

مطالعه تجربی و تحلیلی تأثیر تزریق آب در منیفولد ورودی بر آلاینده ها و عملکرد موتور جرقه ای

چکیده: یکی از موضوعات مهم در تحقیقات موتورهای احتراقی خودرو، کاهش آلاینده ها و بهبود بازده و توان است. یکی از روش های نوین در این زمینه، تزریق آب در منیفولد ورودی موتور است که می تواند هم بر آلاینده ها و هم بر عملکرد موتور تأثیرگذار باشد. در این پژوهش، تأثیر تزریق آب به صورت پودری پشت دریچه گاز بر مشخصه های عملکردی و آلاینده ها به طور تجربی بررسی شد. بدین منظور یک ستاپ آزمایشگاهی طراحی و نصب گردید تا پاشش آب در زمان ها و فواصل مشخص انجام و پارامترهای مربوطه ثبت شود. آلاینده های خروجی توسط دستگاه پنج گاز و پارامترهای موتور به وسیله دیاگ اندازه گیری شدند. نتایج نشان داد که تزریق آب موجب خنک تر شدن مخلوط سوخت و هوا، افزایش چگالی و بهبود راندمان حجمی می شود و همچنین نسبت تراکم بالاتری را امکان پذیر می سازد. این فرآیند علاوه بر کاهش دمای احتراق و جلوگیری از کوبش، باعث افزایش توان موتور نیز گردید. در مجموع، این روش در کاهش مصرف سوخت، افزایش راندمان و کاهش آلاینده های موتور مؤثر ارزیابی شد.

واژه های راهنما: تزریق آب، منیفولد ورودی، بهینه سازی مصرف، آلاینده ها، کاهش آلاینده های

امیر عساریان
دانشجوی دکتری
مهندسی مکانیک

یاسر ملائی برزی*

استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
واحد کاشان، دانشگاه آزاد اسلامی،
کاشان،
ایران

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹
بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳

Assarian Amir
PhD Student in
Mechanical Engineering

Yaser Mollaei Barzi*
Assistant Professor,
Department of Mechanical
Engineering, Kas.C, Islamic
Azad university, kashan,
Iran

Experimental and analytical study of the effect of water injection in the intake manifold on emissions and performance of a spark-ignition engine

Abstract: One of the key topics in automotive combustion engine research is the reduction of emissions alongside the improvement of efficiency and power. A modern method in this field is water injection into the intake manifold, which can influence both emissions and engine performance. In this study, the effect of water injection as a fine mist behind the throttle valve on performance characteristics and emissions was experimentally investigated. For this purpose, a laboratory setup was designed and installed to perform water injection at specific times and intervals while recording the relevant parameters. Exhaust emissions were measured using a five-gas analyzer, and engine parameters were monitored with a diagnostic device. The results indicated that water injection cooled the air-fuel mixture, increased its density, and improved volumetric efficiency, while also enabling higher compression ratios. This process, in addition to lowering combustion temperature and preventing knocking, also enhanced engine power. Overall, this method proved effective in reducing fuel consumption, increasing efficiency, and lowering engine emissions.

Keywords: Water injection, Intake manifold, Consumption optimization, Pollutants, Reducing emissions

۱- مقدمه

کرد و به آرامی از هوا به زمین رسید تا خودروها نیز از مزایای آن در دستیابی به قدرت‌های بالا بهره‌مند شوند. در اکتبر سال ۲۰۰۹ بود که شرکت خودروسازی BMW از تجهیز M4 GTS به اولین سیستم تزریق آب جوش خبر داد [۹]. حال این پروژه با همکاری کمپانی "بوش" آلمان پیشرفت‌های خوبی را تجربه کرده و جدیداً اطلاعات نسبتاً خوبی در رابطه با این پروژه منتشر شده است [۱۰]. تحقیقات کنگ و وانگ [۱۰] نشان داده‌اند که ترکیب تزریق مستقیم آب با تکنولوژی‌های پیشرفته دیگر مانند بسته شدن زود هنگام دریچه ورودی می‌تواند مسیری به سوی موتورهای احتراق داخلی هیدروژنی با انتشار صفر فراهم کند. از طرفی دیگر در پاسخ به چالش‌های زیست‌محیطی و الزامات روزافزون قوانین مربوط به کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها، تزریق آب به عنوان یکی از روش‌های مؤثر و نوین در بهبود عملکرد و کاهش آلاینده‌های موتورهای جرقه‌ای مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این روش با بهره‌گیری از گرمای نهان بالای تبخیر آب، منجر به کاهش دمای احتراق، جلوگیری از پدیده کوبش، کاهش نیاز به غنی‌سازی سوخت و در نتیجه کاهش انتشار آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای نیتروژن می‌شود [۱۱]. اگرچه روش تزریق مستقیم آب به دلیل مزایای کنترلی بیشتر و مصرف آب کمتر، عملکرد بهتری در کاهش کوبش نشان داده است؛ اما پیچیدگی فنی و هزینه‌های بالاتر آن، استفاده از تزریق آب در منیفولد ورودی (پورت) را به گزینه‌ای عملی‌تر و اقتصادی‌تر برای به‌کارگیری در موتورهای تولید انبوه تبدیل کرده است [۱۲]. مطالعات تجربی متعدد نیز نشان داده‌اند که تزریق آب در پورت می‌تواند بدون نیاز به تغییرات عمده در ساختار موتور، بهبود معناداری در راندمان حرارتی، کاهش مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌ها به‌ویژه در شرایط بار بالا و سرعت متوسط تا زیاد موتور ایجاد کند [۱۳].

