



## Experimental Analysis of the Impact of Fuel Pressure and Filter Clogging on the Spray Rate of Automotive Fuel Injectors

Bahman Rahmatinejad<sup>\*1</sup>, Hossein Rahimi Asiabaraki<sup>2</sup>, Farzin Azimpour Shishevan<sup>1</sup>

1. Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

2 Instructor,, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

### Abstract

This research was conducted with the aim of empirically analyzing the impact of fuel pressure and filter clogging on the injection rate of injectors. To this end, a laboratory injector testing device was designed and constructed. This device is capable of performing leakage tests and examining the shape and quantity of injector spray. The experiments were conducted at six pressures: 20, 30, 60, 80, 90, and 100 pounds per square inch. The results showed that, in general, the average spray rate of the injectors increases with an increase in pressure; for instance, raising the pressure from 20 to 30 pounds per square inch over a period of 30 seconds resulted in a 12% increase in fuel spray volume. Additionally, it was found that as the system voltage increases, the fuel spray volume also increases. For example, within a period of 10 seconds, the system at a voltage of 10 volts sprays 7 millimeters more fuel compared to the 6-volt setting. Finally, it was established that, depending on the percentage of filter clogging, the system pressure will be between 4.5 to 6.5 bar.

### Keywords

Filter blockage  
injector troubleshooting  
experimental analysis  
Pressure changes  
fuel consumption

Received: 11.28.2024

Revised: 02.07.2025

Accepted: 05.09.2025

\*Corresponding Author

Bahman Rahmati Nejad

Email

[brahmati@nus.ac.ir](mailto:brahmati@nus.ac.ir)

### 1- Introduction

This research was conducted with the aim of empirically analyzing the effect of fuel pressure and filter clogging on the injection rate of injectors. For this purpose, an injector testing device was designed and constructed in a laboratory setting. This device is capable of conducting leakage tests, examining the shape and quantity of injector spray. The experiments were performed at six pressures: 20, 30, 60, 80, 90, and 100 pounds per square inch. The results indicated that, in general, the average spray of the injectors increases with an increase in pressure. For example, over 30 seconds, the spray amount increases by 12 percent when the pressure rises from 20 to 30 pounds per square inch. It was also

found that the higher the system voltage, the greater the spray amount. For instance, when the system voltage is 10 volts, compared to a situation where the system voltage is 6 volts, 7 millimeters more fuel is sprayed over a period of 10 seconds. Finally, it was determined that, depending on the percentage of filter clogging, the system pressure would range between 4.5 to 6.5 bars.

### 2- Research Methods

To investigate the effect of fuel pressure and fuel filter clogging on the spray rate in injectors, an injector cleaning device was designed and manufactured. The components of the manufactured device are shown in Figure 1 in the



following order: 1- fuel rail, 2- injectors, 3- glass fuel measuring cylinders, 4- Digital timer, 5- Five-pin relay, 6- pressure gauge, 7- fuel hose entering the fuel rail, 8- fuel drain valves of the glass cylinders, 9- Arduino board, 10- Adjustable voltage AC to DC adapter.

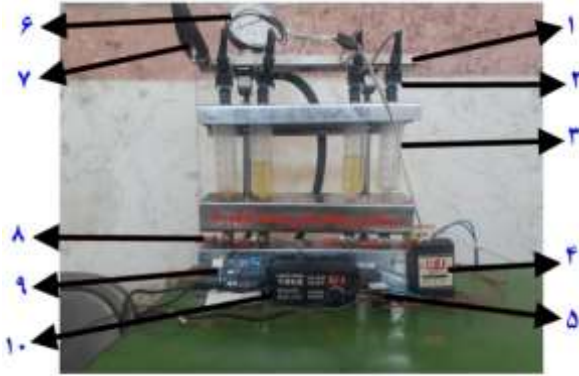


Figure 1: Overall view of the injector cleaning device components

This device operates with a 220-volt power supply and has a working pressure of zero to 16 bar. A Civil pressure gauge was used for pressure measurement. This gauge is used for industrial applications and has high accuracy. The power supply for the fuel pump and injectors is 12 volts. This device can be used to investigate and observe injector leakage; test the injection angle and itemization method of the injectors; test the uniformity of fuel spray from the injectors; perform chemical cleaning and completely remove internal deposits from blocked injectors; and observe and compare the fuel spray volume of injectors relative to each other. To switch the injectors on and off and prevent them from being

constantly open, the circuit shown in Figure 2 was designed and built. In this circuit, the test time is determined with the help of a digital timer (10, 20, 30, and 40 seconds), and the on and off time of the injectors is specified by programming on the Arduino board. Pins 85 and 86 in the 5-pin relay are related to the magnetic relay, and the Arduino board can switch the injectors' power on and off by switching the current of this relay on and off.

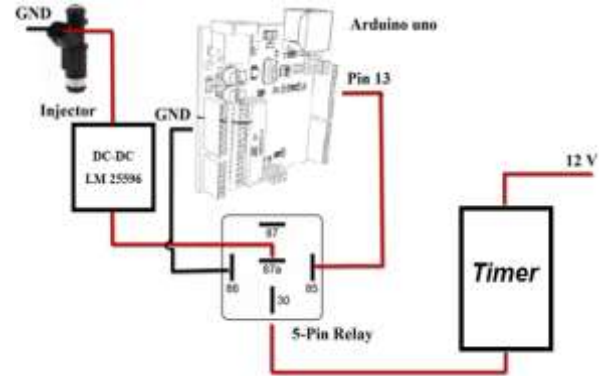


Figure 2: Injector power on/off mechanism

### 3- Discussion and Results

Investigation of the Effect of Increasing Pressure on Spray Quantity

Experiments were conducted at six pressures: 20, 30, 60, 80, 90, and 100 psi. Generally, the average injector spray quantity increases with increasing pressure. For example, in 30 seconds, increasing the pressure from 20 to 30 psi increases the spray quantity by 12%. Similarly, in 40 seconds, increasing the pressure from 90 to 100 psi increases the spray quantity by 6.5% (Figure 3).

