هر نمونه افشانه، در یک بشر جمع‌آوری گردید. متوسط جرمی این سوخت با استفاده از یک ترازوی عددی با دقت اندازه‌گیری ۰٫۱ گرم و ظرفیت حداکثر ۱۵۰۰ گرم توزین و در جداول ثبت شد. شکل شماره ۹ نوع ترازوی عددی و سوخت جمع‌آوری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۹ اندازه‌گیری جرم گازوئیل پاشش شده توسط ترازوی عددی

## ۲-۵- نوع گازوئیل مصرفی

به منظور بررسی اثر نوع گازوئیل بر مقدار پاشش، از چهار نمونه گازوئیل تولید داخل (ماهشهر ۰٫۵ درصد، ماهشهر ۱ درصد، بندرعباس ۱ درصد و لاوان 500 ppm) و یک نمونه گازوئیل خارجی (دی ۶) استفاده گردید. مشخصات این سوخت‌ها بترتیب در جداول ۳ الی ۷ ارائه شده است [۲۷].

جدول ۳ مشخصات گازوئیل ماهشهر ۰٫۵ درصد

مشخصات	مقدار	واحد
چگالی در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد	۸۲۰	kg/m <sup>3</sup>
لزجت سینماتیکی در دمای ۳۷٫۸ درجه سانتی‌گراد	۳	cSt
مقدار سولفور	۰٫۰۵	%wt
عدد ستان	۴۹	

جدول ۴ مشخصات گازوئیل ماهشهر ۱ درصد

مشخصات	مقدار	واحد
چگالی در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد	۸۲۰	kg/m <sup>3</sup>
لزجت سینماتیکی در دمای ۳۷٫۸ درجه سانتی‌گراد	۳	cSt
مقدار سولفور	۱	%wt
عدد ستان	۴۹	

جدول ۵ مشخصات گازوئیل بندرعباس ۱ درصد

مشخصات	مقدار	واحد
چگالی در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد	۸۲۰	kg/m <sup>3</sup>
لزجت سینماتیکی در دمای ۳۷٫۸ درجه سانتی‌گراد	۳	cSt
مقدار سولفور	۱	%wt
عدد ستان	۴۹	

**جدول ۶** مشخصات گازوئیل لاوان 500ppm

مشخصات	مقدار	واحد
چگالی در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد	۸۲۰	kg/m <sup>3</sup>
لزجت سینماتیکی در دمای ۳۷٫۸ درجه سانتی‌گراد	۳	cSt
مقدار سولفور	۰٫۰۵	%wt
عدد ستان	۴۹	

**جدول ۷** مشخصات گازوئیل دی ۶

مشخصات	مقدار	واحد
چگالی در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد	۸۷۰	kg/m <sup>3</sup>
لزجت سینماتیکی در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد	۵	cSt
مقدار سولفور	۰٫۰۵	%wt
عدد ستان	۴۹	

### ۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش پاشش افشانه‌های لوله مشترک با استفاده از سوخت‌های نمونه، برای افشانه ساخت شرکت بوش در جداول ۸ و ۹ ارائه شده است. جدول ۸ مقدار پاشش افشانه طرح بوش را با استفاده از گازوئیل‌های داخلی نشان می‌دهد. همان‌طور که داده‌ها گویاست، با افزایش فشار، مقدار سوخت تزریقی به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. برای بررسی اثر مستقیم نوع سوخت، جدول ۹ نتایج مربوط به آزمایش با همان افشانه بوش، اما با استفاده از گازوئیل خارجی دی ۶ را تحت شرایط یکسان (مقادیر تکانه و فشار مشابه) ارائه می‌کند. مقایسه مستقیم این دو جدول، اثر چشمگیر نوع سوخت را آشکار می‌سازد.

**جدول ۸** مقدار گازوئیل پاشش شده نمونه داخلی با سوزن بوش

مدت‌زمان اعمال تکانه (میکروتانیه)	مقدار سوخت پاشش شده (میلی‌گرم در ثانیه)	فشار (بار)
۱۰۰۰	۱۸٫۸	۲۵۰
۴۰۰	۹٫۴	۷۰۰
۲۵۰۰	۱۷۰	۸۰۰
۲۵۰	۴٫۹	۱۰۰۰
۱۳۰۰	۱۱۱	۱۳۰۰
۱۷۰۰	۱۱۹٫۳	۱۶۰۰

**جدول ۹** مقدار گازوئیل پاشش شده گازوئیل دی ۶ با سوزن بوش

مدت‌زمان اعمال تکانه (میکروتانیه)	مقدار سوخت پاشش شده (میلی‌گرم در ثانیه)	فشار (بار)
۱۰۰۰	۱۹٫۵	۲۵۰
۴۰۰	۹٫۸	۷۰۰
۲۵۰۰	۱۹۷	۸۰۰
۲۵۰	۵٫۱	۱۰۰۰
۱۳۰۰	۱۴۲٫۴	۱۳۰۰
۱۷۰۰	۲۵۰	۱۶۰۰