موضوع اصلی تحقیق حاضر بررسی تجربی و تحلیلی تأثیر تزریق آب در منیفولد ورودی بر آلاینده‌ها و عملکرد موتور جرقه‌ای خودرو پراید BE3^۲ است. آنچه در این مطالعه مدنظر است، تست و تحلیل تأثیرات کمی پاشش مقادیر کم آب روی عملکرد یک موتور بومی و در حال استفاده روی خودروهای داخلی با توسعه ستاپ تست و در نهایت تحلیل و ارزیابی تأثیر کمی تزریق آب روی برخی پارامترهای مورد نظر خروجی از جمله کنترل ضربه (Nock) و آلاینده‌های HC و NOx و همچنین تعیین محدوده و دبی مورد نیاز آب برای کارکرد مناسب و ضمناً بررسی نحوه اعمال، اجرا و کنترل چنین

انرژی از مهم‌ترین عوامل ضروری برای توسعه هر کشوری محسوب می‌شود و از طرف دیگر، مصرف سوخت‌های فسیلی به کاهش و در نهایت اتمام منابع و ذخایر آن‌ها منجر خواهد شد [۱]. همچنین مصرف انواع حامل‌های انرژی، به‌ویژه سوخت‌های فسیلی، مهم‌ترین عامل آلودگی هوا و تغییرات آب و هوایی به شمار می‌آید [۲]. به همین دلیل، استفاده بهینه از انرژی در فرآیند توسعه اقتصادی همواره به‌عنوان یک هدف مهم در توسعه پایدار مورد توجه بوده است [۳]. مهم‌ترین فایده تزریق آب داخل منیفولد ورودی موتور، خنک کردن مخلوط سوخت و هوا است که در نتیجه چگالی مخلوط بالا می‌رود و راندمان حجمی موتور بهبود می‌یابد و نسبت تراکم بالاتری در موتور ایجاد خواهد شد [۴]. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که تزریق آب در موتورهای احتراق داخلی یکی از تکنولوژی‌های امیدوارکننده برای کاهش دمای داخل سیلندر، کنترل ناک و کاهش آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن است [۵]. تزریق آب به‌طور غیرمستقیم هم چگالی هوا را بالا برده و هم قدرت موتور را افزایش می‌دهد. اصلی‌ترین اتفاقی که در این سیستم می‌افتد این است که آب باعث کاهش چشمگیر دمای احتراق شده و موجب می‌شود مخلوطی متراکم‌تر از سوخت و هوا بدون کوبش‌های ناگهانی ناشی از انفجار زود هنگام، به داخل محفظه احتراق وارد شود و بهینه‌گی در مصرف، افزایش راندمان و کاهش آلاینده‌گی را به دنبال دارد [۶]. این تراکم بالا و کاهش دما، علاوه بر کاهش مصرف سوخت در حدود ۱۳ درصد، افزایش توان و کاهش آلاینده‌گی به میزان ۳ درصد را نیز به همراه دارد [۷]. مطالعات تجربی اخیر ژانگ و همکاران [۸] نشان داده‌اند که تزریق آب در پورت ورودی موتورهای تزریق مستقیم بنزین (جی‌دی‌آی) می‌تواند به‌طور مؤثری ناک موتور را کنترل کرده و آلاینده‌های NOx^۱ را تا حد قابل توجهی کاهش دهد، هرچند که ممکن است باعث افزایش جزئی در آلاینده‌های هیدروکربنی نسوخته شود. بیش از نیم قرن از ایده اصلی تزریق آب در موتورهای درون‌سوز و ابداع آن برای بهبود عملکرد می‌گذرد. در جنگ جهانی دوم، هواپیماهای آلمانی با استفاده از پیشرانده‌های بامو و دایملر توانستند سریع‌تر پرواز کنند و به ارتفاع بالاتری بروند؛ پیشرانده‌هایی که در کنار تکنولوژی‌های مختلف از سیستم تزریق آب و اتانول بهره می‌بردند. هرچند آلمان‌ها در جنگ جهانی دوم شکست خوردند، اما این ایده به سرعت در سایر کشورها نیز طرفداران زیادی پیدا

اکسیدهای نیتروژن: NOx^۱موتور خودرو پراید: BE3^۲

شعله در طول فرآیند احتراق است. حرکت چرخشی هوای ورودی به موتور را با استفاده از شکل دادن و فرم دادن به منیفولد ورودی و شکل پیستون می‌توان انجام داد. حرکت چرخشی باعث احتراق سریع سوخت در موتور اشتعال جرقه‌ای و در موتورهای بنزین-سوز تزریق مستقیم باعث افزایش سرعت مخلوط سوخت و هوا می‌شود و حرکت چرخشی جریان سوخت باعث افزایش سرعت مخلوط شدن سوخت و هوا در موتور اشتعال تراکمی می‌شود. عوامل تأثیرگذار در طراحی منیفولد بر چرخش هوای ورودی شامل شکل پلنوم و طول اولیه و طول ثانویه قطر پورت ورودی به موتور می‌باشد. هسو و همکاران [۱۷] با بررسی بر تأثیر تزریق بخار آب بر عملکرد و مشخصات آلایندگی موتور احتراق جرقه‌ای نشان داد که ترکیب تزریق بخار آب و سیستم پلاسمای غیر حرارتی روی منیفولد ورودی موتورهای اشتعال جرقه‌ای، با بهبود اختلاط هوا و سوخت، باعث کاهش آلاینده‌هایی مانند هیدروکربن و اکسیدهای نیتروژن و افزایش گشتاور موتور می‌شود و می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش آلودگی و بهبود عملکرد موتور باشد.

