

شبیه‌سازی و بررسی تاثیر عامل‌های متفاوت بر جریان‌های یونی حاصل از احتراق در موتورهای اشتعال جرقه‌ای

امیرحسین شامخی*⁺، علی غفاری

تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک، صندوق پستی ۱۲۷۶۵-۳۳۸۱

چکیده: استفاده از جریان‌های یونی حاصل از احتراق، یکی از جدیدترین شیوه‌های مورد استفاده در سیستم‌های مدیریت موتور است، به گونه‌ای که امروزه از این سیگنال در موتورهای احتراق داخلی برای کنترل عامل‌هایی مانند نسبت هوا به سوخت، آوانس جرقه، کوبش، احتراق ناقص و ... استفاده می‌شود. از این رو بررسی عامل‌های موثر بر این سیگنال با اهمیت است چرا که ضعف سیگنال باعث ضعف آشکارسازی و در نتیجه عدم استفاده بهینه از سیگنال می‌شود. در این مقاله عامل‌های موثر بر جریان‌های یونی حاصل از احتراق در موتورهای اشتعال جرقه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. عامل‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند از جمله عامل‌هایی هستند که بر پارامترهای عملکردی موتور تاثیر گذارند. عامل‌هایی مانند: دما، نسبت هوا به سوخت، نوع سوخت، بار موتور، بازخورانی محصولات احتراق (EGR)، رطوبت هوا، رسوب‌گیری و فرسودگی شمع.

واژه‌های کلیدی: احتراق، جریان یونی، رطوبت هوا، شبیه‌سازی، موتورهای اشتعال جرقه‌ای، نسبت هوا به سوخت، نوع سوخت.

KEY WORDS: Combustion, Ion current, Humidity, Simulation, SI engines, Air to fuel ratio, Fuel type.

مقدمه

فیزیک آماری نیز که مبنایی برای بیان یونش حرارتی است، یک صد سال پیش فرمول‌بندی شده است. در طی سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ میلادی فعالیت‌های زیادی، بیشتر به منظور فهم فرایند شیمی یونش در شعله صورت گرفت [۱ و ۲]. در طی سال‌های دهه ۸۰ تا اوایل دهه ۹۰ میلادی تلاش‌های اولیه برای استخراج اطلاعات از جریان یونی صورت گرفت، اما نتیجه‌های به‌دست آمده به‌طور کامل نامیدکننده بودند [۳ و ۴]. اما با پیشرفت در روش‌های تحلیل سیستم و پردازش سیگنال امکان تفسیر و بهره‌گیری از جریان‌های یونی فراهم شد.

در طی سال‌های اخیر، گرایش زیادی به سوی روش ویژه‌ای تحت عنوان «حس یون» برای استفاده در سیستم‌های مدیریت موتور (EMS) ایجاد شده است. در این روش، از جریان گذرنده از میان شکاف شمع (رطوبتی به جرقه شمع ندارد) برای اخذ اطلاعات استفاده می‌شود. با اعمال یک ولتاژ ثابت (DC) به پایه شمع، در شکاف شمع جریان کمی ایجاد می‌شود که به جریان یونی معروف است. این جریان حاوی اطلاعات زیادی درباره حالت گاز و فرایند احتراق درون سیلندر است. البته پدیده‌ای که ویژگی‌های الکتریکی شعله را بیان می‌کند نزدیک به دو قرن است که شناخته شده است.

*عهد دار مکاتبات

+E-mail: Shamekhi@me.kntu.ac.ir

کاوشگری درون محفظه احتراق قرار می‌گیرد. این کاوشگر به منظور ایجاد یک میدان الکتریکی که جاذب و دافع یون‌های اطراف خود باشد، تعبیه می‌شود. شکل ۱ سیگنال جریان یونش را در سه مرحله جرقه، جبهه شعله و شعله پسین نمایش می‌دهد [۱۵].

روش اندازه‌گیری جریان یونی

به منظور آشکارسازی جریان یونی، شمع یا یک حس‌گر مجزا درون محفظه احتراق قرار می‌گیرد و به عنوان کاوشگر به کار می‌رود. مثال‌هایی از این نوع در شکل ۲ نشان داده شده است.

مزیت استفاده از شمع این است که هزینه‌های نصب یک کاوشگر اضافی را ندارد. همچنین عیب آن نیز پالس جرقه است، زیرا طی این مرحله هیچ سیگنال مفیدی به دست نمی‌آید. پس از خاتمه جرقه، شمع در طول بخش باقی‌مانده از سیکل احتراق برای اندازه‌گیری قابل دسترسی است.