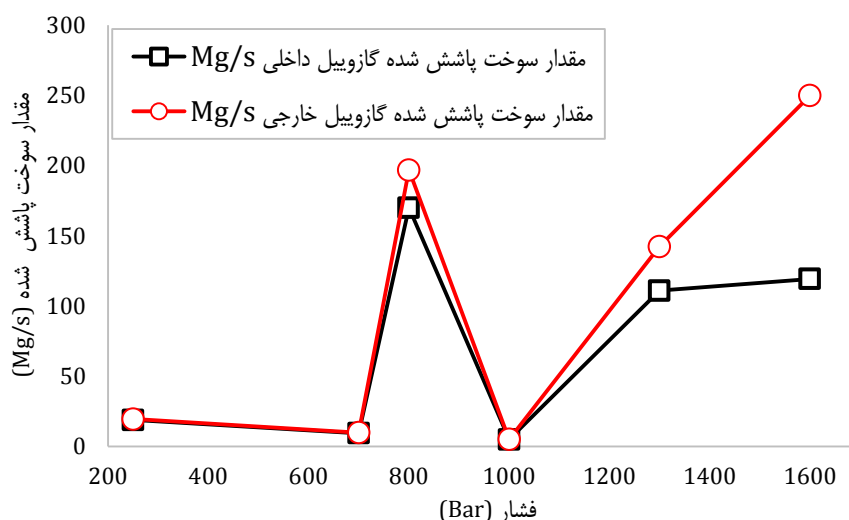
به منظور بررسی معنادار بودن یا بی‌معنا بودن اثر فشار و تکانه ارسالی بر روی مقدار پاشش، از آزمون t دوطرفه با سطح خطای ۵ درصد استفاده شد. نتایج حاصل از این آزمون در جدول ۱۰ ثبت گردید. با توجه به جدول ۱۰ و مقایسه نتیجه آزمون t با مقدار بحرانی آزمون ( $2,730.5 < 2,972.019$ )، معنادار بودن اثر فشار و مقدار تکانه بر مقدار پاشش سوخت برای سوزن طرح بوش نتیجه‌گیری گردید. به عبارت دیگر با سطح اطمینان ۹۵ درصد نتیجه این آزمایش قابل تعمیم برای این نوع سوزن افشانه است.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، روند کلی افزایش مقدار تزریق سوخت با افزایش فشار برای هر دو نوع گازوئیل داخلی و خارجی صادق است. این یافته با نتایج پژوهش پوراسماعیلی و عدالتی [۲۸] که با استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری به دست آمده بود، هم‌خوانی دارد. یک یافته کلیدی این است که در فشارهای شدیدتر از ۱۰۰۰ بار، مقدار تزریق گازوئیل خارجی دی ۶ در مقایسه با گازوئیل داخلی به‌طور محسوسی بیشتر است. با این حال، یک ناهنجاری قابل توجه در داده‌ها وجود دارد: با افزایش فشار از ۸۰۰ بار به ۱۰۰۰ بار، مقدار تزریق کاهش یافته است. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که این کاهش، ناشی از کاهش مدت‌زمان تکانه اعمالی (از ۲۵۰۰ میکروثانیه در ۸۰۰ بار به ۲۵۰ میکروثانیه در ۱۰۰۰ بار) است. این مشاهده، نقش تعیین‌کننده مدت‌زمان تکانه را در مقدار پاشش نشان می‌دهد. برای بررسی این مورد سوزن افشانه مورد آزمایش تحت فشارهای ثابت (۲۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ بار) قرار گرفت و مدت‌زمان تکانه اعمالی به‌طور مجزا در هر فشار افزایش یافت و نتایج در جدول ۱۱ ثبت گردید. همان‌طور که در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود، با ثابت نگه داشتن فشار و افزایش مدت‌زمان تکانه اعمالی، مقدار سوخت پاشش‌شده به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. شکل ۱۱، به‌وضوح بیانگر رابطه افزایش مقدار تزریق سوخت پاشش‌شده در فشار ثابت است.

در گام بعدی و برای اطمینان از تعمیم‌پذیری نتایج، آزمایش‌ها بر روی افشانه نوع دنسو تکرار شد. نتایج پاشش سوخت‌های داخلی و خارجی (دی ۶) با این افشانه بترتیب در جداول ۱۲ و ۱۳ ثبت گردید. شکل ۱۲ که بر اساس داده‌های این جداول ترسیم شده است، وابستگی مقدار تزریق سوخت به فشار تزریق را برای افشانه دنسو نشان می‌دهد. مجدداً مشاهده می‌شود که در یک فشار ثابت، مقدار تزریق گازوئیل دی ۶ بیشتر از گازوئیل نوع داخلی است. این امر، یافته کلیدی مربوط به برتری گازوئیل خارجی را که قبلاً برای افشانه بوش مشاهده شده بود، برای افشانه دنسو نیز تأیید می‌نماید و نشان می‌دهد که این پدیده به‌برند افشانه وابسته نیست.