۲- آماده‌سازی تجهیزات و تست تجربی

۲-۱- تجهیزات مورد نیاز ساخت تزریق آب درون مانیفولد هوا

تجهیزات آماده سازی شده در آزمایشگاه که برای انجام تست‌های تجربی روی موتور نصب شدند به شرح زیر می‌باشد:

۱. مخزن آب
۲. پمپ آب
۳. شیلنگ‌های انتقال و برگشت
۴. رگلاتور
۵. گیت تنظیم زمان پاشش
۶. انژکتور پاشش آب
۷. محفظه نگهدارنده انژکتور آب
۸. آب مقطر

۲-۲- تجهیزات اندازه‌گیری و آزمایش

دستگاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای مورد نظر که در این مطالعه بکار رفته است شامل موارد ذیل است:

- ۱- دستگاه تست پنج گاز
- ۲- دستگاه دبی سنج هوا (سرعت سنج)
- ۳- دستگاه دیاگ

سیستمی روی موتور می‌باشد. نتایج کمی و کیفی این مطالعه می‌تواند در طراحی و اجرای سیستم تزریق آب در موتور خودروها با هدف کنترل آلاینده NO_x ، کاهش مؤثر پدیده ضربه در موتور حتی با بنزین بی کیفیت (با اکتان پایین‌تر) و همچنین بهبود راندمان حجمی موتور (در اثر کاهش دمای مخلوط ورودی و متعاقباً افزایش چگالی آن) استفاده شود.

تحقیقات اخیر در زمینه تزریق آب در موتورهای احتراق داخلی نشان‌دهنده پتانسیل بالای این تکنولوژی در بهبود عملکرد و کاهش آلاینده‌ها است. فراتیتا [۵] در مطالعه جامع خود نشان داد که تزریق آب در شرایط بار متوسط و پایین نیز مؤثر بوده و می‌تواند مصرف سوخت را تا ۱۴٪ کاهش دهد. همچنین ژانگ و همکاران [۸] در تحقیقات تجربی بر روی موتورهای جی‌دی‌آی ثابت کردند که تزریق آب در پورت ورودی به‌طور مؤثر ناک موتور را کنترل کرده، فشار اوج احتراق را کاهش داده و آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن را به دلیل کاهش دمای احتراق تا حد قابل‌توجهی کم می‌کند. کاربردهای پیشرفته‌تر تزریق آب در موتورهای نوین نیز مورد بررسی قرار گرفته است. کنگ و وانگ [۱۰] نشان دادند که ترکیب تزریق مستقیم آب با تکنولوژی‌های پیشرفته دیگر می‌تواند مسیری به سوی موتورهای هیدروژنی با انتشار صفر فراهم کند، با نرخ تزریق آب بهینه حدود ۲،۵ کیلوگرم بر ساعت شین و سانگ [۱۴] در بررسی موتورهای شش‌ضربه‌ای دریافتند که تزریق مستقیم آب می‌تواند راندمان حرارتی را ۲،۷ تا ۳،۵ درصد بهبود بخشد و نرخ افزایش فشار را ۲۳،۱ تا ۶۵،۲ درصد کاهش دهد. تحقیقات آینده‌نگرانه دو [۱۵] بر روی موتورهای تزریق مستقیم هیدروژن نشان داد که کنترل دقیق پارامترهای تزریق برای دستیابی به احتراق فوق‌العاده رقیق ($\lambda > 2.8$) ضروری است و فشار بهینه تزریق ۵ مگاپاسکال در طیف وسیعی از شرایط بار مناسب است. این مطالعات به‌طور کلی تأیید می‌کنند که تزریق آب قابلیت کاهش آلاینده‌های NO_x تا ۸۸٪ بهبود کنترل ناک، افزایش راندمان حرارتی و سازگاری با سوخت‌های جایگزین را دارد. بر این اساس، تحقیق حاضر به بررسی تجربی تأثیر تزریق آب در منیفولد ورودی بر آلاینده‌ها و عملکرد موتور جرقه‌ای خودرو سواری پراید می‌پردازد. امیری و همکاران [۱۶] در بررسی‌های خود در زمینه تحلیل عددی اثر طرح منیفولد بر چرخش جریان هوای ورودی در موتور اشتعال جرقه‌ای بیان داشتند که به‌طور کلی چرخش جریان هوای ورودی به موتور حرکت چرخشی جرم سیال است که از طریق منیفولد ورودی وارد موتور می‌گردد. این حرکت چرخشی باعث افزایش سرعت مخلوط سوخت و هوا در یک مدت زمان کوتاه است. حرکت چرخشی مکانیزم اصلی برای گسترش بسیار سریع سر

فرآیند آزمایش به این صورت بود که ابتدا موتور بدون تزریق آب تست شد تا (داده‌های پایه) ثبت شود. سپس سیستم تزریق آب فعال شد و آزمایش‌ها در دورهای مختلف موتور (۹۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ دور در دقیقه) و با نرخ‌های مختلف تزریق آب انجام گرفت. داده‌های مربوط به آلاینده‌ها و عملکرد موتور با استفاده از دستگاه‌های تست پنج گاز و دیاگ جمع‌آوری شد. هدف از انتخاب این محدوده دور موتور انجام تحلیل در حالت کارکرد در جای خودرو (دور آرام) و ضمناً دورهای دنده‌های اصطلاحاً سنگین برای بررسی عملکرد موتور تحت بار در دورهای تا ۲۰۰۰ rpm بوده است. برای اطمینان از دقت نتایج، هر آزمایش سه بار تکرار شد و میانگین داده‌ها ثبت گردید. برای اندازه‌گیری مطابق شکل (۱) دقت اندازه‌گیری دستگاه پنج گاز $\pm 5\%$ درصد، برای اندازه‌گیری دبی هوای ورودی مطابق شکل (۳) دستگاه دبی‌سنج هوا $\pm 2\%$ درصد و دستگاه دیاگ $\pm 1\%$ درصد می‌باشد. خطاهای احتمالی شامل تغییرات دمای محیط، فشار جوی و شرایط آب‌وهوایی در نظر گرفته شده و برای کاهش این خطاها، تمامی آزمایش‌ها در شرایط یکسان و در یک روز انجام شد.