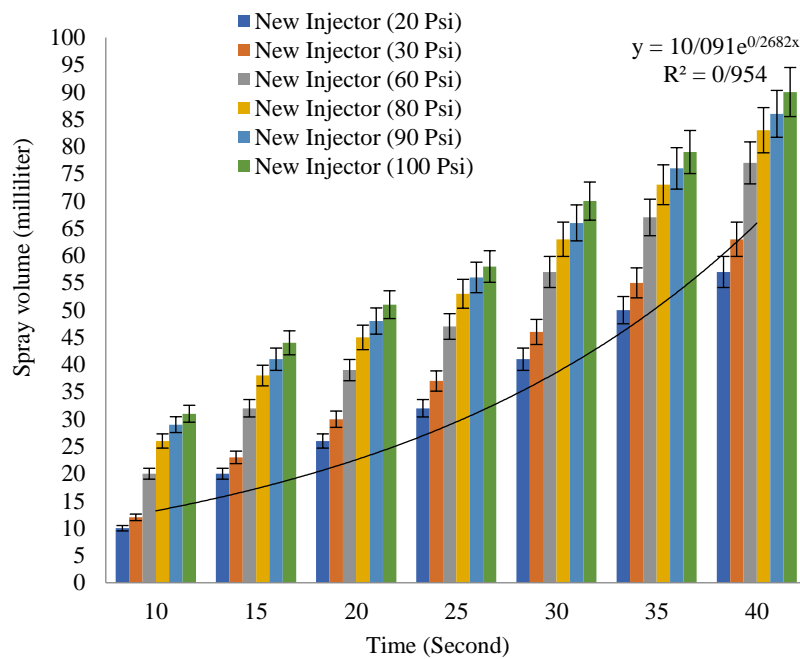


Figure 3: Effect of Pressure on Injector Spray Quantity

#### Effect of System Voltage on Injector Spray Rate

Spray tests were performed on the system at four different voltages and five time intervals. The average spray rates were calculated, and the results are reported in Figure 4. According to this figure, the higher the system voltage, the greater the spray quantity. For example, when the system voltage is 10 volts, 7 mm more fuel is injected in 10 seconds compared to when the system voltage is 6 volts.

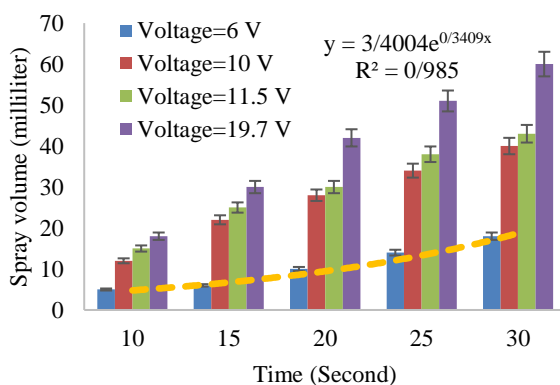


Figure 4: Effect of System Voltage on Injector Spray Rate

#### Investigation of Fuel Filter Clogging

Depending on the percentage of fuel filter clogging, the fuel pump pressure will be between 4.5 and 6.5 bar

#### 4- Conclusion

To empirically analyze the impact of fuel pressure and filter clogging on the injection rate of automotive injectors, a laboratory model of an injector testing device was designed and constructed. Experiments were conducted at six pressures: 20, 30, 60, 80, 90, and 100 PSI. The results showed that, generally, the average injection rate of the injectors increases with increasing pressure. For example, in 30 seconds, increasing the pressure from 20 to 30 PSI increases the injection volume by 12%. Or, in 40 seconds, increasing the pressure from 90 to 100 PSI increases the injection volume by 6.5%. It was also found that the higher the system voltage, the greater the injection volume. For instance, when the system voltage is 10 volts, 7 mm more fuel is injected in 10 seconds compared to when the system voltage is 6 volts. Finally, it was determined that, depending on the percentage of filter clogging, the system pressure would be between 4.5 and 6.5 bar.

#### 5- References

- [1] Rahmatinejad, B., Rahimi Asiabaraki, H., & Azimpour Shishevan, F. (2023). Investigation

- of the effect of  $AL_2O_3$  nanofluid in M13NI engine cooling system. *The Journal of Engine Research*, 70(1), 47–65. doi: [10.22034/ER.2023.1975318.0](https://doi.org/10.22034/ER.2023.1975318.0)
- [2] Rahmatinejad, B., Rahimi Asiabaraki, H., & Azimpour Shishevan, F. (2023). Diagnosing dimensional defects and valve cracks using machine vision and acoustic emission. *Karafan Journal*, 20(3), 149–168. doi: [10.48301/KSSA.2023.391572.2501](https://doi.org/10.48301/KSSA.2023.391572.2501) [In Persian]
- [3] Sehili, Y., Cerdoun, M., Loubar, K., & Tarabet, L. (2024). Dual fuel engine injector temperature monitoring: An innovative thermal analysis approach. *Applied Thermal Engineering*, 249, 123370. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2024.123370](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123370)
- [4] Morad, M. R., & Ramezani, A. (2020). Experimental study of liquid film thickness formed by spray impingement on a solid surface. *Fuel and Combustion*, 13(2), 57–72. [In Persian]
- [5] Poormahmood, A., Ghorban Hosseini, M., Kebriaee, A., & Farshchi, M. (2016). An experimental study on the operating parameters of a simplex swirl injector. *Fuel and Combustion*, 9(1), 75–84. [In Persian]
- [6] Khodaverdian, R., Jahannama, M. R., Ramezani, A., & Kebriaee, A. (2021). Evaporation of injected oxidizer from a pressure-swirl injector in a low pressure combustion chamber. *Fuel and Combustion*, 14(1), 95–116. doi: [10.22034/JFNC.2021.250402.1248](https://doi.org/10.22034/JFNC.2021.250402.1248) [In Persian]
- [7] Rostami, E. (2021). Experimental and numerical investigation of atomization characteristics of diesel and mazut fuel injected from a pressure-swirl atomizer. *Fuel and Combustion*, 14(3), 33–58. doi: [10.22034/JFNC.2021.284326.1278](https://doi.org/10.22034/JFNC.2021.284326.1278) [In Persian]
- [8] Mueller, C. J., Nilsen, C. W., Biles, D. E., & Yraguen, B. F. (2021). Effects of fuel oxygenation and ducted fuel injection on the performance of a mixing-controlled compression-ignition optical engine with a two-orifice fuel injector. *Applications in Energy and Combustion Science*, 6, 100024. doi: [10.1016/j.jaecs.2021.100024](https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2021.100024)
- [9] Paryanto, I., Budianta, I. A., Alifia, K. C. H., Hidayatullah, I. M., Darmawan, M. A., Judistira, ..., & Gozan, M. (2022). Modelling of fuel filter clogging of B20 fuel based on the precipitate measurement and filter blocking test. *ChemEngineering*, 6(6), 84. doi: [10.3390/chemengineering6060084](https://doi.org/10.3390/chemengineering6060084)
- [10] Akal, D., & Selvi, İ. (2023). Effects of clogged air filter on power, torque, fuel consumption and emissions of diesel engines in tractors. *Petroleum Science and Technology*, 41(24), 2419–2433. doi: [10.1080/10916466.2023.2230248](https://doi.org/10.1080/10916466.2023.2230248)