فرایند احتراق به وسیله‌ی شمع آغاز می‌شود و از این جهت دارای پایگاه پایش مناسبی در طول فرایند احتراق است. مبنای اندازه‌گیری جریان یونی ایجاد یک میدان الکتریکی در محفظه احتراق و اندازه‌گیری جریان گذرنده از میان الکتروود شمع است. مداری که این جریان را ایجاد کرده و اندازه می‌گیرد شامل: منبع ولتاژ، شمع و شکاف شمع است.

یک روش برای اندازه‌گیری جریان یونی اعمال مستقیم ولتاژ آزمایش می‌باشد که در شکل ۳ نشان داده شده است. در این روش تجهیزات اندازه‌گیری در طرف ولتاژ بالای کوئل جرقه قرار گرفته است، که دلالت بر محافظت مدار از پالس‌های ولتاژ بالای ایجاد شده به وسیله‌ی شمع می‌کند. برای محافظت مدارهای اندازه‌گیری، چنانچه در شکل نیز دیده می‌شود یک دیود ولتاژ بالا (HV) به کار رفته است. برای جلوگیری از ایجاد جرقه این دیودها پس از پایان پالس ولتاژ با تاخیر باز می‌شوند. علت این امر وجود خازنی است که پس از آن که به وسیله‌ی پالس جرقه شارژ شد، تخلیه می‌شود. از این‌رو، امکان از دست رفتن برخی از بخش‌های جالب توجه جریان یونی وجود دارد [۱۶].

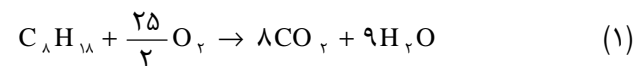
روش دیگر اندازه‌گیری جریان یونی عبارت از اعمال ولتاژ آزمایش در انتهای ولتاژ پایین کوئل و اندازه‌گیری جریان گذرنده از کوئل است [۹]. در این روش نیازی به دیودهای ولتاژ بالا (HV) برای حفاظت مدار نیست. از آنجایی که کوئل تاثیر چندانی روی جریان آزمایش نداشته و پالس ولتاژ بالایی وجود ندارد،

در حال حاضر از جریان‌های یونی به منظور آشکارسازی مورد‌های متفاوتی در سیستم‌های کنترل الکترونیک موتور خودرو استفاده می‌شود. تشخیص پدیده کوبش در موتور به وسیله‌ی جریان یونی روش شناخته شده‌ای است [۵]. تشخیص احتراق ناقص با کمک جریان یونی نیز به وسیله‌ی بعضی از تولیدکنندگان خودرو به کار می‌رود [۶ - ۹]. همچنین استفاده از این روش برای کنترل نسبت هوا به سوخت و کنترل آوانس جرقه در موتور خودرو به وسیله‌ی پژوهش‌گران دنبال می‌شود [۱۰-۱۴]. در این مقاله با بیان مدلی برای جریان یونی حاصل از احتراق در مرحله‌ی شعله پسین به بررسی تاثیر پارامترهای متفاوت بر آن می‌پردازیم.

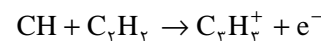
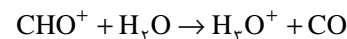
جریان یونی

فرایند یونش گازهای محفظه احتراق را می‌توان به طور خلاصه به این صورت بیان کرد که گرمای جبهه شعله، گازهای درون محفظه احتراق را یونیده کرده و گازها رسانا می‌شوند.

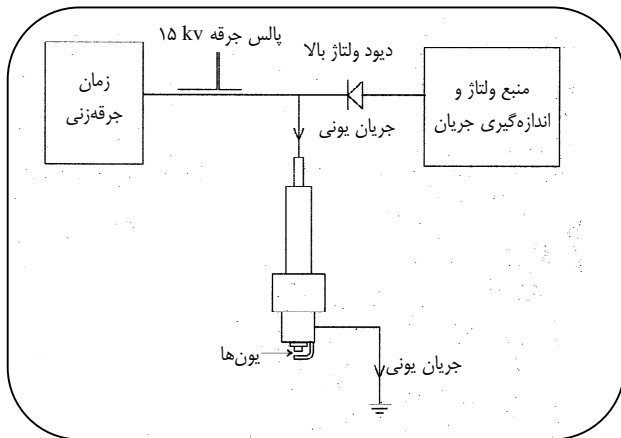
با استفاده از یک میدان الکتریکی در محفظه احتراق، می‌توان جریان ایجاد شده را اندازه‌گیری کرد. درجه‌ی یونش به دما و فشار درون سیلندر بستگی دارد. در نتیجه، جریان یونش شامل اطلاعاتی در مورد فرایند احتراق و فشار درون سیلندر است. رابطه‌ی (۱) مثالی از یک واکنش یک طرفه در یک موتور احتراق داخلی است:



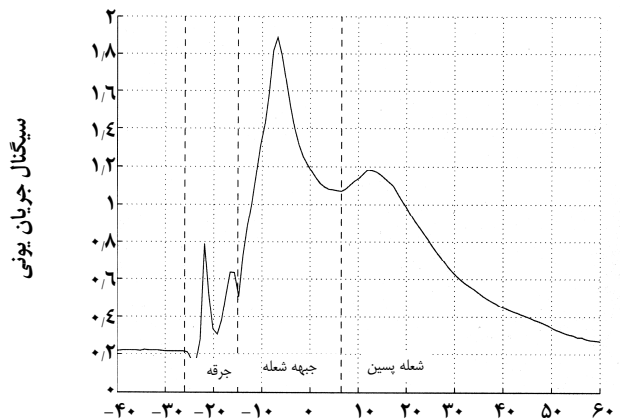
این نوع واکنش‌ها تنها حاصل احتراق ایده‌آل است. احتراق واقعی چندین مرحله داشته که در آن مولکول‌ها به واسطه حرارت یونیده شده و سپس با یکدیگر ترکیب می‌شوند و مولکول‌های پایدارتری را به وجود می‌آورند. برخی واکنش‌های مقدماتی که باعث به وجود آمدن یون‌ها می‌شوند عبارت‌اند از:



به غیر از یون‌های بالا، یون‌های دیگری مانند CH_3O^+ ، OH^- و O^{2-} نیز وجود دارند که در حین واکنش مقدماتی ایجاد می‌شوند. یون‌های مثبت و الکترون‌ها حامل جریان‌های یونی هستند [۸]. برای به دست آوردن خاصیتی که درجه یونش را منعکس کند،

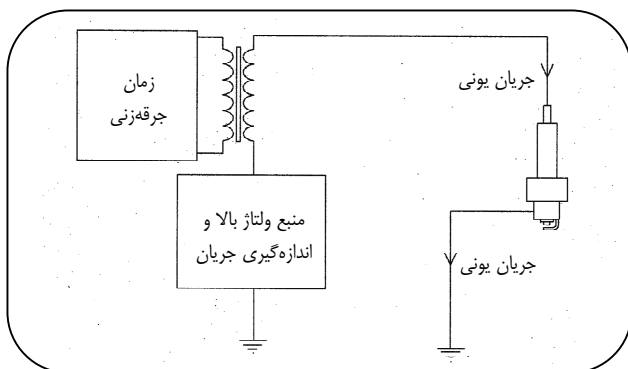


شکل ۳- اندازه‌گیری جریان یونی در طرف ولتاژ بالای کویل جرقه [۱۶].

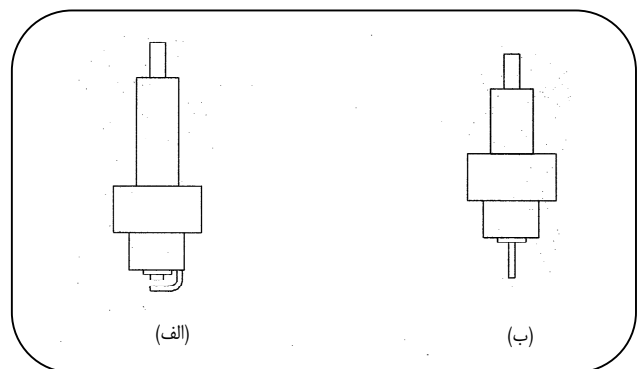


زاویه میل لنگ (درجه)

شکل ۱- نمایش جریان یونش در سه مرحله‌ی: جرقه، جبهه شعله و شعله پسین [۱۵].



شکل ۴- اندازه‌گیری جریان یونی در طرف ولتاژ پایین کویل جرقه [۹].



شکل ۲- دو کاوشگر متفاوت الف - شمع معمولی ب - کاوشگر مجزایی شبیه شمع.