جدول ۱۰ آزمون t دوطرفه برای سوزن نوع بوش با سطح خطای ۵ درصد

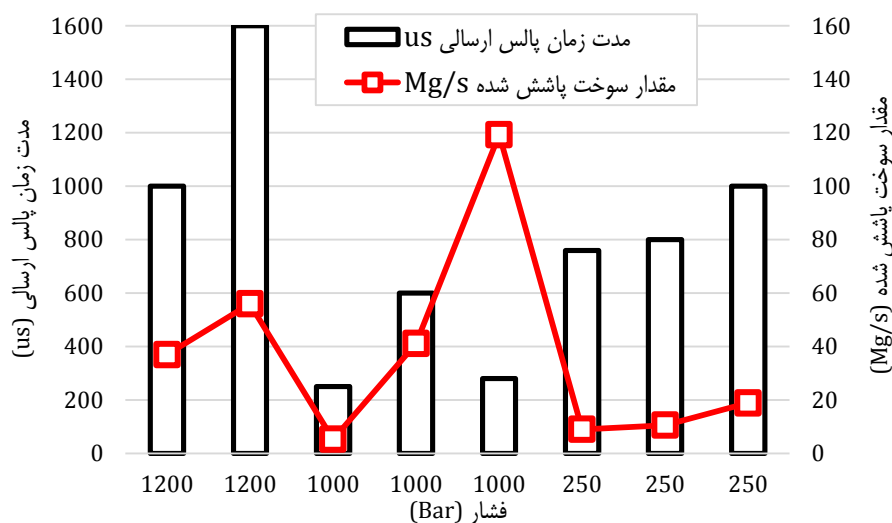
مقدار سوخت پاشش شده (میلی‌گرم در ثانیه)		
گازوئیل داخلی	گازوئیل دی ۶	
۷۱,۶۵۴	۱۰۳,۷۴	میانگین
۴۱۱۷,۸۵۴	۹۶۹۵,۲۳۶	پراکندگی
۱۰۰	۱۰۰	تعداد مشاهده
۶۹۰۶,۵۴۵		پراکندگی وزنی
.		فرض اختلاف میانگین
۱۹۸		انحراف معیار
-۲,۷۳۰۵		T آزمایش
۰,۰۰۳۴۵۲		P بحرانی-یک طرفه
۱,۶۵۲۵۸۶		T بحرانی یک طرفه
۰,۰۰۶۹۰۳		P بحرانی-دوطرفه
۱,۹۷۲۰۱۹		T بحرانی-دوطرفه



شکل ۱۰ وابستگی مقدار سوخت پاشیده شده به نوع گازوئیل برای سوزن بوش

جدول ۱۱ مقدار گازوئیل پاشش شده در فشار ثابت

فشار (بار)	مقدار سوخت پاشش شده (میلی گرم در ثانیه)	مدت اعمال تکانه (میکروثانیه)
۱۲۰۰	۱۸	۴۰۰
۱۲۰۰	۳۷	۱۰۰۰
۱۲۰۰	۵۶	۱۶۰۰
۱۰۰۰	۵۰۳	۲۵۰
۱۰۰۰	۴۱،۱	۶۰۰
۱۰۰۰	۱۱۹،۳	۲۸۰
۲۵۰	۹	۷۶۰
۲۵۰	۱۰،۶	۸۰۰
۲۵۰	۴۱،۱	۱۰۰۰



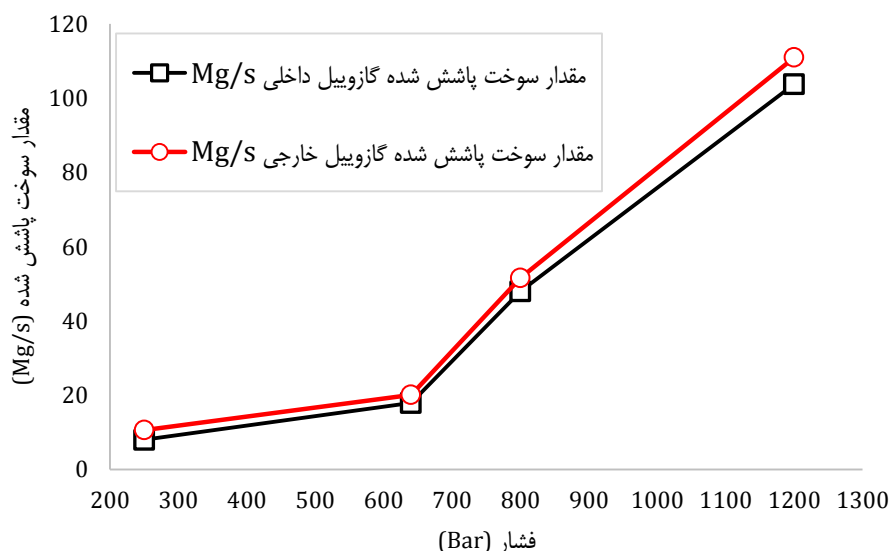
شکل ۱۱ نمودار وابستگی مقدار تزریق به مدت زمان تکانه اعمالی و فشار تزریق