## تحلیل تجربی تأثیر فشار سوخت و گرفتگی فیلتر بر نرخ پاشش انژکتورهای خودرو

بهمن رحمتی نژاد<sup>۱\*</sup>، حسین رحیمی آسیابریکی<sup>۲</sup>، فرزین عظیم پور شیشوان<sup>۱</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

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

### چکیده

این تحقیق با هدف تحلیل تجربی تأثیر فشار سوخت و گرفتگی فیلتر بر نرخ پاشش انژکتورها انجام شده است. بدین منظور، یک دستگاه تست انژکتور به صورت آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. این دستگاه قابلیت انجام تست‌های نشتی، بررسی شکل و مقدار پاشش انژکتورها را دارد. آزمایش‌ها در شش فشار ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع انجام شد. نتایج نشان داد در حالت کلی متوسط پاشش انژکتورها با افزایش فشار افزایش می‌یابد؛ به عنوان نمونه، افزایش فشار از ۲۰ به ۳۰ پوند بر اینچ مربع در بازه زمانی ۳۰ ثانیه منجر به افزایش ۱۲ درصدی مقدار پاشش سوخت گردید. همچنین مشخص شد که با افزایش ولتاژ سیستم، مقدار پاشش سوخت نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در مدت زمان ۱۰ ثانیه، سیستم با ولتاژ ۱۰ ولت نسبت به حالت ۶ ولت، ۷ میلی‌متر سوخت بیشتر پاشش می‌کند. در نهایت مشخص شد با توجه به درصد گرفتگی فیلتر، فشار سیستم در محدوده بین ۴/۵ تا ۶/۵ بار خواهد بود.

### کلمات کلیدی

گرفتگی فیلتر  
عیب‌یابی انژکتور  
تحلیل تجربی  
تغییرات فشار  
مصرف سوخت

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

\*نویسنده مسئول

بهمن رحمتی نژاد

ایمیل

[brahmati@nus.ac.ir](mailto:brahmati@nus.ac.ir)

### ۱- مقدمه

تعویض قطعات در صورت لزوم از دیگر مزایای سیستم انژکتوری می‌باشد. انژکتور، یک جزء کلیدی در موتورهای احتراق داخلی است که وظیفه تزریق سوخت را بر عهده دارد. این قطعه به‌طور دقیق و کنترل‌شده سوخت را به پشت سوپاپ هوا در مانیفولد ورودی می‌رساند تا با هوای ورودی ترکیب شود و در نتیجه یک مخلوط مناسب برای احتراق تولید کند. عملکرد انژکتور معمولاً تحت نظارت واحد کنترل الکترونیکی قرار دارد که بر اساس نیاز موتور و شرایط عملکرد، زمان و مقدار تزریق سوخت را تنظیم می‌کند. با توجه به سوراخ‌های ریز طراحی‌شده بر روی انژکتورها مقدار معینی سوخت از آن‌ها عبور می‌کند. قطر این سوراخ‌ها با گذشت زمان دچار تغییر شده و مقدار سوخت تحویل داده‌شده به موتور تغییر یافته و موتور نامیزان کار می‌کند. احتراق مخلوط سوخت و هوا در موتورهای احتراق داخلی، تولید قدرت می‌کند [۲]. یکی از عواملی که باعث بروز مشکل

موتورهای احتراق داخلی امروزه کاربردهای فراوانی دارند. در این سیستم، تولید توان با بازده بالا بستگی به عملکرد صحیح در تمام قسمت‌های آن دارد [۱]. خودروهای انژکتوری، سوخت را به‌طور دقیق و در زمان مناسب به موتور منتقل می‌کنند. این فناوری بهبود کارایی موتور، کاهش مصرف سوخت و کاهش سطح آلاینده‌ها را به همراه دارد. از دهه‌ها پیش، صنایع خودروسازی به توسعه سیستم‌های انژکتوری پرداخته‌اند تا عملکرد موتورهای احتراق داخلی را بهینه کنند. امروزه بیشتر خودروهای جدید به سیستم‌های انژکتوری مجهز هستند. خودروهای انژکتوری به علت کنترل الکترونیکی اعمال‌شده روی سیستم سوخت‌رسانی و متعاقب آن عکس‌العمل سریع‌تر اجزاء دارای راندمان و شتاب بالاتری می‌باشند. حذف قطعاتی مانند کاربراتور و استفاده از واحد کنترل الکترونیکی، انژکتور، ریل سوخت و ... با عمر مفید بیشتر، کارایی بالاتر و همچنین سهولت عیب‌یابی و



نمودند. انژکتور مورد استفاده در این پژوهش از نوع پیچشی تک پایه با ساختار ساده بوده و سیال عامل مورد استفاده آب می باشد. کلیه آزمایشها در شرایط استاندارد اتمسفریک انجام پذیرفته است. تصویربرداری از میدان پاشش به روش سایه‌نگاری صورت گرفته است. نتایج آزمایشها نشان می دهد که در رینولدز ۳۰۰۰۰ رژیم پاشش انژکتور از رژیم قطره‌چکانی به رژیم اتمیزاسیون تغییر یافته و با افزایش بیشتر رینولدز تا حد ۳۷۰۰۰ رژیم کاملاً توسعه یافته پاشش (که مخروط پاشش کامل می شود) حاکم می شود. از طرفی، با افزایش رینولدز، زاویه پاشش انژکتور ابتدا افزایش یافته و با افزایش بیشتر رینولدز، تقریباً ثابت می شود. خداوردیان و همکاران [۶] در سال ۱۴۰۰ به بررسی تبخیر اکسیدکننده پاشش شده از انژکتور فشاری-پیچشی در محفظه احتراق در شرایط فشار پایین پرداخته و نشان دادند هر چند نقش تبخیر آبی در تغییر دما و فشار قطرات به عنوان فاز گسسته و نیز گاز محیطی به عنوان فاز پیوسته مشهود است، ولی هم‌زمان با آن می توان میل این دو فاز به شرایط پایدار و ایجاد حالت پایا را مشاهده کرد. رستمی [۷] در سال ۱۴۰۰ به بررسی تجربی و عددی مشخصات قطره سازی سوخت‌های دیزل و مازوت تزریق شده از یک انژکتور فشاری-پیچشی پرداخته و نشان دادند طول شکست و قطر قطرات با افزایش دما و فشار سوخت روندی نزولی را طی کرده و با توسعه کامل جریان، تقریباً به سمت مقدار صفر میل می کنند. توزیع قطر اندازه قطرات با افزایش گرانروی سیال و توزیع سرعت قطرات با کاهش گرانروی سیال صاف تر و یکنواخت تر می شود. مولر و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۱ اثرات اکسیژن‌رسانی به سوخت تزریق شده در یک موتور احتراق تراکمی با انژکتور دو روزه را بررسی نمودند آن‌ها به منظور مقایسه احتراق دیزل معمولی و تزریق سوخت با هوا از یک موتور تک‌سیلندر استفاده کردند. نتایج نشان داد ویژگی‌های عملیاتی، انتشار هیدروکربن و مونوکسید کربن و در نتیجه راندمان احتراق بین دو مورد اشاره شده مشابه است. پارینتو و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۲ مدل‌سازی مسدود شدن فیلتر سوخت با سوخت B20 بر اساس اندازه‌گیری رسوب و آزمون مسدود شدن فیلتر را انجام دادند. این سوخت دارای ترکیب ۲۰٪ بیودیزل و ۸۰٪ گازوئیل است که در خیلی از خودروهای تجاری مانند کامیون‌ها، کامیونت‌ها و وانت‌ها استفاده می شود. آن‌ها نشان دادند مقدار رسوب بر زمان مسدود شدن فیلتر سوخت تأثیر می گذارد. نتایج نشان داد که هرچه آلودگی‌های موجود در سوخت بیشتر باشند، زمان کمتری برای رسیدن به افت فشار به