لذا این روش برای اندازه‌گیری جریان یونی مناسب است. طرحی از مبانی این مدار اندازه‌گیری در شکل ۴ ارایه شده است.

مدل‌سازی جریان یونی

جریان یونی را می‌توان با مدل ترمودینامیکی، سینتیکی در مرحله شعله پسین مورد بررسی قرار داد. فرضیه‌های اساسی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از:

الف - احتراق کامل گاز درون محفظه احتراق

ب - تعادل ترمودینامیکی گاز درون محفظه احتراق

ج - گسترش جریان از الکتروود مرکزی شمع

با توجه به فرضیه‌های بالا، جریان یونی حاصل از احتراق در

مرحله شعله پسین با رابطه‌ی (۳) بیان می‌شود [۱۶]:

$$I = Ax_i^{1/2} P^{-1/2} T^{3/4} \exp\left[-\frac{E_i}{2\sigma T}\right] \quad (3)$$

که در آن A مقدار ثابتی است (شکل ۵).

$$A = \frac{U}{Sd} \left(\frac{B_i}{B_o}\right)^{1/2} \frac{e^2 r^2}{\sqrt{\rho_{tot}}} \left(\frac{\pi^{1/2} m_e \sigma}{2h^3}\right)^{1/4} \quad (4)$$

رابطه‌ی بالا با فرض یک درجه‌ی یونش به‌دست آمده است.

با توجه به رابطه‌ی (۳) می‌توان رابطه‌ای برای جریان یونی

نسبی به دست آورد:

$$\frac{I}{I_{max}} = \left(\frac{x_i}{x_{i max}}\right)^{1/2} \left(\frac{P}{P_{max}}\right)^{1/2} \left(\frac{T}{T_{max}}\right)^{1/2} \exp(BB) \quad (5)$$

که در آن:

جدول ۱- مقادیرهای مورد استفاده برای محاسبه معادله (۳).

$U = 80 \text{ (V)}$
$B_o = B_i$
$r = 1 \text{ (mm)}$
$d = 1,5 \text{ (mm)}$
$e = 1,6 \cdot 22 \times 10^{-19} \text{ (C)}$
$m_e = 9,1 \cdot 095 \times 10^{-31} \text{ (kg)}$
$h = 6,626 \cdot 0755 \times 10^{-34} \text{ (J.s/molecule)}$
$\sigma = 1,38 \cdot 0658 \cdot 12 \times 10^{-23} \text{ (J/K.molecule)}$

جدول ۲- انرژی یونش گونه‌های حاصل از احتراق و حداکثر جریان ایجاد شده به وسیله آنها.

گونه	انرژی یونش (الکترون ولت)	جریان (میکرو آمپر)
N ₂	۱۵,۵	۰,۰۰۱۱۰۵
N	۱۴,۵۳	۰,۰۰۰۰۰۶۹۱
NO	۹,۲۵	۴۶,۸۳۶۶
CO	۱۴,۰۵	۰,۰۰۴۳۲۹
CO ₂	۱۳,۸۴	۰,۰۱۳۲۴۶
O	۱۳,۶۱۴	۰,۰۰۱۹۲۶
O ₂	۱۲,۲	۰,۱۱۷۹۶۸
H	۱۳,۵۹۵	۰,۰۰۱۹۶۱
H ₂	۱۵,۴۲۷	۰,۰۰۰۰۹۶
H ₂ O	۱۲,۶	۰,۱۷۰۱۹
OH	۱۳,۱۸	۰,۰۱۲۷۲

انرژی بیشتر برای یونیده کردن مولکول هاست، در نتیجه باعث افزایش جریان یونش می‌شود. همچنین دما بر نرخ ترکیب مجدد یون‌ها تاثیر می‌گذارد.

ب - نسبت هوا به سوخت (A/F)

سیگنال جریان یونی در گستره $1/1 < \phi < 1/0$ ماکسیمم است، که ϕ نسبت هم‌ارزی متناظر با ویژگی‌های استوکیومتری مخلوط است. چنانچه مخلوط فقیر باشد، سطح سیگنال به طور پیوسته کاهش می‌یابد. این پدیده می‌تواند ناشی از کاهش دما در فرایند احتراق باشد و از این رو، سیگنال کوچک‌تری خواهیم داشت. این پدیده در شکل ۷ برای سوخت بنزین نشان داده شده است.