شکل ۳ دستگاه دبی سنج هوای منیفولد ورودی

هدف از انتخاب این محدوده دور موتور انجام تحلیل در حالت کارکرد در جای خودرو (دور آرام) و ضمناً دورهای دنده‌های اصطلاحاً سنگین برای بررسی عملکرد موتور تحت بار در دورهای تا ۲۰۰۰ rpm بوده است.

۳- روابط ریاضی و محاسبات

روابط ریاضی مورد استفاده در این تحقیق برای محاسبه دبی پاشش آب، نسبت رطوبت و رطوبت نسبی هوای ورودی به کار می‌روند. این روابط جهت تعیین مقدار بهینه آب پاشش شده و تأثیر آن بر عملکرد موتور و کاهش آلاینده‌ها استفاده می‌شوند [۱۸].



شکل ۱ دستگاه تست پنج گاز جهت اندازه‌گیری پارامترها

در این تحقیق از موتور خودرو پراید BE3 استفاده شده است.

این موتور دارای مشخصات زیر می‌باشد.

- حجم جابجایی: ۱۳۰۰ سی‌سی
- تعداد سیلندر: ۴ سیلندر
- نوع سوخت‌رسانی: انژکتوری
- قدرت: ۶۳ اسب بخار در ۵۰۰۰ دور در دقیقه
- گشتاور: ۱۱۵ نیوتن متر در ۲۵۰۰ دور در دقیقه

برای نصب سیستم تزریق آب، ابتدا انژکتور آب در محفظه‌ای پشت دریچه گاز و قبل از ورود به منیفولد موتور قرار گرفت و دستگاه دبی سنج هوای منیفولد ورودی مطابق شکل (۳) در ورودی منیفولد برای اندازه‌گیری دبی هوای ورودی نصب و سپس مخزن آب، پمپ الکتریکی و سیستم کنترل زمان پاشش بر روی موتور نصب شد.



شکل ۲ محل نصب انژکتور در پشت دریچه گاز

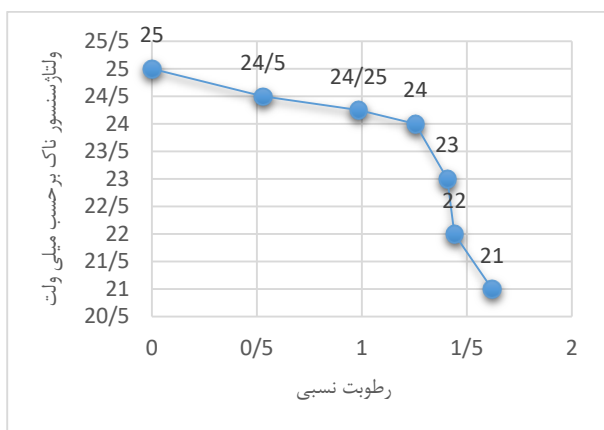
پمپ الکتریکی آب با فشار ۲ بار عمل می‌کند و زمان پاشش توسط واحد کنترل الکترونیکی (ECU^۱) تنظیم می‌شود و در محل نصب شده در پشت دریچه گاز مطابق با شکل (۲) پاشش می‌کند. برای هر آزمایش، موتور ابتدا تا دمای کاری (۸۰-۹۰ درجه سانتی‌گراد) گرم شده و سپس اندازه‌گیری‌ها انجام شد.

^۱ واحد کنترل الکترونیکی: ECU

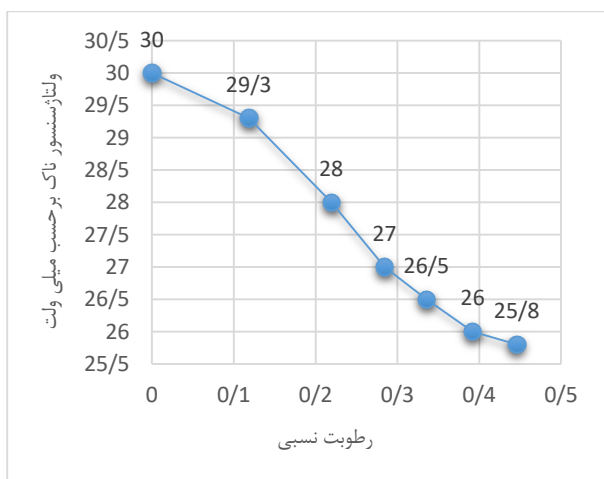
۴- نتایج

در این بخش، شکل‌های بدست آمده از داده‌های ثبت شده توسط دستگاه دیاگ و دستگاه پنج گاز، همراه با محاسبه نسبت رطوبت، رطوبت نسبی، دبی هوا و دبی آب، مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکل‌های (۴) تا (۷) نشان‌دهنده ولتاژ سنسور ضربه موتور بر حسب رطوبت نسبی است.

سنسور ضربه بین سیلندر ۲ و ۳ قرار گرفته و ضربات ناشی از خودسوزی بنزین را به واحد کنترل الکترونیکی گزارش می‌دهد. تزریق آب باعث افزایش رطوبت نسبی شده و با بالا رفتن رطوبت، ولتاژ تولیدی سنسور ضربه کاهش می‌یابد و میزان ضربه‌زنی سیلندر کم می‌گردد. این امر به دلیل کاهش دمای احتراق و جلوگیری از خودسوزی زودهنگام سوخت است که منجر به کاهش پدیده کوبش می‌شود. به این ترتیب نیاز به استفاده از بنزین با عدد اکتان بالا کاهش می‌یابد.