در سیستم سوخت‌رسانی و در نتیجه انژکتور می شود، کیفیت نامناسب سوخت و وجود ذرات ناخالصی است. این ذرات به مرور زمان و پس از مدتی در بدنه اجزا موجود در سیستم سوخت‌رسانی و به ویژه انژکتور نفوذ می کنند. این فرآیند در شرایط مختلف کاری موتور رخ می دهد. با افزایش مواد زائد و ناخالصی روی اجزای انژکتور، به تدریج مشخصه‌های عملکردی این قطعه تغییر می کند. به عنوان مثال، ابعاد داخلی سوزن و سوراخ تغییر کرده و ممکن است دبی خروجی آن نیز دچار تغییر شود. همچنین ممکن است نحوه پاشش (زاویه پاشش) نیز تحت تأثیر قرار گیرد. این عوامل موجب اختلال در عملکرد صحیح موتور می شوند و حتی ممکن است تغییر نحوه پاشش باعث آسیب به سایر قطعات نیز بشود.

محققین متعددی در مورد انژکتور، تحقیق نموده‌اند که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می شود. یوسف سهیلی و همکاران [۳] در سال ۲۰۲۴ به مدل‌سازی عددی دمای انژکتور یک موتور دوگانه‌سوز پرداختند. آن‌ها نشان دادند نظارت بر دمای انژکتور در موتورهای دوگانه‌سوز برای بهبود عملکرد و کاهش مشکلات احتمالی اهمیت دارد. در این تحقیق سوخت اصلی موتور گازوئیل و سوخت ثانویه گاز طبیعی بود. از نرم‌افزار المان محدود انسیس فلونت برای شبیه‌سازی توزیع حرارت درون انژکتور و اجزای مرتبط تحت شرایط عملیاتی مختلف استفاده شد. برای مدل‌سازی تعاملات حرارتی بین سوخت تزریقی، گازهای داغ و اجزای موتور از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شد. نتایج نشان داد در بار کامل زمانی که از سوخت دیزل استفاده می شود نوک انژکتور نسبت به حالتی که از گاز طبیعی استفاده می شود ۲۵۵ درجه کلوین گرم تر است. مراد و رمضانی [۴] در سال ۱۳۹۹ به مطالعه تجربی ضخامت فیلم مایع حاصل از برخورد اسپری با یک سطح جامد پرداخته و نشان دادند در دبی‌های حجمی بالای افشانه یک لایه مایع بر روی سطح جامد تشکیل می شود. در صورتی که ضخامت لایه مایع زیاد باشد، در کاربردهای احتراقی، می تواند منجر به احتراق ناقص سوخت در محفظه احتراق شود. ضخامت لایه مایع به پارامترهای زیادی، نظیر دبی حجمی سیال، فاصله نازل تا سطح و مود شکست افشانه، بستگی دارد. اندازه ضخامت متوسط لایه مایع با تغییر پارامترهایی نظیر دبی حجمی سیال مایع و گاز و فاصله نازل تا سطح تغییر می کند و این ضخامت در بازه بین ۴۰ تا ۲۲۰ میکرومتر در شرایط مختلف متغیر است. پورمحمود و همکاران [۵] در سال ۱۳۹۵ پارامترهای عملکردی یک انژکتور پیچشی، به عنوان تابعی از اعداد رینولدز و وبر، را مطالعه

سوخت ورودی به ریل سوخت، ۸- شیرهای تخلیه سوخت استوانه‌های شیشه‌ای، ۹- برد آردوینو، ۱۰- آداپتور جریان AC به DC با ولتاژ قابل تنظیم می‌باشد.



شکل ۱: نمای کلی اجزای دستگاه شستشوی انژکتور

این دستگاه با ولتاژ تغذیه ۲۲۰ ولت کار می‌کند و محدوده فشار کاری آن از صفر تا ۱۶ بار می‌باشد که در آن از گیج فشار سیوال<sup>۱</sup> استفاده شده است. این گیج جهت مصارف صنعتی با دقت بالا برای اندازه‌گیری فشار مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دستگاه با تغذیه ۱۲ ولت برای پمپ بنزین و انژکتورها طراحی گردیده و قابلیت انجام آزمایش‌های مختلفی از جمله بررسی و مشاهده نشتی انژکتورها، تست زاویه تزریق و نحوه پودرسازی انژکتورها، تست حالت یکنواختی پاشش سوخت انژکتورها، شستشوی شیمیایی و رفع کامل رسوبات داخلی انژکتورهای مسدود و مشاهده و مقایسه حجم پاشش سوخت بین انژکتورهای مختلف را دارا می‌باشد. به منظور قطع و وصل جریان انژکتورها و جلوگیری از باز بودن مداوم آن‌ها، مدار شکل ۲ طراحی و ساخته شد. در این مدار مدت زمان آزمایش از طریق تایمر دیجیتالی در بازه‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ثانیه قابل تنظیم بوده و کنترل قطع و وصل انژکتورها توسط برنامه‌نویسی برد آردوینو انجام می‌پذیرد. پایه‌های ۸۵ و ۸۶ در رله پنج‌پایه مربوط به رله مغناطیسی بوده و برد آردوینو با قطع و وصل جریان این رله می‌تواند جریان برق انژکتورها را قطع و وصل نماید.