جدول ۱۲ مقدار گازوئیل پاشش شده داخلی با سوزن دنسو

فشار (بار)	مقدار سوخت پاشش شده (میلی‌گرم در ثانیه)	مدت‌زمان اعمال تکانه (میکروثانیه)
۲۵۰	۸	۸۰۰
۶۴۰	۱۷٫۹	۶۰۰
۸۰۰	۴۸	۱۰۰۰
۱۲۰۰	۱۱۱	۲۰۰۰

جدول ۱۳ مقدار گازوئیل پاشش شده گازوئیل دی ۶ با سوزن دنسو

فشار (بار)	مقدار سوخت پاشش شده (میلی‌گرم در ثانیه)	مدت‌زمان اعمال تکانه (میکروثانیه)
۲۵۰	۱۰٫۶	۸۰۰
۶۴۰	۲۰٫۱	۶۰۰
۸۰۰	۵۸٫۶	۱۰۰۰
۱۲۰۰	۱۴۰٫۸	۲۰۰۰



شکل ۱۲ نمودار وابستگی مقدار تزریق به نوع گازوئیل برای سوزن دنسو

در این آزمایش نیز برای معنادار بودن و بی معنا بودن از آزمون t استفاده شد و مقدار خطای آزمایش ۵ درصد در نظر گرفته شد. نتایج این آزمون در جدول ۱۴ ارائه شده است. نتیجه این آزمون و مقایسه مقدار t مشاهده شده ( $2,143,58 <$   $1,972,017$ ) نیز معنادار بودن وابستگی مقدار سوخت پاشش شده به فشار و مقدار تکانه ارسالی را با سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان داد. به عبارت دیگر در سوزن‌های نوع دنسو با افزایش فشار تزریق و مقدار تکانه ارسالی مقدار تزریق سوخت به درون محفظه احتراق افزایش می‌یابد.

در آزمایش سوم از سوزن دلفی برای بررسی بهتر نتایج استفاده شد. داده‌های حاصل از پاشش گازوئیل‌های داخلی و خارجی با این افشانه بترتیب در جداول ۱۵ و ۱۶ ثبت گردید. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، روند قبلی نیز برای این افشانه تأیید می‌گردد و در یک فشار ثابت، مقدار تزریق گازوئیل دی ۶ به طور محسوسی بیشتر از نمونه‌های داخلی است. در این آزمایش نیز از آزمون دوطرفه t با سطح خطای ۵ درصد استفاده شد. نتایج حاصل در جدول ۱۷ ثبت

شد. با توجه به جدول مقدار t حاصل از آزمایش از مقدار t بحرانی بزرگتر است ( $2,04861 < 1,972017$ ) به بیان دیگر این آزمون با سطح اطمینان ۹۵ درصد قابل تعمیم به سوزن‌های افشانه این نمونه سوزن می‌باشد. در هر سه آزمایش انجام شده مشاهده گردید که با تغییر نوع سوخت، مقدار پاشش سوخت تزریق شده دچار تغییر شده است و مقدار سوخت تزریق شده نوع خارجی بدون توجه به نوع افشانه از نمونه داخلی بیشتر است و علت این امر را می‌توان در خواص فیزیکی سوخت مانند لزجت و چگالی سوخت جستجو کرد. در فشارهای شدیدتر مقدار نشتی مولکول‌های گازوئیل دی ۶ از بین فاصله استوانه و نازل افشانه کمتر است و در واقع بیشتر سوخت از سوراخ‌های افشانه به درون محفظه احتراق تزریق می‌شوند. از طرف دیگر چگالی بالاتر مستقیماً بر افزایش جرم پاشش شده در واحد حجم تأثیر می‌گذارد.