شکل ۴ میزان ضربه موتور بر حسب رطوبت نسبی در ۹۰۰ دور در دقیقه (دور آرام)



شکل ۵ ضربه موتور بر حسب رطوبت نسبی در ۲۰۰۰ دور در دقیقه

برای به دست آوردن دبی آب پاشش شده در مانیفولد، ابتدا انژکتور پاشش آب را درون ظرف مدرجی قرار داده و زمان و فاصله زمانی پاشش را و همچنین حجم آب به دست آمده را یادداشت نموده و از این رابطه می‌توان در زمان‌های مختلف دبی پاشش آب را محاسبه کرد [۱۹].

$$(1) \quad \text{دبی پاشش آب} = (1.724 \times 10^{-6}) \times (\text{زمان باز بودن}) / (\text{فاصله زمانی پاشش}) + (\text{زمان باز بودن}) / 1000$$

برای محاسبه دبی آزمایش انجام شده در ۱۱۶ ثانیه، ۲۰۰ سی‌سی پاشش دارد که از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$(2) \quad \text{دبی} = 200/116 = 1.724 \times 10^{-6}$$

همچنین نسبت رطوبت هوای ورودی موتور را می‌توان از رابطه دبی حجمی آب و سرعت هوای ورودی موتور بصورت زیر محاسبه کرد.

$$(3) \quad \begin{aligned} \text{دبی حجمی آب} &= m_{\dot{w}} / \rho_{\dot{w}} \\ \text{دبی حجمی آب} &= [3.73 \times 10^{-3}] \omega V \\ \rho_{\dot{w}} &= 1.127 \\ \rho_{\dot{w}} &= 1000 \\ A &= [3.14d]^2 / 4 \\ d &= 0.065 \\ m_{\dot{w}} &= \rho v A \end{aligned}$$

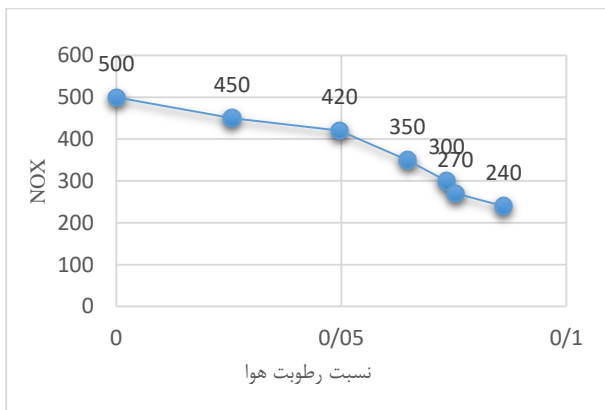
حال می‌توان با فرض دمای هوای ورودی ۴۰ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی را با رابطه زیر بدست آورد.

$$(4) \quad \begin{aligned} \varphi &= \omega P / (P_g (\omega + 0.622)) \\ T &= 40 \\ P_g &= 7.5 \\ P &= 100 \\ \varphi &= 100\omega / 7.5(\omega + 0.622) \end{aligned}$$

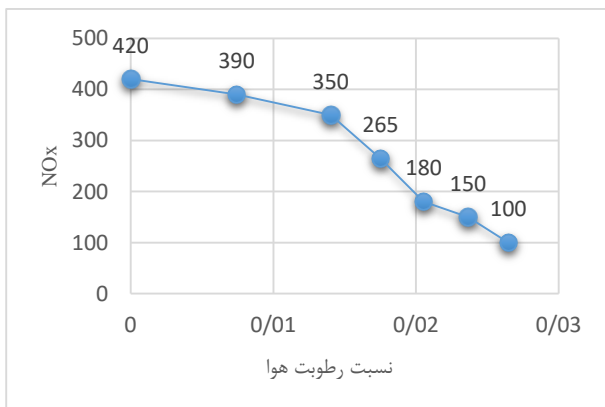
متغیرهای ورودی ثابت شامل دمای موتور (۸۰-۹۰ درجه سانتی‌گراد)، فشار جوی (۱ بار) و متغیرهای ورودی متغیر شامل دور موتور (۹۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ دور در دقیقه) و مقدار آب پاشش شده می‌باشند. خروجی‌های اندازه‌گیری شده شامل غلظت آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن و ولتاژ سنسور ضربه موتور می‌باشند.

باعث یکنواخت‌تر شدن توزیع دما در محفظه احتراق شده و از تشکیل مناطق سرد که منجر به احتراق ناقص هیدروکربن‌ها می‌شوند، جلوگیری می‌کند. همچنین کاهش دمای مخلوط ورودی منجر به افزایش چگالی و در نتیجه بهبود راندمان حجمی موتور می‌شود که احتراق کامل‌تری را فراهم می‌آورد. همچنین هیدروکربن‌های نسوخته عمدتاً ناشی از «احتراق ناقص» هستند که در مناطق سرد سیلندر و نیز به دلیل اختلاط ناکافی سوخت و هوا رخ می‌دهد. افزایش چگالی مخلوط (در اثر خنک‌شدن) و حضور بخار آب، پایداری جریان و کیفیت اختلاط را ارتقا می‌دهد. بخار آب با افزایش ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط، باعث توزیع یکنواخت‌تر حرارت در محفظه احتراق می‌شود. این امر منجر به کاهش یا حذف مناطق سرد عامل خاموش شدن شعله و احتراق جزئی می‌گردد.