بردهای آردوینو، مجموعه‌ای از پلتفرم‌های سخت‌افزاری متن‌باز هستند که به‌ویژه برای اهداف آموزشی و توسعه پروژه‌های

سطح ۳۰ کیلوپاسکال نیاز است. آکال و سلوی [۱۰] در سال ۲۰۲۳ اثر فیلتر هوای مسدود شده بر قدرت، گشتاور، مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها در موتورهای دیزلی تراکتورها را بررسی نمودند. در این مطالعه، افت فشار در سیستم ورودی زمانی که فیلتر هوای جدید ۱- میلی‌بار، سپس ۲۱- میلی‌بار، ۴۰- میلی‌بار بسته به آلودگی و ۶۵- میلی‌بار در حالت کاملاً مسدود شده، مورد بررسی قرار گرفت. در حالی که افت فشار در سیستم ورودی ۱- میلی‌بار بود، حداکثر قدرت تولیدشده در موتور در ابتدا ۶۴/۲ کیلووات و حداکثر گشتاور ۳۸۶ نیوتن‌متر بود. وقتی افت فشار به ۶۵- میلی‌بار رسید، حداکثر قدرت موتور به ۵۸/۱ کیلووات و حداکثر گشتاور به ۳۶۰ نیوتن‌متر کاهش یافت. دزیوباک و کارچفسکی [۱۱] در سال ۲۰۲۲ پژوهشی تجربی درباره تأثیر افت فشار فیلتر هوا بر عملکرد موتور احتراق داخلی انجام دادند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که در موتورهای احتراق جرقه‌ای، هر یک کیلوپاسکال افزایش در افت فشار فیلتر هوا موجب کاهش ۱ تا ۱/۵ درصدی میانگین قدرت موتور و افزایش مصرف سوخت ویژه به میزان حدود ۰/۷ می‌گردد. برای موتورهای احتراق تراکمی، مقادیر به ترتیب ۰/۴ تا ۰/۶ درصد کاهش در قدرت و ۰/۳ تا ۰/۵ درصد افزایش در مصرف سوخت ویژه است.

در مطالعات پیشین، بیشتر توجه‌ها به جنبه‌های مکانیکی و طراحی انژکتورها معطوف شده است و تأثیر هندسه سوراخ‌های نازل بر فرآیندهای تزریق، اختلاط و احتراق، عمدتاً از دو رویکرد تجربی و عددی استفاده می‌شود [۱۷-۱۲]؛ اما پژوهش حاضر به‌طور خاص به بررسی تجربی و عملی دو عامل مهم، یعنی فشار سوخت و وضعیت فیلتر سوخت پرداخته و تلاش دارد تا درک بهتری از تأثیرات متقابل این دو عامل بر نرخ پاشش انژکتورها فراهم کند. با توجه به اینکه سوخت‌پاشی بهینه یکی از عوامل اصلی در بهبود کارایی سیستم‌های احتراق داخلی و کاهش آلاینده‌ها است، درک دقیق از چگونگی تأثیر این دو عامل می‌تواند به ارتقاء عملکرد موتورهای احتراق داخلی و بهینه‌سازی مصرف سوخت منجر شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر فشار و گرفتگی فیلتر بنزین بر میزان پاشش انژکتورها، دستگاه شستشوی انژکتور طراحی و ساخت شده است. اجزای دستگاه ساخته‌شده مطابق شکل ۱ به ترتیب شامل ۱- ریل سوخت، ۲- انژکتورها، ۳- استوانه‌های شیشه‌ای اندازه‌گیری سوخت، ۴- تایمر دیجیتالی، ۵- رله پنج‌پایه، ۶- گیج فشار، ۷- شیلنگ

<sup>۱</sup> Cewal

زمان ۴۰ ثانیه، افزایش فشار از ۹۰ به ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع منجر به رشد ۵/۶ درصدی در مقدار پاشش سوخت شد.



(ب)

(الف)



(د)

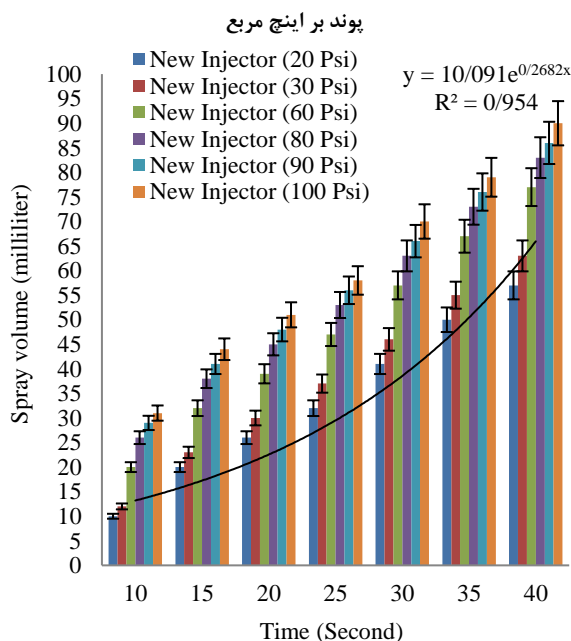
(ج)



(و)

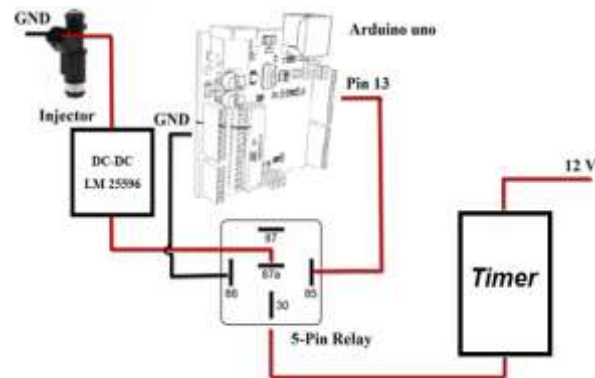
(ه)

شکل ۳: فشار کاری دستگاه (الف) ۲۰، (ب) ۳۰، (ج) ۶۰، (د) ۸۰، (ه) ۹۰ و (و) ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع



