

## بررسی تئوری استفاده از هیدروژن در موتور جرقه‌ای و تنها آلاینده آن

ناصر شایگان، استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه شهید رجایی، تهران، ایران

E-mail: [n\\_shaygan@srttu.ir](mailto:n_shaygan@srttu.ir)

### چکیده

در این مقاله استفاده از هیدروژن (به عنوان سوخت تمیز که تنها آلاینده آن اکسید ازت است) به طور تئوری در موتور جرقه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل ترمودینامیکی برای انجام مطالعه استفاده می‌شود. مشاهده شده که در شرایط نزدیک به استوکیومتریک، میزان افزایش فشار بالا بوده، که باعث ناهنجار کار کردن و ضربه زدن موتور می‌شود. برای عملکرد مناسب لازم است که مخلوط فقیرتر ( $\Phi \leq 0.6$ ) استفاده شود این باعث می‌شود که اکسید ازت که تنها آلاینده موتور هیدروژن سوز است نیز ناچیز باشد.

واژه‌های کلیدی: موتور هیدروژن سوز، سوخت پاک، سازگار با محیط‌زیست

### ۱. مقدمه

میکروسوسیستم جرقه آن در مرجع [۲] مورد بررسی قرار گرفته است. چگونگی هیدروژن سوز کردن موتور پیکان در مرجع [۳] توضیح داده شده است. مرجع [۴] به کمک یک مدل ریاضی به بررسی موتور هیدروژن سوز می‌پردازد. در این مقاله چگونگی عملکرد هیدروژن در موتور جرقه‌ای و تنها آلاینده آن یعنی اکسید ازت به صورت تئوری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۲. تئوری پایه و مراحل انجام کار:

در مدل ترمودینامیکی، موتور به عنوان سیستم باز در نظر گرفته می‌شود و قانون بقا جرم، قانون بقا انرژی بر روی آن اعمال می‌شود. این دو معادله همراه با معادله حالت دو رابطه عمومی برای میزان تغییرات فشار و دمای داخل سیلندر فراهم می‌سازند.

$$\dot{p} = \frac{\rho}{\partial \rho / \partial P} \left( -\frac{\dot{V}}{V} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \dot{T} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \phi} \dot{\phi} + \frac{\dot{m}}{m} \right) \quad (1)$$

(۲)

$$\dot{T} = \frac{B}{A} \left[ \frac{\dot{m}}{m} \left( 1 - \frac{h}{B} \right) - \frac{\dot{V}}{V} - \frac{C}{B} \dot{\phi} + \frac{1}{Bm} \left( \sum_j \dot{m}_j h_j - \dot{Q}_w \right) \right]$$

مصرف سوخت در خودروها، امروزه بخش بزرگی از مصرف انرژی را در بر می‌گیرد. بیش از ۸۰۰ میلیون خودرو در جهان وجود دارد [۱]. بنزین و گازوئیل به عنوان دو سوخت اصلی بکار گرفته شده در موتورهای احتراق داخلی (بخصوص در کشورما) نقش مهمی در تولید آلاینده‌های نظیر  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $HC$  دارند.  $CO_2$  به عنوان بخش اصلی محصولات احتراق سوخت فسیلی که جزء مواد آلاینده در نظر گرفته نمی‌شود، خود باعث اثرات گلخانه‌ای می‌شود که امروزه چالش بزرگ پیش رو است. هیدروژن به علت نداشتن کربن و گوگرد، ایجاد  $CO$ ,  $HC$  و  $CO_2$  و  $SO_2$  نمی‌کند. تنها آلاینده تولیدی سوخت هیدروژن، اکسید ازت است که مقدار آن بستگی به دمای احتراق (و از این رو به نوع مخلوط) دارد.

ایده استفاده از هیدروژن در سال ۱۸۲۰ توسط Cecil مطرح شد. او از هیدروژن به عنوان سوخت در موتور استفاده کرد. تحقیقات در مورد موتورهای هیدروژنی از اواخر دهه ۱۹۷۰ بطور گسترده‌ای شروع شد.

این تحقیقات در ابتدا به صورت عملی بر روی هیدروژن سوز کردن موتور، انجام آزمایش و همچنین به صورت تئوری صورت گرفته است. نوع تولید مخلوط در خارج از سیلندر از طریق

داخل سیلندر مشخص باشد.

با توجه به اینکه معادلات شیمیایی برای یک مول O2 نوشته می شود و با فرض اینکه ۲۰ درصد گاز سوخته در سیلندر باقی بماند. تعداد مولهای اجزا برای یک مول O2 (با فرض اولیه ای برای ترکیبات گازهای باقیمانده) مشخص است و خواص مخلوط در هر دما به دست می آید. از آنجا که در فرآیند مکش، واکنش شیمیایی صورت نمی گیرد، بنابراین نوع مخلوط ثابت باقی می ماند. جرم کل مخلوط در انتهای مرحله مکش از رابطه زیر به دست می آید.

$$m_t = m + m_{res}$$

$$m = \int_{\theta_{10}}^{\theta_{1c}} \dot{m} d\theta$$

فرآیند تراکم: در این فرآیند نیز واکنش شیمیایی صورت نمی گیرد و نوع مخلوط ثابت باقی می ماند. بنابراین در هر دما، خواص مخلوط تعیین و دما و فشار سیلندر از معادلات (۱) و (۲) ساده شده برای فرآیند تراکم) به دست می آید.