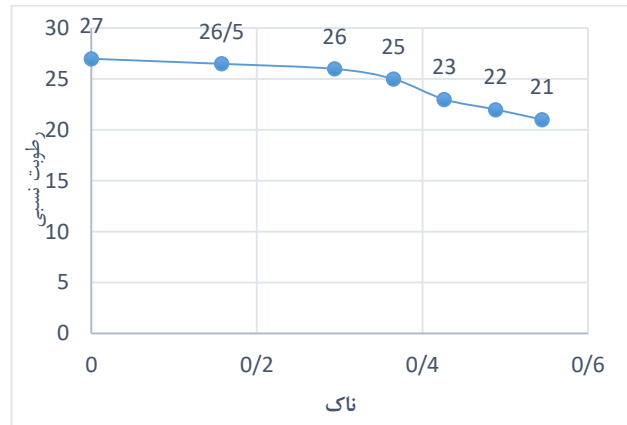
در شرایط بهبودیافته اختلاط و توزیع دما، احتراق کامل‌تر رخ داده و سهم هیدروکربن‌های نسوخته در گازهای خروجی کاهش می‌یابد. روند این کاهش به‌طور تجربی در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) ثبت شده است.



شکل ۷ اکسیدهای نیتروژن برحسب نسبت رطوبت در ۹۰۰ دور در دقیقه (دور آرام)



شکل ۸ اکسیدهای نیتروژن برحسب نسبت رطوبت در ۱۵۰۰ دور در دقیقه



شکل ۶ ضربه موتور برحسب رطوبت نسبی در ۱۵۰۰ دور در دقیقه

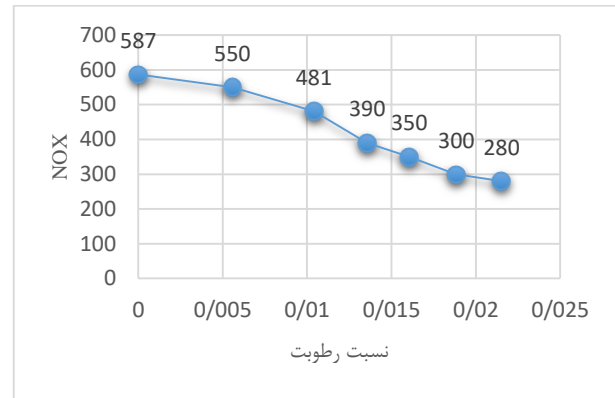
شکل‌های (۷) تا (۹) نسبت رطوبت را با اکسیدهای نیتروژن نشان می‌دهد. اکسیدهای نیتروژن بیشتر از دمای بالا در محفظه احتراق بوجود می‌آید. همانطور که مشاهده می‌شود هرچه تزریق آب به موتور بیشتر باشد نسبت رطوبت بیشتر شده و دمای محفظه احتراق کم می‌گردد و اکسیدهای نیتروژن کم می‌شود. این پدیده به دلیل اثر خنک‌کنندگی آب در طول فرآیند احتراق است که دمای اوج احتراق را کاهش داده و از تشکیل اکسیدهای نیتروژن که نیازمند دمای بالا هستند، جلوگیری می‌کند. همچنین حضور بخار آب در مخلوط هوا و سوخت، گرمای ویژه مخلوط را افزایش داده و منجر به کاهش بیشتر دمای احتراق می‌شود.

تشکیل NOx در موتورهای احتراق جرقه‌ای عمدتاً از طریق دمای بالای احتراق و واکنش شیمیایی صورت می‌گیرد. نرخ این واکنش‌های شیمیایی وابستگی نمایی شدیدی به دمای احتراق دارد. تزریق آب با استفاده از گرمای نهان تبخیر بالا به‌عنوان یک سیال خنک‌کننده داخلی عمل می‌کند. این فرآیند منجر به کاهش مؤثر دمای پیک احتراق و قابل‌اندازه‌گیری در سیلندر می‌شود. با کاهش دما، نرخ سرعت واکنش‌های تشکیل NOx به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. بنابراین، کاهش غلظت NOx در گازهای خروجی، پیامد مستقیم و قابل‌پیش‌بینی خنک‌کاری مخلوط درون سیلندر است. این ارتباط علی بین «کاهش دما» و «کاهش NOx» در شکل‌های (۷) تا (۹) به وضوح نمایش داده شده است.

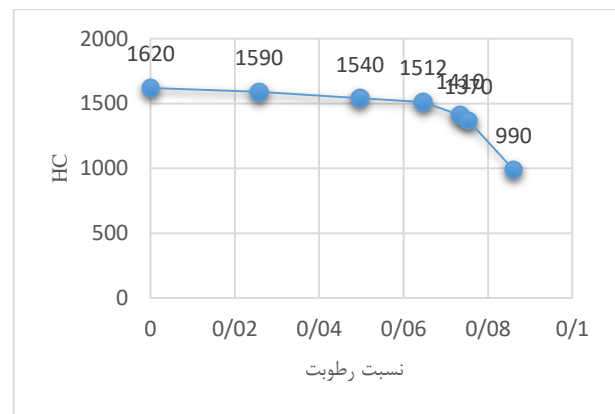
همانطور که در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) مشاهده می‌شود هیدروکربن نسوخته با افزایش رطوبت زنی به هوای ورودی (نسبت رطوبت هوا) در دوره‌های مختلف موتور به دلیل احتراق کامل‌تر کاهش می‌یابد. احتراق کامل‌تر با افزایش رطوبت مخلوط ورودی می‌تواند ناشی از افزایش چگالی مخلوط هوا و سوخت و همچنین بهبود اختلاط آن‌ها در حضور بخار آب باشد. بخار آب