شکل ۴: تأثیر فشار بر مقدار پاشش انژکتورها

الکترونیکی طراحی شده‌اند. این بردها به کاربران امکان می‌دهند تا با استفاده از زبان برنامه‌نویسی ساده‌ای مانند Arduino C++، برنامه‌هایی را توسعه دهند که می‌توانند با حسگرها، موتورها و دستگاه‌های دیگر ارتباط برقرار کنند. با ارائه مجموعه‌ای از ورودی‌ها و خروجی‌های دیجیتال و آنالوگ، آردوینو نه تنها برای پروژه‌های ساده بلکه در کاربردهای صنعتی و تحقیقاتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۲: مکانیزم قطع و وصل جریان برق انژکتورها

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی تأثیر فشار بر میزان پاشش انژکتورها

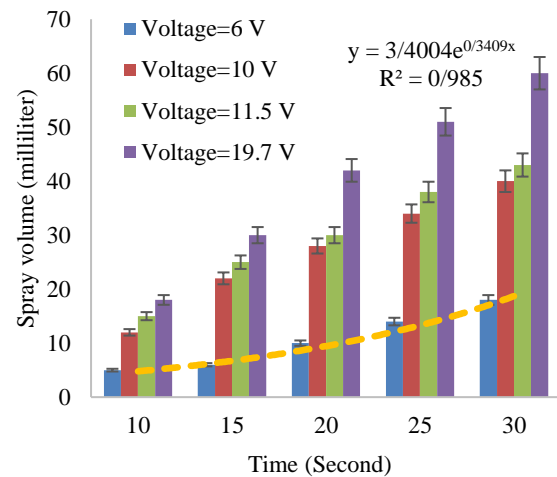
پیش از انجام آزمایش اصلی، لازم است تست نشتی سوزن انژکتورها در فشار ۵ بار انجام گیرد. برای این منظور، برق پمپ بنزین را وصل کرده در حالی که برق انژکتورها قطع باشد. در این حالت نشتی احتمالی انژکتورها به صورت چشمی کنترل می‌شود. در صورت وجود نشتی، بایستی اورینگ سوزن انژکتور مربوطه تعویض شود. پس از اطمینان از عدم نشتی، با مسدود کردن نسبی مسیر برگشت سوخت، می‌توان فشار ریل سوخت را افزایش داد و آزمایش بررسی تأثیر فشار بر میزان پاشش را با چهار انژکتور نو انجام داد. در این حالت فعال شدن رگولاتور انتهای ریل سوخت تأثیری بر کنترل فشار ندارد و می‌توان فشار ریل سوخت را افزایش یا کاهش داد.

شکل ۳ آزمایش‌ها را که در شش فشار ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع انجام شد نمایش می‌دهد.

به‌طور کلی همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزایش فشار، متوسط پاشش انژکتورها افزایش می‌یابد. به‌عنوان نمونه، در بازه زمانی ۳۰ ثانیه، افزایش فشار از ۲۰ به ۳۰ پوند بر اینچ مربع موجب افزایش ۱۲ درصدی مقدار پاشش گردید. همچنین در مدت

### ۲-۳- بررسی تأثیر ولتاژ بر میزان پاشش انژکتورها

به منظور تثبیت ولتاژ از مبدل جریان مستقیم DC-DC LM25596 مطابق شکل ۲ استفاده شد. ولتاژ ورودی این مبدل ۳ تا ۳۰ ولت و ولتاژ خروجی آن ۱/۵ تا ۳۰ ولت است و حداکثر جریان خروجی ۳ آمپر می‌باشد. آزمایش‌های انجام شده در چهار سطح ولتاژ مختلف و پنج بازه زمانی نشان داد که تغییرات ولتاژ سیستم تأثیر معناداری بر عملکرد پاشش انژکتورها دارد و با افزایش ولتاژ، میزان پاشش به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. همانطور که شکل ۵ مشاهده می‌شود، در مدت زمان ۱۰ ثانیه، اختلاف پاشش بین ولتاژهای ۱۰ و ۶ ولت به میزان ۷ میلی‌متر سوخت بوده است که این نتیجه به وضوح رابطه مستقیم بین ولتاژ و میزان پاشش را تأیید می‌کند.



شکل ۵: تأثیر مقدار ولتاژ سیستم بر مقدار پاشش انژکتورها

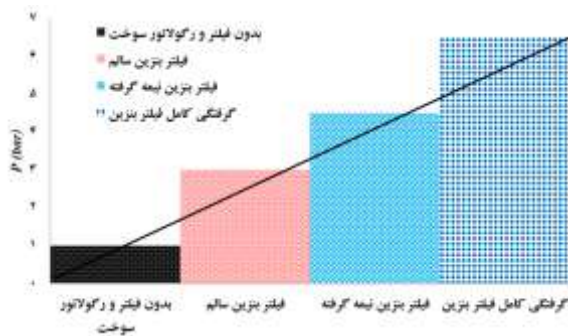
### ۳-۳- بررسی گرفتگی فیلتر

وجود ذرات معلق، گرد و غبار در سوخت، استفاده از سوخت‌های نامرغوب و غیراستاندارد، زنگ‌زدگی و رسوبات در مخزن سوخت و همچنین استفاده طولانی‌مدت از فیلتر سوخت می‌تواند باعث گرفتگی فیلتر بنزین شود. کیفی و گرفتگی فیلتر بنزین تأثیرات منفی متعددی بر عملکرد خودرو دارد که شامل کاهش بازده موتور، کثیف شدن انژکتورها، بد روشن شدن موتور، کاهش عمر مفید پمپ بنزین و سنسور اکسیژن و در بعضی موارد سوختن سوپاپ موتور می‌شود. از نشانه‌های بارز گرفتگی فیلتر بنزین می‌توان به بد روشن شدن اتومبیل خصوصاً در حالت استارت سرد و کاهش راندمان موتور اشاره کرد. معمولاً در این شرایط قدرت موتور مقدار قابل توجهی کاهش یافته و دور موتور به کندی بالا می‌رود. کاهش قدرت موتور در

سربالایی‌ها و هنگام استفاده از کولر اتومبیل کاملاً محسوس است. در بسیاری از موارد، کثیفی و خرابی فیلتر بنزین به‌عنوان عامل اصلی آلودگی و گرفتگی انژکتورها شناخته می‌شود که نتیجه آن کاهش شدید راندمان موتور و افزایش قابل توجه مصرف سوخت می‌باشد.