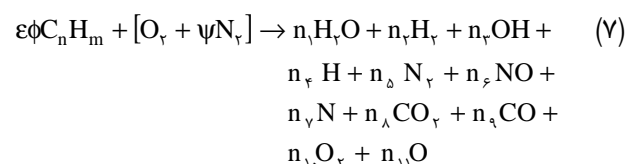
$$BB = \left[- \frac{E_i}{\sqrt{\sigma T_{max}}} \left(\left(\frac{T_{max}}{T} \right) - 1 \right) \right] \quad (6)$$

پارامترهای T_{max} ، P_{max} ، $x_{i,max}$ به ترتیب عبارت‌اند از: دما، فشار و کسر مولی گونه در I_{max} [۱۷].

نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی

جریان یونی پدیده پیچیده‌ای بوده و عامل‌های زیادی روی آن تاثیر می‌گذارند. در این قسمت با استفاده از رابطه‌های ارائه شده در قسمت قبل به محاسبه جریان یونی ایجاد شده و تاثیر هر یک از پارامترها در ایجاد آن می‌پردازیم.

پارامترها و مقادیر عددی مورد استفاده در این مقاله که مبنای محاسبه جریان یونی قرار گرفته‌اند، در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده‌اند. این جدول‌ها شامل ویژگی‌های فنی سیستم و یک سری ثابت‌های فیزیکی است. مقادیرهای مربوط به متغیرهای دما، فشار و کسر مولی گونه‌ها با استفاده از کد کامپیوتری که به همین منظور تدوین شده، محاسبه شده و به دست آمده‌اند. برای مدل‌سازی احتراق از مدل احتراق دو ناحیه استفاده شده است [۱۸]. در این مقاله فرض شده که فرآورده‌های احتراق شامل ۱۱ گونه فرآورده‌ی اصلی و فرعی است. با در نظر گرفتن ۱۱ گونه برای فرآورده‌های حاصل از احتراق یک سوخت هیدروکربنی با فرمول شیمیایی C_nH_m ، واکنش شیمیایی احتراق به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۸]:



در رابطه‌ی بالا ϕ ، نسبت هم‌ارزی سوخت به هوا، ψ ، نسبت مولی نیتروژن به اکسیژن و ε با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{1}{n + m/4} \quad (8)$$

عامل‌های موثر بر جریان‌های یونی

الف - دما

درجه‌ی یونش به دما بستگی دارد، لذا جریان یونش به دما وابسته است. شکل ۶ تغییرهای جریان یونی را با تغییرهای دمای گازهای محفظه احتراق نشان می‌دهد. چون افزایش دما به معنی

ج - باز خورانی فرآورده‌های احتراق (EGR)

از آنجایی که EGR روی دما تأثیر می‌گذارد، روی سطح جریان یونش نیز تأثیر دارد. افزایش EGR باعث پایین آمدن دمای محفظه احتراق و به دنبال آن، کاهش جریان یونی می‌شود. همچنین عبور توده‌های گاز EGR از حس‌گرهای یونش، باعث تغییر سیگنال با زمان می‌شود. چون سطح یون در گازهای EGR کم‌تر است. شکل ۸ تغییرهای ماکسیمم جریان یونی را با تغییرهای EGR به نمایش می‌گذارد.

د - نوع سوخت

استفاده از سوخت‌های متفاوت در موتورهای اشتعال جرقه‌ای سیگنال‌های متفاوتی را به دست خواهد داد. افزودنی‌هایی مانند تترا اتیل سرب در سوخت نیز با افزایش سطح یونش به علت کند کردن نرخ ترکیب مجدد آنها، بر درجه یونش تأثیر می‌گذارند. در شکل ۹ تغییرهای مقدار ماکسیمم جریان یونی برای چند سوخت متفاوت نشان داده شده است. چنانچه که در شکل دیده می‌شود هرچه نسبت کربن به هیدروژن در فرمول شیمیایی سوخت بیشتر باشد جریان یونی به‌دست آمده بیشتر خواهد بود.