۵- نتیجه گیری

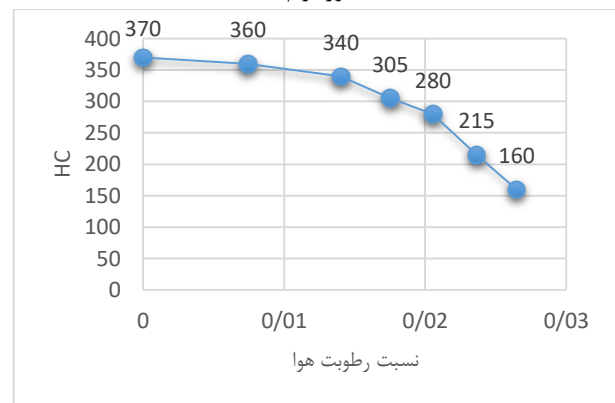
در این پژوهش، تأثیر تزریق آب در مینیفولد ورودی بر عملکرد و آلاینده‌های موتور جرقه‌ای پراید BE3 به صورت تجربی بررسی شد. تزریق آب به طور مؤثری منجر به کاهش پدیده کوبش (ناک) می‌شود. با افزایش رطوبت نسبی ناشی از تزریق آب، ولتاژ خروجی سنسور ناک به طور میانگین ۱۵ تا ۲۵ درصد کاهش یافت که نشان دهنده کاهش قابل توجه ضربه زنی در سیلندر است. همچنین تزریق آب باعث کاهش چشمگیر آلاینده NOx می‌گردد. در دوره‌های ۹۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، به ترتیب کاهشی معادل ۲۲، ۳۵ و ۴۰ درصد در انتشار NOx مشاهده شد. این کاهش مستقیماً با افزایش نسبت رطوبت و کاهش دمای احتراق مرتبط است. انتشار هیدروکربن‌های نسوخته (HC) نیز تحت تأثیر تزریق آب قرار گرفت و کاهشی در محدوده ۱۰ تا ۱۸ درصد در دوره‌های مختلف ثبت شد. این بهبود ناشی از احتراق کامل‌تر در اثر افزایش چگالی مخلوط و توزیع بهتر دما است. تأثیر تزریق آب در دوره‌های بالاتر موتور (۲۰۰۰ دور بر دقیقه) بر کاهش NOx و HC مشهودتر بود، در حالی که اثر آن بر کنترل ناک در دوره‌های پایین‌تر (۹۰۰ دور بر دقیقه) نیز قابل توجه بود. در این مقاله بیشتر تمرکز روی بررسی کمی تأثیر تزریق مقادیری آب در موتور روی پدیده ضربه (که معضلی جدی با بنزین کم کیفیت فعلی می‌باشد) می‌باشد. و در ضمن تأثیرات تزریق آب بر برخی آلاینده‌های موتور به عنوان تأثیرات جانبی بوده است. اما با توجه به زیرساخت و ستاپ ایجاد شده در آزمایشگاه، اندازه‌گیری و تحلیل اثرات تزریق آب روی پارامترهای دیگر موتور از جمله راندمان موتور، میزان دود آگروز، میزان مصرف سوخت، میزان آلاینده‌های منواکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن در حد امکانات موجود با تجهیز سیستم‌ها و سنسورهای اندازه‌گیری لازم در دست انجام می‌باشد. تزریق آب باعث افزایش توان موتور نمی‌شود بلکه عمدتاً تأثیر آن بر کاهش دمای احتراق، کاهش پدیده ناک و بهبود کارایی موتور است و تزریق آب نه تنها آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد بلکه باعث بهبود راندمان و کاهش مصرف سوخت نیز می‌شود. استفاده از آب در سیلندر نیازمند بررسی دقیق‌تر در شرایط مختلف سرعت موتور و بار است. این سیستم می‌تواند به طور چشمگیری آلاینده‌ها، به ویژه اکسیدهای نیتروژن را کاهش دهد و همچنین میزان آلاینده‌های دیگر از جمله هیدروکربن، مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن را کاهش دهد. به عنوان پیشنهاد برای کارهای آینده، اندازه‌گیری و تحلیل پارامترهای مهم دیگری مانند راندمان حرارتی موتور، دمای گازهای خروجی،



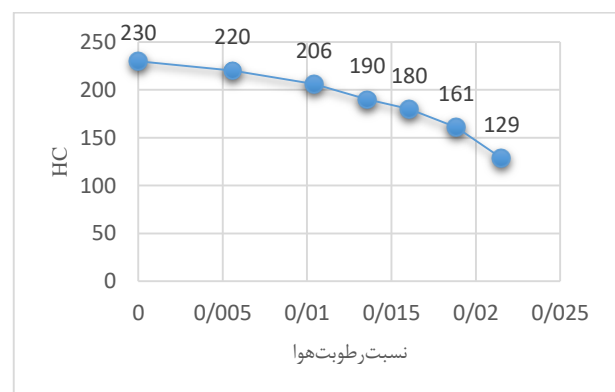
شکل ۹ اکسیدهای نیتروژن برحسب نسبت رطوبت در ۲۰۰۰ دور در دقیقه



شکل ۱۰ هیدروکربن برحسب نسبت رطوبت در ۹۰۰ دور در دقیقه (دور آرام)