برای انجام آزمایش، جریان مثبت و منفی مستقیماً به پمپ بنزین اعمال می‌شود. با فعال شدن پمپ بنزین، سوخت از باک کشیده شده و تحت فشار قرار می‌گیرد. این سوخت تحت فشار ابتدا از گیج فشار عبور کرده، سپس از فیلتر سوخت گذشته و در نهایت به ریل سوخت هدایت می‌شود. در شرایطی که برق انژکتورها قطع باشد و پاششی انجام نشود، سوخت پس از عبور از رگولاتور که معمولاً برای فشار ۲/۵ تا ۳ بار تنظیم شده است، از طریق مسیر برگشت به مخزن سوخت بازگردانده می‌شود. در صورتی که رگولاتور ریل سوخت فیلتر از مسیر سوخت‌رسانی حذف گردد و فشار خروجی با راه‌اندازی پمپ مورد بررسی قرار گیرد، مشاهده خواهد شد که فشار خروجی تقریباً صفر می‌باشد، چرا که هیچ مقاومتی در برابر جریان خروجی وجود ندارد.

در این مرحله از آزمایش، ریل سوخت به همراه رگولاتور و یک فیلتر بنزین نو در مدار قرار داده شد. با روشن کردن پمپ، فشارسنج عددی بین ۴ تا ۴/۵ بار را نشان داد. سپس تعدادی فیلتر کارکرده مورد آزمایش قرار گرفتند که در این حالت، با توجه به درصد گرفتگی فیلترها، فشار اندازه‌گیری شده در محدوده ۴/۵ تا ۶/۵ بار قرار داشت. برای بررسی حداکثر میزان گرفتگی، خروجی فیلتر مسدود شد و با روشن شدن پمپ، فشارسنج عددی حدود ۷ بار را ثبت کرد. این نتایج به صورت ترسیمی در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶: بررسی گرفتگی فیلتر بنزین با استفاده از فشار پمپ

با توجه به شکل ۶ مشخص گردید که اندازه‌گیری فشار خروجی پمپ (ورودی فیلتر) می‌تواند به‌عنوان روشی جهت تشخیص گرفتگی فیلتر مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین سامانه تشخیص گرفتگی فیلتر مطابق شکل ۷ معرفی می‌گردد.

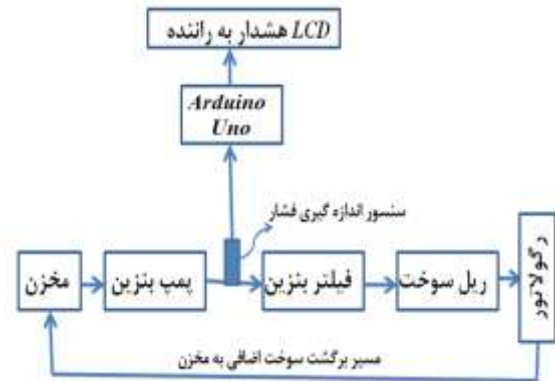
انژکتور تأثیر می‌گذارد، می‌تواند در طراحی فیلترهای بهتری که نیاز به تعویض کمتری دارند، کمک کند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

انژکتورهای کثیف می‌توانند منجر به احتراق ناقص سوخت شوند که این مسئله باعث افزایش انتشار آلودگی‌هایی مانند هیدروکربن‌ها، مونوکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن می‌شود. زمانی که انژکتورها به دلیل آلودگی‌ها به درستی عمل نمی‌کنند، موتور ممکن است برای حفظ همان سطح عملکرد به سوخت بیشتری نیاز داشته باشد که این موضوع به افزایش مصرف سوخت منجر می‌شود. یکی از عواملی که باعث افزایش آلایندگی‌ها و مصرف سوخت و کاهش قدرت موتور می‌شود، رسوب آلودگی‌ها در انژکتور خودرو است. این عامل باعث افزایش اندازه ذرات سوخت تزریقی در محفظه سیلندر و در نتیجه عدم احتراق کامل می‌شود. به منظور تحلیل تجربی تأثیر فشار سوخت و گرفتگی فیلتر بر نرخ پاشش انژکتورهای خودرو مدل آزمایشگاهی از یک دستگاه تست انژکتور طراحی و ساخته شد. آزمایش‌ها در شش فشار ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع انجام گرفت. نتایج نشان داد در حالت کلی متوسط پاشش انژکتورها با افزایش فشار افزایش می‌یابد. به طور مثال در بازه زمانی ۳۰ ثانیه با افزایش فشار از ۲۰ به ۳۰ پوند بر اینچ مربع، مقدار پاشش ۱۲ درصد و در بازه زمانی ۴۰ ثانیه با افزایش فشار از ۹۰ به ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع، مقدار پاشش ۵/۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد هرچه قدر ولتاژ سیستم زیاد باشد مقدار پاشش نیز بیشتر خواهد بود، به گونه‌ای که افزایش ولتاژ از ۶ به ۱۰ ولت در مدت زمان ۱۰ ثانیه باعث افزایش ۷ میلی‌متری سوخت پاشش شده می‌شود. همچنین بررسی‌ها حاکی از آن است که با توجه به درصد گرفتگی فیلتر، فشار سیستم عددی بین ۴/۵ تا ۶/۵ بار خواهد بود که این موضوع اهمیت توجه به وضعیت فیلتر را در عملکرد بهینه سیستم سوخت‌رسانی نشان می‌دهد.

#### ۵- منابع

- [1] Rahmatinejad, B., Rahimi Asiabaraki, H., & Azimpour Shishevan, F. (2023). Investigation of the effect of  $AL_2O_3$  nanofluid in M13NI engine cooling system. *The Journal of Engine Research*, 70(1), 47–65. doi: [10.22034/ER.2023.1975318.0](https://doi.org/10.22034/ER.2023.1975318.0) (In Persian)
- [2] Rahmatinejad, B., Rahimi Asiabaraki, H., & Azimpour Shishevan, F. (2023). Diagnosing dimensional defects and valve cracks using machine



شکل ۷: شماتیک سامانه تشخیص گرفتگی فیلتر

در این سامانه از برد آردوینو جهت پردازش اطلاعات استفاده شده که می‌تواند اطلاعات فشار خروجی پمپ را مورد ارزیابی قرار دهد. ابتدا محدوده فشارها به آردوینو معرفی می‌شود. یک فشارسنج الکترونیکی به صورت دائمی فشار خروجی پمپ را اندازه‌گیری می‌نماید. زمانی که فشار خروجی پمپ بیشتر از ۴/۵ بار شود از طریق صفحه‌ی نمایشگر موجود، اخطار نیمه گرفته شدن فیلتر به راننده داده می‌شود. بین ۴/۵ تا ۶/۵ بار اختلاف ۲ بار است که می‌توان آن را به ۴ قسمت تقسیم نمود و مطابق جدول ۱ درصد گرفتگی را به راننده اعلام کرد تا در اسرع وقت نسبت به تعویض فیلتر اقدام نماید.