ه - رسوب‌گیری و فرسودگی شمع

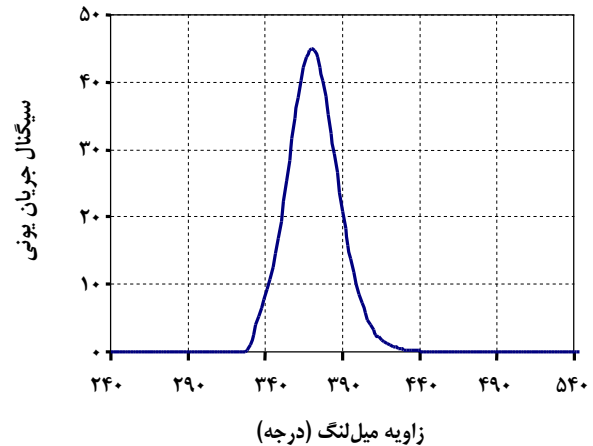
تغییر مقدار مقاومت شمع در سیگنال‌های متفاوت می‌تواند باعث ایجاد نوسان‌های زیادی در سطح‌های سیگنال شود. تغییرهای مقاومت شمع به چند دلیل است که مهم‌ترین آنها انباشتگی فرآورده‌های حاصل از احتراق در سطح‌های تبادل حرارتی شمع مابین الکتروود مرکزی و پوسته دامن شمع و تغییر مقاومت الکتریکی آن است. رسوب‌گیری شمع باعث افزایش مقاومت الکتریکی شمع می‌شود و با توجه به قانون اهم ($V=RI$) با افزایش مقاومت شمع در حالت ولتاژ ثابت، جریان الکتریکی (یونی) کاهش خواهد یافت.

و - بار موتور

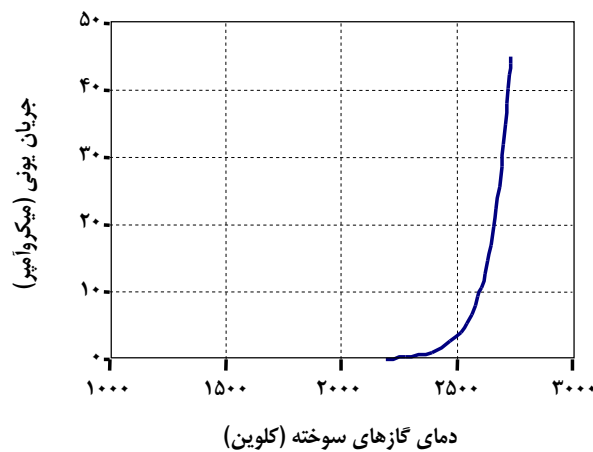
با افزایش بار موتور، سطح سیگنال افزایش می‌یابد. این امر ناشی از غنی شدن سوخت، افزایش مقدار هوا و سوخت، افزایش دمای احتراق و انجام واکنش‌های بیشتر در محفظه احتراق است.

ز - رطوبت هوا

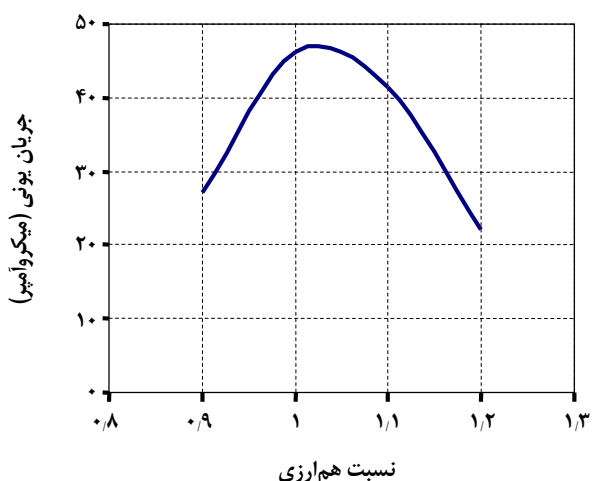
رطوبت اغتشاش محیطی است که بر نحوه گسترش فشار در



شکل ۵ - تغییرهای جریان یونی حاصل از احتراق در مرحله شعله پسین (شبیه‌سازی).



شکل ۶ - تغییرهای جریان یونی با تغییرهای دمای گازهای محفظه احتراق (شبیه‌سازی)



شکل ۷ - تغییرات ماکسیمم جریان یونی با نسبت هم‌ارزی برای سوخت بنزین (شبیه‌سازی).

محفظه احتراق تاثیر می‌گذارد. بنابراین، بر سیگنال جریان یونی نیز تاثیر گذار است. شکل ۱۰ تغییرهای ماکسیمم جریان یونی با افزایش رطوبت را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل نیز دیده می‌شود با افزایش رطوبت در مخلوط هوا و سوخت مقدار جریان یونی نیز کاهش می‌یابد. علت این امر کاهش دمای فرآورده‌های احتراق و در نتیجه کاهش نیتروژن اکسید و کاهش جریان یونی است.