شکل ۱۱ هیدروکربن برحسب نسبت رطوبت در ۱۵۰۰ دور در دقیقه



شکل ۱۲ هیدروکربن برحسب نسبت رطوبت در ۲۰۰۰ دور در دقیقه

- [2] R. Abbaspour, M. Yadegari, and A. Bak Khoshnevis, "Effect of airfoil's attack angle and airfoil-cylinder configuration on turbulence parameters and airfoil's Aerodynamic Efficiency," *Energy sci eng*, 2025. <https://doi.org/10.1002/ese3.70250Digital>.
- [3] M. Yadegari and M. Ghassemi, "Investigation of the effects of temperature, mass flow rate of the injected fuel, pore diameter, porosity and ambient pressure on the amount of pollutants in the combustion chamber" *Iranian J Mechanical Eng Trans ISME*, vol. 23, no. 1, pp. 122-146, 2022. <https://doi.org/10.30506/jmee.2022.547922.1282>.
- [4] I. E. Agency, I. I. Administration, Ed. *International Energy Agency (IEA) World Energy Outlook 2022*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.10.023>.
- [5] M. Frățița, *Assessment of Water Injection on Internal Combustion Engines Performances*. Galați University Press, 2023. <http://arthra.ugal.ro/handle/123456789/10841>.
- [6] M. Fratita, F. Popescu, J. Martins, F. Brito, T. Costa, and I. Ion, "Water injection in spark ignition engines—Impact on engine cycle," *Ener Rep*, vol. 7, pp. 374–379, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.113>.
- [7] S. Mishra and J. Mallikarjuna, "Effect of direct Water injection on combustion and performance of Homogeneous charge compression ignition engine—A computational fluid dynamics analysis," *Int J Eng*, vol. 14, no. 1, pp. 59-80, 2021. <https://doi.org/10.4271/03-14-01-0005>.
- [8] Q. Zhang, Z. Huang, L. Wang, G. Lin, and J. Pan, "Experimental study of port water injection on GDI engine fuel economics and emissions," *ACS omega*, vol. 9, no. 8, pp. 8893-8903, 2024. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06859>.
- [9] R. Novella, J. Pastor, J. Gomez-Soriano, and J. S. Bayona, "Challenges and directions of using ammonia as an alternative fuel for internal combustion engines," 2023. <https://doi.org/10.4271/2023-01-0324>.
- [10] X. Kong and Y. Wang, "Applications of oxyhydrogen, direct water injection, and early-intake valve closure technologies on a petrol spark ignition engine—A path towards Zero-emission hydrogen internal combustion engines," *Energies*, vol. 17, no. 9, p. 2014, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17092014>.
- [11] A. Li, Z. Zheng, and T. Peng, "Effect of water injection on the knock, combustion, and emissions of a direct injection gasoline engine," *Fuel*, vol. 268, p. 117376, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117376>.

مصرف سوخت ویژه و نیز بررسی اثر تزریق آب بر آلاینده CO و CO₂ توصیه می‌شود. این مطالعات تکمیلی می‌تواند با تجهیز ستاپ آزمایشگاهی به سنسورهای مورد نیاز با دقت بالا محقق گردد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

| | |
|-----------------|--|
| A | مساحت روزنه (m ²) |
| CO ₂ | دی‌اکسید کربن |
| D | قطر روزنه (m) |
| HC | هیدروکربن‌ها (kg or mol) |
| knock | کوبش موتور |
| M_AIR | دبی جرمی هوا (kg/s) |
| m_w | دبی جرمی آب (kg/s) |
| M4 | یک مدل خودرو تولید شده توسط شرکت خودروسازی |
| GTS | BMW |
| NOx | اکسیدهای نیتروژن (kg or mol) |
| P | فشار (pa) |
| Pg | فشار اشباع (Pa) |
| T | دما (°C) |
| V | سرعت ($\frac{m}{s}$) |
| W | توان دمنده (kw) |
| علائم یونانی | |
| ρ_{air} | چگالی هوا ($\frac{kg}{m^3}$) |
| ρ_w | چگالی آب ($\frac{kg}{m^3}$) |
| Φ | رطوبت نسبی |
| ω | نسبت رطوبت |

۷- تشکر و قدردانی

از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کاشان، کارگاه موتورهای احتراق داخلی و سایر بخش‌هایی که با فراهم آوردن امکانات آزمایشگاهی و علمی ما را در انجام این پژوهش همراهی کردند، تقدیر می‌کنیم.

۸- مراجع

- [1] R. Abbaspour, M. Yadegari, A. Bak Khoshnevis, and D. H. ", "Optimization of horizontal spacing in cylinder-NACA0012 airfoil configuration in the Sharrow propeller using entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm," *J Marine SciTechnol*, pp. 1-30, 2025. <https://doi.org/10.1007/s00773-025-01097-5>.

- [16] H. Amiri and J. Ghafari, "Numerical analysis of the effect of manifold design on the rotation of incoming airflow in spark ignition engines," presented at the 1st National Conference on New Technologies in Mechanical Engineering and Structures, 2022. <https://civilica.com/doc/1505520>.
- [17] M.-H. Hsueh, "Effect of water vapor injection on the performance and emissions characteristics of a spark-ignition engine," *Sustainability*, vol. 13, no. 16, p. 9229, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13169229>.
- [18] P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2020. ISBN 13 978-0470-50197-9. https://madar-ju.com/storage/images/files/file_1738891122cRBDf.pdf.
- [19] G. J. Van Wylen, R. E. Sonntag, and C. Borgnakke, *Fundamentals of Thermodynamics*. Hoboken, NJ, USA: : John Wiley & Sons, 2022. ISBN-13 978-0-470-04192-5. <https://edu.ubonab.ac.ir/Uploads/User/175/files/Thermodynamics.pdf>.
- [12] S. Zhu *et al.*, "A review of water injection applied on the internal combustion engine," *Ene conversion manag.*, vol. 184, pp. 139–158, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.042>.
- [13] Y. Fan, T. Wu, D. Xiao, H. Xu, X. Li, and M. Xu, "Effect of port water injection on the characteristics of combustion and emissions in a spark ignition direct injection engine," *Fuel*, vol. 283, p. 119271, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119271>.
- [14] W. J. Shin and H. H. Song, "Effects of water direct injection on a combustion phase and performance of six-stroke gasoline homogeneous charge compression ignition engine," *Fuel*, vol. 356, p. 129564, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129564>.
- [15] J. Du, "Effects of Injection Timing and pressure on combustion performance and emissions in hydrogen direct injection engine," *SAE Technical Paper*, pp. 0148-7191, 2025. <https://doi.org/10.4271/2025-01-8421>.