**جدول ۱۴** آزمون t دوطرفه برای سوزن نوع دنسو با سطح خطای ۵ درصد

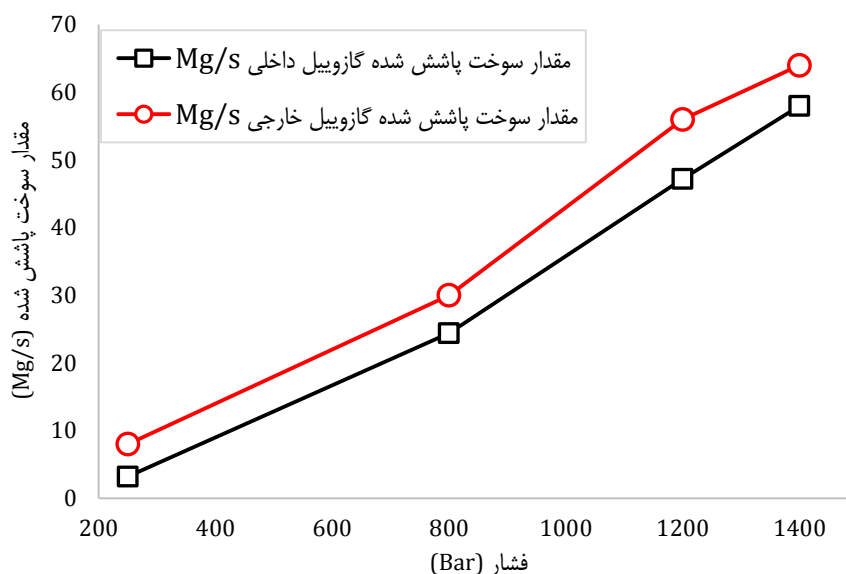
مقدار سوخت پاشش شده (میلی‌گرم در ثانیه)		
گازوئیل داخلی	گازوئیل دی ۶	
۴۶,۲۵۲۵	۶۰,۰۱۵	میانگین
۱۶۳۰,۷۱	۲۴۹۱,۳۷۱	پراکندگی
۱۰۰	۱۰۰	تعداد مشاهده
۲۰۶۱,۰۴۱		پراکندگی وزنی
۰		فرض اختلاف میانگین
۱۹۸		انحراف معیار
-۲,۱۴۳۵۸		T آزمایش
۰,۰۱۶۶۴۳		P بحرانی-یک طرفه
۱,۶۵۲۵۸۶		T بحرانی یک طرفه
۰,۰۳۳۲۸۷		P بحرانی-دوطرفه
۱,۹۷۲۰۱۷		T بحرانی-دوطرفه

**جدول ۱۵** مقدار گازوئیل پاشش شده داخلی با سوزن دلفی

مدت زمان اعمال تکانه (میکروثانیه)	مقدار سوخت پاشش شده (میلی‌گرم در ثانیه)	فشار (بار)
۶۰۰	۳,۲	۲۵۰
۱۰۰۰	۲۴,۴	۸۰۰
۱۶۰۰	۴۷,۲	۱۲۰۰
۲۰۰۰	۵۸	۱۴۰۰

**جدول ۱۶** مقدار گازوئیل پاشش شده گازوئیل دی ۶ با سوزن دلفی

مدت زمان اعمال تکانه (میکروثانیه)	مقدار سوخت پاشش شده (میلی‌گرم در ثانیه)	فشار (بار)
۶۰۰	۸	۲۵۰
۱۰۰۰	۳۰	۸۰۰
۱۶۰۰	۵۶	۱۲۰۰
۲۰۰۰	۶۴	۱۴۰۰



شکل ۱۳ وابستگی مقدار تزریق به نوع گازوئیل سوزن دلفی

جدول ۱۷ آزمون t دوطرفه برای سوزن نوع دلفی با سطح خطای ۵ درصد

مقدار سوخت پاشش شده (میلی گرم در ثانیه)		
گازوئیل دی ۶	گازوئیل داخلی	
۳۹،۵	۳۳،۲	میانگین
۴۹۳،۸۸۷۹	۴۵۱،۸۲۷۹	پراکندگی
۱۰۰	۱۰۰	تعداد مشاهده
	۴۷۲،۸۵۷۹	پراکندگی
	۰	فرض اختلاف میانگین
	۱۹۸	انحراف معیار
	-۲،۰۴۸۶۱	T آزمایش
	۰،۰۲۰۹۱	P بحرانی-یک طرفه
	۱،۶۵۲۵۸۶	T بحرانی یک طرفه
	۰،۰۴۱۸۱۹	P بحرانی-دوطرفه
	۱،۹۷۲۰۱۷	T بحرانی-دوطرفه

در پایان آزمایش‌های موجود، برای بررسی بهتر نتایج از یک نمونه گازوئیل خارجی دیگر تحت عنوان EN590,10ppm با مشخصات فیزیکی جدول ۱۸ استفاده شد. داده‌های پاشش این سوخت در جدول ۱۹ ثبت گردید و جدول ۲۰ نتایج آزمون t دوطرفه در مقایسه با گازوئیل نوع داخلی را نشان داد. در این آزمون مشخصات پاشش با اختلاف بسیار نامحسوسی مشابه گازوئیل داخلی بود و اختلاف معناداری در مقدار پاشش سوخت بین این دو گازوئیل مشاهده نشد. در این آزمایش مقدار t حاصل از آزمون دوطرفه آزمایش عدد ۰،۲۲۵۲ و مقدار p-value برابر با ۰،۸۲۲۰۵۸ ثبت شد که در هر دو حالت عدم اختلاف معنادار گویای تغییرات بین دو گروه گازوئیل داخلی و این نوع گازوئیل بود و علت این نتیجه را می‌توان در عدم تغییرات چگالی و لزجت این نوع گازوئیل با گازوئیل داخلی دانست.