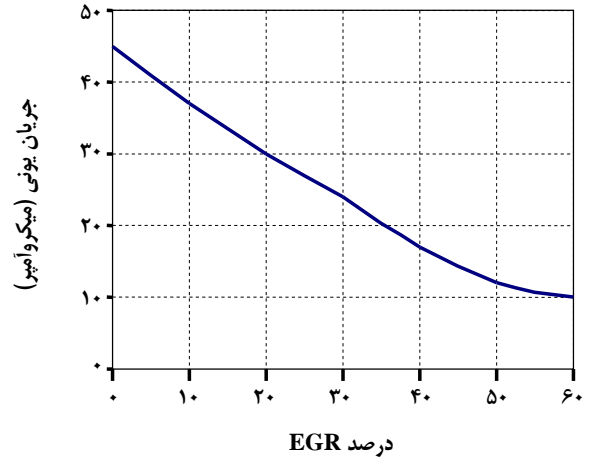
نتیجه‌گیری نهایی

در این تحقیق عامل‌های تاثیرگذار بر جریان‌های یونی حاصل از احتراق در موتورهای اشتعال جرقه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتیجه‌های به دست آمده نشان می‌دهد که:

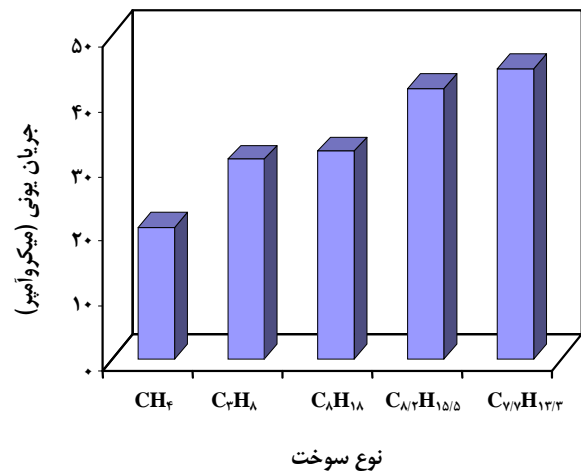
- ۱- افزایش دما باعث افزایش جریان یونی است.
- ۲- بیشترین مقدار سیگنال جریان یونی در گستره $1/1 < \phi \leq 1/0$ اتفاق می‌افتد و با فقیر شدن یا غنی شدن بیش از حد مخلوط دامنه سیگنال کاهش می‌یابد.
- ۳- افزایش EGR باعث کاهش دما و در نتیجه کاهش جریان یونی می‌شود.
- ۴- هر چه نسبت مولکولی کربن به هیدروژن در فرمول شیمیایی سوخت بیشتر باشد جریان یونی حاصل بیشتر است.
- ۵- رسوب‌گیری و فرسودگی شمع به دلیل افزایش مقاومت شمع سطح جریان یونی را کاهش می‌دهد.
- ۶- افزایش بار موتور باعث افزایش جریان یونی می‌شود.
- ۷- افزایش رطوبت در هوای ورودی موتور باعث کاهش جریان یونی می‌شود.

فهرست علائم

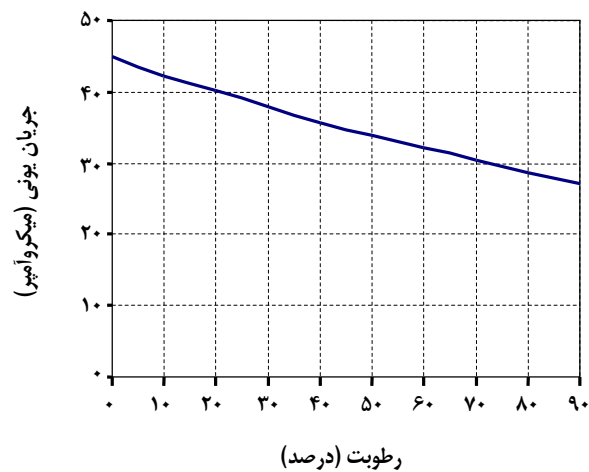
B_i	تابع افراز داخلی یونها
B_o	تابع افراز داخلی نوترون‌ها
BTDC	قبل از نقطه مرگ بالا
d	فاصله شکاف شمع (mm)
E_i	انرژی یونش گونه i (eV)
EGR	بازخوانی فرآورده‌های احتراق
e	بار الکتریکی (C)
h	ثابت پلانک (J.Sec/molecule)
I	جریان الکتریکی (A)
m_e	جرم الکترون (kg)



شکل ۸ - تغییرهای ماکسیمم جریان یونی با تغییرهای EGR (شبیه‌سازی).