جدول ۱: درصد گرفتگی فیلتر بر اساس فشار خروجی پمپ

محدوده فشار خروجی پمپ	درصد گرفتگی فیلتر بنزین
بین ۴/۵ تا ۵ بار	۲۵ درصد
بین ۵ تا ۵/۵ بار	۵۰ درصد
بین ۵/۵ تا ۶ بار	۷۵ درصد
بین ۶ تا ۶/۵ بار	۱۰۰ درصد

نتایج تحلیل تجربی تأثیر فشار سوخت و گرفتگی فیلتر بر نرخ پاشش انژکتورهای خودرو می‌تواند در صنعت خودرو به کار رود. این نتایج می‌توانند به مهندسان و طراحان کمک کنند تا به بهینه‌سازی عملکرد انژکتورها و سیستم‌های سوخت‌رسانی بپردازند. با درک تأثیرات فشار سوخت و وضعیت فیلتر بر نرخ پاشش، می‌توان سیستم‌های سوخت‌رسانی را به گونه‌ای طراحی کرد که مصرف سوخت کمتر و کارایی بیشتری داشته باشد. بهینه‌سازی پاشش سوخت می‌تواند منجر به کاهش آلایندگی‌های تولید شده توسط موتور شود که به بهبود کیفیت هوا کمک خواهد کرد. با کنترل بهتر نرخ پاشش، می‌توان عملکرد موتور را در دورهای مختلف و شرایط مختلف جاده بهینه نمود. دانستن اینکه چگونه گرفتگی فیلتر بر عملکرد

- of diesel engines in tractors. *Petroleum Science and Technology*, 41(24), 2419–2433. doi: [10.1080/10916466.2023.2230248](https://doi.org/10.1080/10916466.2023.2230248)
- [11] Dziubak, T., & Karczewski, M. (2022). Experimental study of the effect of air filter pressure drop on internal combustion engine performance. *Energies*, 15(9), 3285. doi: [10.3390/en15093285](https://doi.org/10.3390/en15093285)
- [12] Payri, R., Bracho, G., Marti-Aldaravi, P., & Viera, A. (2017). Near field visualization of diesel spray for different nozzle inclination angles in non-vaporizing conditions. *Atomization and Sprays*, 27(3).
- [13] Herfatmanesh, M. R., Lu, P., Attar, M. A., & Zhao, H. (2013). Experimental investigation into the effects of two-stage injection on fuel injection quantity, combustion and emissions in a high-speed optical common rail diesel engine. *Fuel*, 109, 137–147. doi: [10.1016/j.fuel.2013.01.013](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.013)
- [14] Wang, Z., Xu, H., Jiang, C., & Wyszynski, M. L. (2016). Experimental study on microscopic and macroscopic characteristics of diesel spray with split injection. *Fuel*, 174, 140–152. doi: [10.1016/j.fuel.2016.01.083](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.083)
- [15] Payri, R., Salvador Rubio, F. J., Bracho León, G. C., & Viera Sotillo, A. A. (2017, July). Vapor phase penetration measurements with both single and double-pass Schlieren for the same injection event. In *ILASS Europe: 28th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems* (pp. 747–754). Editorial Universitat Politècnica de València. doi: [10.4995/ILASS2017.2017.4884](https://doi.org/10.4995/ILASS2017.2017.4884)
- [16] Xue, F., Luo, F., Cui, H., Moro, A., & Zhou, L. (2017). Numerical analyses of transient flow characteristics within each nozzle hole of an asymmetric diesel injector. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 18–27. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.027](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.027)
- [17] Salvador, F. J., Jaramillo, D., Romero, J. V., & Roselló, M. D. (2017). Using a homogeneous equilibrium model for the study of the inner nozzle flow and cavitation pattern in convergent–divergent nozzles of diesel injectors. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 309, 630–641. doi: [10.1016/j.cam.2016.04.010](https://doi.org/10.1016/j.cam.2016.04.010)
- vision and acoustic emission. *Karafan Journal*, 20(3), 149–168. doi: [10.48301/KSSA.2023.391572.2501](https://doi.org/10.48301/KSSA.2023.391572.2501) (In Persian)
- [3] Sehili, Y., Cerdoun, M., Loubar, K., & Tarabet, L. (2024). Dual fuel engine injector temperature monitoring: An innovative thermal analysis approach. *Applied Thermal Engineering*, 249, 123370. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2024.123370](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123370)
- [4] Morad, M. R., & Ramezani, A. (2020). Experimental study of liquid film thickness formed by spray impingement on a solid surface. *Fuel and Combustion*, 13(2), 57–72. (In Persian)
- [5] Poormahmood, A., Ghorban Hosseini, M., Kebriaee, A., & Farshchi, M. (2016). An experimental study on the operating parameters of a simplex swirl injector. *Fuel and Combustion*, 9(1), 75–84. (In Persian)
- [6] Khodaverdian, R., Jahannama, M. R., Ramezani, A., & Kebriaee, A. (2021). Evaporation of injected oxidizer from a pressure–swirl injector in a low pressure combustion chamber. *Fuel and Combustion*, 14(1), 95–116. doi: [10.22034/JFNC.2021.250402.1248](https://doi.org/10.22034/JFNC.2021.250402.1248) (In Persian)
- [7] Rostami, E. (2021). Experimental and numerical investigation of atomization characteristics of diesel and mazut fuel injected from a pressure-swirl atomizer. *Fuel and Combustion*, 14(3), 33–58. doi: [10.22034/JFNC.2021.284326.1278](https://doi.org/10.22034/JFNC.2021.284326.1278) (In Persian)
- [8] Mueller, C. J., Nilsen, C. W., Biles, D. E., & Yraguen, B. F. (2021). Effects of fuel oxygenation and ducted fuel injection on the performance of a mixing-controlled compression-ignition optical engine with a two-orifice fuel injector. *Applications in Energy and Combustion Science*, 6, 100024. doi: [10.1016/j.jaecs.2021.100024](https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2021.100024)
- [9] Paryanto, I., Budianta, I. A., Alifia, K. C. H., Hidayatullah, I. M., Darmawan, M. A., Judistira, ..., & Gozan, M. (2022). Modelling of fuel filter clogging of B20 fuel based on the precipitate measurement and filter blocking test. *ChemEngineering*, 6(6), 84. doi: [10.3390/chemengineering6060084](https://doi.org/10.3390/chemengineering6060084)
- [10] Akal, D., & Selvi, İ. (2023). Effects of clogged air filter on power, torque, fuel consumption and emissions