جدول ۱۸ مشخصات گازوئیل EN590,10ppm

ویژگی	مقدار	واحد
چگالی در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد	۸۲۰	kg/m <sup>3</sup>
لزجت سینماتیکی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد	۳	cst
مقدار سولفور	۰،۰۰۲	%wt
عدد ستان	۵۰	

جدول ۱۹ مقدار گازوئیل پاشش شده نمونه EN590,10ppm با سوزن دلفی

مدت‌زمان اعمال تکانه (میکروثانیه)	مقدار سوخت پاشش شده (میلی‌گرم در ثانیه)	فشار (بار)
۶۰۰	۴،۲۸	۲۵۰
۱۰۰۰	۲۵	۸۰۰
۱۶۰۰	۴۷،۵	۱۲۰۰
۲۰۰۰	۵۸،۷	۱۴۰۰

جدول ۲۰ آزمون t دوطرفه برای سوزن نوع دلفی با سطح خطای ۵ درصد بین گازوئیل داخلی و EN590,10ppm

مقدار سوخت پاشش شده (میلی‌گرم در ثانیه)

EN590,10ppm	گازوئیل داخلی	
۳۸،۸۷۴	۳۳،۲	میانگین
۴۴۳،۹۳۳۹	۴۵۱،۸۲۷۹	پراکندگی
۱۰۰	۱۰۰	تعداد مشاهده
	۴۴۷،۸۸۰۴	پراکندگی وزنی
	۰	فرض اختلاف میانگین
	۱۹۸	انحراف معیار
	-۰،۲۲۵۲	T آزمایش
	۰،۴۱۱۰۲۹	P بحرانی-یک طرفه
	۱،۶۵۲۵۸۶	T بحرانی یک طرفه
	۰،۸۲۲۰۵۸	P بحرانی-دوطرفه
	۱،۹۷۲۰۱۷	T بحرانی-دوطرفه

یافته‌های این پژوهش مبنی بر تأثیر معنادار خواص فیزیکی سوخت به‌ویژه لزجت بر مقدار پاشش، با نتایج سایر محققان هم‌خوانی دارد. به عنوان مثال، هاک و همکاران [۲۹] گزارش کردند که حرکت دینامیکی سوزن افشانه تحت تأثیر لزجت سوخت قرار دارد و لزجت بالاتر در سوخت‌های بیودیزل منجر به بلندشدن کمتر و سرعت کندتر سوزن در هنگام بازشدن می‌شود. به‌طور مشابه، آگاروال و همکاران [۳۰] نیز وابستگی نرخ پاشش سوخت به لزجت را تأیید کرده‌اند.

پژوهش حاضر با نشان دادن اینکه چگالی نیز به موازات لزجت یک متغیر فیزیکی کلیدی و مؤثر بر مقدار پاشش جرمی است، به درک موجود در این زمینه غنا می‌بخشد. علاوه بر این، این تحقیق به طور تجربی و با استفاده از روش استاندارد بوش نشان داد که این اثرات تنها محدود به سوخت‌های بیودیزل نبوده و در بین نمونه‌های مختلف گازوئیل با درجات کیفی متفاوت نیز صادق است. نتیجه نهایی حاکی از آن است که برای پیش‌بینی دقیق عملکرد سامانه پاشش، باید به طور همزمان به هر دو خاصیت چگالی و لزجت سوخت توجه نمود.

## ۴- نتیجه‌گیری

بر پایه آزمایش‌های انجام‌شده بر روی سه نوع افشانه لوله مشترک با پنج نمونه سوخت مختلف، مهم‌ترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

مهم‌ترین نتیجه به‌دست‌آمده، وابستگی مقدار تزریق سوخت پاشش‌شده به نوع گازوئیل است. در موتورهای لوله مشترک دیزلی، افزایش فشار لوله موجب تشدید برخورد مولکول‌های سوخت و در نتیجه افزایش دمای آن می‌شود. این افزایش دما، لزجت و چگالی سوخت را کاهش داده و موجب افزایش نشت سوخت می‌گردد. در نهایت، مقدار تزریق سوخت به محفظه احتراق کاهش می‌یابد. بنابراین، سوخت‌های با چگالی و لزجت غلیظ، تزریق بیشتری را به همراه خواهند داشت.

با افزایش فشار لوله، مقدار تزریق افشانه‌ها افزایش می‌یابد. در این موتورها، فشار لوله وابسته به دور موتور است؛ به این صورت که با افزایش دور موتور، فشار لوله سوخت افزایش می‌یابد. با فشرده شدن اهرم گاز، تکانه ارسالی از واحد مدیریت رایانه‌ای موتور به افشانه‌ها افزایش یافته و متناسب با فشار مدت‌زمان تکانه ارسالی نیز افزایش می‌یابد.