شکل ۹- تغییرهای ماکسیمم جریان یونی با نوع سوخت (شبیه‌سازی).



شکل ۱۰- تغییرهای ماکسیمم جریان یونی با رطوبت (شبیه‌سازی).

	علایم یونانی	P	فشار محفظه احتراق (Pa)
ϕ	نسبت هم ارزی	r	شعاع (mm)
σ	ثابت بولتزمن (J/K.molecule)	S	سطح مقطع الکترون‌ها
ρ_{tot}	چگالی عددی ذره‌های سنگین	T	دمای مطلق (K)
Ψ	نسبت مولی نیتروژن به اکسیژن	U	ولتاژ (V)
		x_i	کسر گونه i

تاریخ دریافت: ۸۴/۵/۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۵/۲/۲۵

مراجع

- [1] Calcote, H.F., Mechanism for the Formation of Ions in Flames, *Combustion and Flame*, **1**, 385, (1957).
- [2] Calcote, H. F., "Ion Production and Recombination in Flames", Eight Symposium (International) on Combustion, (1960).
- [3] Anderson, R.L., "In-Cylinder Measurement of Combustion Characteristics Using Ionization Sensors" SAE 860485, (1985).
- [4] Shimasaki, Y., Kanehito, M., Baba S., Muaruyama, S., Hisaki, T. and Miyatu, S. "Spark Plug Voltage Analysis for Monitoring Combustion in an Internal Combustion Engine" SAE 930461, (1993).
- [5] Auzins, J., Johansson, H. and Nytomt, J., "Ion-Gap Sense in Misfire Detection, Knock and Engine Control", SAE 950004, (1995).
- [6] Lee, A. and Pyko, J.S, "Engine Misfire Detection by Ionization Current Monitoring", SAE 950003, (1995).
- [7] Collings, N., Dinsdle, S. and Eade, D., "Knock Detection by Means of the Spark Plug", SAE 860635, (1986).
- [8] Brehob, D.D, "An Exhaust Ionization Sensor for Detection of Late Combustion with EGR", SAE 898084, (1989).
- [9] Bray. N.C. and Callings, N., "Ionization Sensors for Internal Combustion Engine Diagnostics", Endeavor, New Series, **15** (1), (1991).
- [10] Reinmann, R., Saitzkoff, A. and Mauss, F., "Local Air-Fuel Ratio Measurements Using the Spark Plug as an Ionization Sensor", SAE paper No. 970856, (SAE SP-1263): 175-185, (1997).

[۱۱] شامخی، امیرحسین؛ غفاری، علی؛ تخمین موقعیت فشار ماکسیمم احتراق با استفاده از جریان‌های یونی،

دهمین کنفرانس مهندسی مکانیک، صص ۶۰۸-۶۱۳، تهران (۱۳۸۱).

[۱۲] شامخی، امیرحسین؛ غفاری، علی؛ کنترل آوانس جرقه در موتورهای اشتعال جرقه‌ای به وسیله جریان‌های

یونی، یازدهمین کنفرانس مهندسی مکانیک، صص ۱۹۱۴-۱۹۰۸، تهران (۱۳۸۲).

[13] Malaczynski, G. W. and Baker, M. E., "Real Time Digital Signal Processing of Ionization

- Current for Engine Control Diagnostic and Control”, SAE Technical Paper Series 2003-01-1119, (2003).
- [14] Shamekhi, A. H. and Ghaffari, A., Fuzzy Control of Spark Advance by Ion Current Sensing, *J. of ISME*, **6** (2), p. 34 (2005).
- [15] Eriksson, L., Nielsen, L. and Nytomt, J., “Ignition Control by Ionization Current Interpretation”, SAE 960045, (1996).
- [16] Kramer, M. and Wolf, K., “Approaches to Gasoline Engine Control Involving the Use of Ion Current Sensory Analysis”, SAE 905007, (1990).
- [17] Shamekhi, A. H. and Ghaffari, A. "Ion Current Simulation during the Post Flame Period", *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, **24** (2), p. 51 (2005).
- [18] Shamekhi, A. H. and Ghaffari, A., “An Improved Model for SI Engines”, ASME ICEF 2004-818, (2004).