فرآیند احتراق: از نقطه آغاز جرقه، واکنش شروع می شود، یک شعله آشفته به صورت یک سطح کروی با مرکز نقطه جرقه شکل می گیرد. محفظه احتراق به دو بخش سوخته و نسوخته تقسیم می شود. در خلال احتراق فرضیه یکنواخت بودن دما و ترکیبات مخلوط در ناحیه نسوخته ثابت و ترکیبات مخلوط در ناحیه سوخته از روی تعادل شیمیایی به دست می آید. فشار داخل سیلندر یکنواخت فرض می شود (یکسان برای هر دو ناحیه سوخته و نسوخته) دو ناحیه به وسیله شعله (ناحیه انجام واکنش شیمیایی) از هم جدا می شوند.

معادله بقا جرم در خلال احتراق:

$$\dot{m}_a = -\dot{m}_b \quad (7)$$

برای به دست آوردن  $\dot{m}_b$  فرض بر این است، میزان جرمی از گاز نسوخته  $\dot{m}_e$  که بر اثر آشفستگی وارد ضخامت لایه شعله می شود برابر است با:

$$\dot{m}_e = \frac{1}{60N} (\rho_u A_r u_{te}) \quad (8)$$

همچنین فرض می کنیم که جرم وارد شده به داخل لایه شعله به میزانی که گاز نسوخته وارد لایه می شود، می سوزد.

$$A = \frac{\partial h}{\partial T} + \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial T}{\partial P} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{\partial h}{\partial P} \right)$$

$$B = \frac{1 - \rho \left( \frac{\partial h}{\partial P} \right)}{\partial \rho / \partial P}$$

$$C = \frac{\partial h}{\partial \varphi} + \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial \varphi}{\partial P} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{\partial h}{\partial P} \right)$$

اینها معادلات عمومی هستند که با توجه به شرایط مختلف در فرآیندها، همراه با دیگر معادلات همزمان باید حل شوند.

علاوه بر آنها دو معادله برای حجم موتور و سطح محفظه احتراق بر حسب زاویه میل لنگ باید در نظر گرفته شوند.

(۳)

$$\frac{V}{V_c} = 1 + \frac{1}{2} (r_c - 1) [R + 1 - \cos \theta - (R^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}]$$

(۴)

$$A = A_{th} + A_p + \frac{\pi BL}{2} [R + 1 - \cos \theta - (R^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}]$$

فرآیند مکش: در این فرآیند معادله میزان تغییر جرم باید همزمان با دو معادله میزان تغییرات فشار و دما (ساده شده برای این فرآیند) حل شوند.

$$\dot{m} = \dot{m}_i - \dot{m}_e \quad (5)$$

میزان جرم ورودی و خروجی از رابطه زیر به دست می آید:

(۶)

$$\dot{m} = \frac{A_e}{60N} \left[ \frac{2kP_H \rho_{H,g}}{k-1} \right]^{1/2} y^{1/k} \left( 1 - y^{k/k} \right)^{1/2}$$

که در اینجا  $y = \frac{P_L}{P_H}$  و  $y = \frac{P_L}{P_H}$  و  $\left( \frac{2}{k+1} \right)^{k-1}$  و

$$y = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k-1}$$

با عدد ماخ ۱ از طریق سوپاپ عبور می کند.

$A_p$  سطح مؤثر لحظه ای است و مقدار آن بستگی به بلند شدن سوپاپ، جزئیات هندسی سر سوپاپ و نشیمنگاه و ساق سوپاپ دارد. در محاسبات حاضر ۰.۸ مقدار واقعی آن گرفته می شود [۵].

در دو معادله میزان تغییرات دما و فشار، خواص سیال داخل موتور لازم است. برای این منظور لازم است که نوع مخلوط در

بنابر این:

$$\dot{m}_b = \frac{1}{60N} \left( \frac{m_e - m_b}{\tau_b} \right) \quad \tau_b = l / u_l \quad (9)$$

که در اینجا  $l$  مقیاس طولی آشفستگی،  $u_l$  مقیاس زمانی است (در این رابطه  $l$  مقیاس طولی آشفستگی،  $u_l$  سرعت سوختن لایه‌ای است) برای حل همزمان دو معادله بالا، مقادیر  $\tau_b$ ،  $A_f$ ،  $u_{te}$  باید معلوم شود مقدار  $A_f$  (مساحت سطح صفحه شعله) بر اساس این فرض که شعله به صورت کره‌ای با مرکز موقیعت شمع حرکت می‌کند و همچنین با فرض اینکه محفظه احتراق به صورت استوانه‌ای که شمع در مرکز سطح بالای آن قرار دارد، سطح شعله به صورت یک کره است که شعاع آن با توجه به جرم-فشار-دما گاز سوخته، به دست می‌آید. از اینجا همچنین می‌توان مساحت سطح تماس گازهای سوخته و گازهای نسوخته با دیواره محفظه احتراق، جهت سطح انتقال حرارت را به دست آورد.