عمده‌ترین مشکل موتورهای لوله مشترک دیزلی، سخت روشن شدن این موتورها در راه‌اندازی اولیه است. در این موتورها دور راه‌اندازی از ۲۵۰ تا ۳۰۰ دور در دقیقه متغیر است. با توجه به اینکه در این دورها فشار لوله مشترک در حداقل مقدار خود قرار دارد بنابراین با افزایش مدت‌زمان تکانه ارسالی، مقدار تزریق سوخت به درون محفظه احتراق افزایش می‌یابد و موتور راحت‌تر روشن می‌شود. یکی دیگر از مشکلات موتورهای دیزلی راه‌اندازی موتور در هوای سرد است. موتورهای رایج دیزلی برای غلبه بر این معضل از انواع شمع گرم‌کن و یا گرم‌کن هوای ورودی استفاده می‌کنند. در موتورهای لوله مشترک دیزلی با توجه به این‌که سردی هوا می‌تواند بر روی افزایش چگالی سوخت و لزجت تأثیرگذار باشد، بنابراین معضل دیر روشن شدن موتورهای لوله مشترک دیزلی به حداقل ممکن می‌رسد و با افزایش مدت‌زمان تکانه ارسالی در دور پایین موتور، مقدار تزریق سوخت افزایش یافته و موتور راحت‌تر روشن می‌شود.

در موتورهای لوله مشترک مقدار تزریق بیشتر گازوئیل دی ۶ نسبت به نمونه‌های داخلی، در زمان راه‌اندازی و همچنین تحت بار قرار گرفتن موتور مفید است ولی در بارهای متوسط و پایین، مصرف سوخت مربوط به این نوع گازوئیل افزایش می‌یابد.

از مقایسه مقدار میانگین پاشش سوخت گازوئیل داخلی با گازوئیل خارجی نوع EN590,10ppm تحت استاندارد جهانی اروپا، اختلاف معناداری مشاهده نشد.

## ۵- پیشنهادها

یکی از عوامل مؤثر در عملکرد افشانه‌های لوله مشترک دیزلی، مقدار چکه کردن در فشارهای پایین است. با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین دلایل بروز این عیب، مقاومت ناکافی مواد سازنده افشانه در برابر خوردگی ناشی از گازوئیل است، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده به بررسی تأثیر مقدار سولفور و آب موجود در گازوئیل‌های داخلی بر عملکرد این افشانه‌ها بپردازد.

## فهرست علائم

$p$	فشار
$\rho$	چگالی
$c$	سرعت صوت در سیال
$dm$	شاخص جریان جرمی سوخت
$A$	سطح مقطع لوله

## References

- [1] Xu-Guang T, Hai-Lang S, Tao QI, Zhi-Qiang F, Wen-Hui Y. The impact of common rail system's control parameters on the performance of high-power diesel. *Energy Procedia*. 2012 Jan 1; 16:2067-72. doi: [10.1016/j.egypro.2012.01.314](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.314)
- [2] Catania AE, Ferrari A, Manno M, Spessa E. Experimental analysis of transient flow phenomena in multi-jet common-rail systems. *SAE Technical Paper*; 2005 Sep 11. doi: [10.4271/2005-24-048](https://doi.org/10.4271/2005-24-048)
- [3] Chatlatanagulchai W, Aroonsrisopon T, Wannatong K. Robust common-rail pressure control for a diesel-dual-fuel engine using QFT-based controller. *SAE Technical Paper*; 2009 Jun 15. doi: [10.4271/2009-01-1799](https://doi.org/10.4271/2009-01-1799)
- [4] Volvo Corporation. Service manual Volvo. Gothenburg: Volvo Corporation; 2000.
- [5] Denso Corporation. Service manual Denso. Kariya: Denso Corporation; 2007.
- [6] Heywood JB. Internal combustion engine fundamentals. 2nd ed. New York: McGraw-Hill; 2018.
- [7] Zöldy M. Fuel properties of butanol-hydrogenated vegetable oil blends as a diesel extender option for internal combustion engines. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 2020;64(2):205-12. doi: [10.3311/PPCh.14153](https://doi.org/10.3311/PPCh.14153)
- [8] Hiwase SD, Moorthy S, Prasad H, Dumpa M, Metkar RM. Multidimensional modeling of direct injection diesel engine with split multiple stage fuel injections. *Procedia Engineering*. 2013 Jan 1;51:670-5. doi: [10.1016/j.proeng.2013.01.095](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.095)
- [9] Agarwal AK, Srivastava DK, Dhar A, Maurya RK, Shukla PC, Singh AP. Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions and performance characteristics of a single cylinder diesel engine. *Fuel*. 2013 Sep 1; 111:374-83. doi: [10.1016/j.fuel.2013.03.016](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.016)
- [10] Jurić F, Petranović Z, Vujanović M, Katrašnik T, Wang X, Duić N. Experimental and numerical investigation of injection timing and rail pressure impact on combustion characteristics of a diesel engine. *Energy conversion and management*. 2019 Apr 1;185:730-9. doi: [10.1016/j.enconman.2019.02.039](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.039)
- [11] Maricq MM. Engine, aftertreatment, fuel quality and non-tailpipe achievements to lower gasoline vehicle PM emissions: Literature review and future prospects. *Science of The Total Environment*. 2023 Mar 25;866:161225. doi: [10.1016/j.scitotenv.2022.161225](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161225)
- [12] d'Ambrosio S, Ferrari A. Exploitation of injection fusion strategies in diesel engines equipped with solenoid injectors. *International Journal of Engine Research*. 2018 Aug; 19(6):653-67. doi: [10.1177/1468087417728629](https://doi.org/10.1177/1468087417728629)
- [13] Medina M, Bautista A, Wooldridge M, Payri R. The effects of injector geometry and operating conditions on spray mass, momentum and development using high-pressure gasoline. *Fuel*. 2021 Jun 15; 294:120468. doi: [10.1016/j.fuel.2021.120468](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120468)
- [14] Xu L, Bai XS, Jia M, Qian Y, Qiao X, Lu X. Experimental and modeling study of liquid fuel injection and combustion in diesel engines with a common rail injection system. *Applied energy*. 2018 Nov 15;230:287-304. doi: [10.1016/j.apenergy.2018.08.104](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.104)
- [15] Vass S, Zöldy M. Effects of boundary conditions on a Bosch-type injection rate meter. *Transport*. 2021 Nov 9;36(4):297-304. doi: [10.3846/transport.2021.14351](https://doi.org/10.3846/transport.2021.14351)
- [16] Kang S, Lee S, Bae C. Effects of multi-stage split injection on efficiency and emissions of light-duty diesel engine. *Energies*. 2022 Mar 18; 15(6):2219. doi: [10.3390/en15062219](https://doi.org/10.3390/en15062219)
- [17] Ray SC, Nishida K, McDonell V, Ogata Y. Effects of full transient Injection Rate and Initial Spray Trajectory Angle profiles on the CFD simulation of evaporating diesel sprays-comparison between singlehole and multi hole injectors. *Energy*. 2023 Jan 15;263:125796. doi: [10.1016/j.energy.2022.125796](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125796)
- [18] Luo F, Sun Y, Moro A, Jin T, Wang C. Measurement and analysis of injection characteristics among each nozzle hole within a heavy-duty diesel engine. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2021 Jun 1; 79:101942. doi: [10.1016/j.flowmeasinst.2021.101942](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101942)
- [19] Tozzetti L, Barsanti T, Gambini F, Manzo G, Filippi S, Matteucci L, Izzo I, Di Pasquale F, Faralli S. Fiber Bragg grating sensors for dynamic strain measurements in gasoline direct injectors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021 May 18; 70(6):5658-68. doi: [10.1109/TVT.2021.3081363](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3081363)
- [20] Zhang T. An estimation method of the fuel mass injected in large injections in Common-Rail diesel engines based on system identification using artificial neural network. *Fuel*. 2022 Feb 15;310:122404. doi: [10.1016/j.fuel.2021.122404](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122404)
- [21] Arcoumanis C, Baniasad MS, Baniyas MS. Analysis of consecutive fuel injection rate signals

- obtained by the Zeuch and Bosch methods. SAE Transactions. 1993 Jan 1:1371-84.
- [22] Payri R, Novella R, Garcia A, Domenech V. A new methodology to evaluate engine ignition systems in high density conditions. *Experimental Techniques*. 2014 May; 38(3):17-28. doi: [10.1111/j.1747-1567.2012.00818.x](https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2012.00818.x)
- [23] Postriotti L, Buitoni G, Pesce FC, Ciaravino C. Zeuch method-based injection rate analysis of a common-rail system operated with advanced injection strategies. *Fuel*. 2014 Jul 15; 128:188-98. doi: [10.1016/j.fuel.2014.03.006](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.03.006)
- [24] Vass S, Zoldy M. A model based new method for injection rate determination. *Thermal Science*. 2021; 25(4 Part a):2437-46. doi: [10.2298/TSCI190417159V](https://doi.org/10.2298/TSCI190417159V)
- [25] Desantes JM, Payri R, Garcia A, Manin J. Experimental study of biodiesel blends' effects on diesel injection processes. *Energy & Fuels*. 2009 Jun 18;23(6):3227-35.
- [26] Hematian R, Hassan-Beygi SR, Massah J, Hajjalimohammadi A. Numerical investigation the effect of accumulator on reducing the pressure waves in a common rail fuel injection system of diesel engine. *The Journal of Engine Research*. 2022 Sep 23; 68(68):31-8. doi: [10.22034/er.2022.701023](https://doi.org/10.22034/er.2022.701023)
- [27] <https://www.opap.ir/>
- [28] Pursmaeil S, Edalati H, Jafari SM. Troubleshooting, adjusting and shim analysis of a diesel engine fuel injector from common rail type. *The Journal of Engine Research*. 2015;37(37):3-12. [In Persian]
- [29] Haq MU, Jafry AT, Ahmad S, Cheema TA, Ansari MQ, Abbas N. Recent advances in fuel additives and their spray characteristics for diesel-based blends. *Energies*. 2022 Oct 4; 15(19):7281. doi: [10.3390/en15197281](https://doi.org/10.3390/en15197281)
- [30] Agarwal AK, Mehra S, Valera H, Mukherjee NK, Kumar V, Nene D. Dimethyl ether fuel injection system development for a compression ignition engine for increasing the thermal efficiency and reducing emissions. *Energy Conversion and Management*. 2023 Jul 1; 287:117067. doi: [10.1016/j.enconman.2023.117067](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117067)