برای به دست آوردن مقادیر  $u_{te}$  و  $\tau_b$  مطابق [۶] عمل می‌شود.

$$u_{te} = \frac{C \bar{S}_p B}{L_{iv} D_{iv}} \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/2} \quad (10)$$

$$\tau_b = \left( \frac{15}{A} \right)^{1/2} (u_{te})^{-1/2} \left( \frac{vh \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)^{1/3}}{u_l} \right)^{1/2}$$

در زمان جرقه مقادیر  $P$ ،  $T_u$ ،  $T_b$ ،  $m_u$ ،  $m_b$ ،  $m_e$  به صورت زیر فرض می‌شوند و معادلات (۱) و (۲) (برای دمای گاز سوخته و گاز نسوخته) همراه با معادلات (۷) و (۸) و (۹) به صورت همزمان حل می‌شوند.

$P$  = فشار در زمان جرقه

$T_b$  = دمای آدیاباتیکی شعله که از روی ترکیبات مخلوط نسوخته و دما و فشار زمان احتراق به دست می‌آید.

$m_b$  = جرم گاز سوخته در فشار  $p$  و دمای  $T_b$  با فرض اینکه شعله‌ای به قطر ۱mm در زمان جرقه تشکیل شده باشد و ترکیبات از شرایط تعادل در فشار  $P$  و دمای  $T_b$  به دست می‌آید.

$m_e$  = جرم گاز نسوخته‌ای که در ابتدا وارد شعله آشفته شده، فرض می‌شود که برابر جرم گاز سوخته اولیه باشد.

$T_u$  = دمای گاز نسوخته در زمان جرقه

هنگام حل همزمان معادلات فوق در مرحله احتراق، سطح تماس

گازهای سوخته و نسوخته با دیواره محفظه احتراق در نظر گرفته می‌شود تا میزان انتقال حرارت به دیواره محفظه  $\dot{Q}_w$  را به دست آوریم.

مقدار انتقال حرارت به دیواره:

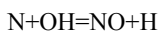
$$\dot{Q}_w = \frac{1}{60N} hA(T - T_w) \quad (11)$$

برای تعیین ضریب انتقال حرارت جابجایی از مدلی که در مرجع [۶] آمده استفاده می‌شود.

$$h = a \left( \frac{K}{B} \right) \left( \frac{\rho \bar{S}_p B}{\mu} \right)^b \quad (12)$$

مقدار ثابت  $a=0.7$ ،  $b=0.7$  است. مقادیر خواص گاز در رابطه فوق برای گازهای سوخته و نسوخته در دماها و اجزای ترکیب موجود به دست می‌آیند.

**شکل‌گیری اکسیدازت:** NOx اساساً متشکل است از NO و NO2، اما در موتورهای جرقه‌ای مقدار NO2 نسبت به NO بسیار ناچیز است. از این رو فرض می‌کنیم که اکسیدازت فقط NO باشد. مکانیزم شکل‌گیری NO از واکنش‌های اساسی زیر است.



بنابراین میزان شکل‌گیری NO از طریق سه واکنش بالا خواهد بود.

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1^+ [O][N_2] + k_2^+ [M][O_2] + k_3^+ [M][OH] - k_1^- [NO][N] - k_2^- [NO][O] - k_3^- [NO][H]$$

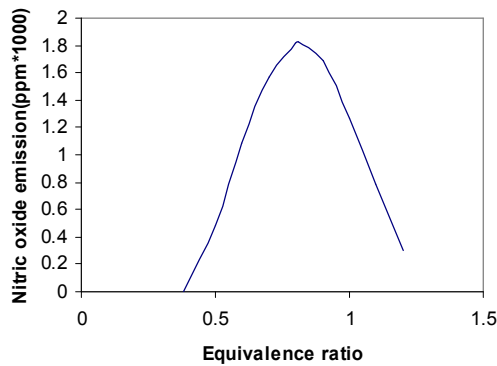
در رابطه فوق  $k$ ها ضریب‌های واکنش برای سه واکنش مکانیزم شکل‌گیری NO هستند. بالانویس + یا - بیانگر ضریب واکنش در جهت جلو یا عقب و اندیس 1، 2، 3 نشانگر واکنش اول، دوم و سوم هستند. مقادیر این ضرایب از مرجع [۶] گرفته شده‌اند.

بنابراین از نقطه آغاز جرقه همانطوریکه به وسیله فشار و دمای گاز سوخته از روی تعادل شیمیایی، اجزای ترکیب گازهای سوخته به دست می‌آیند، از روی آنها میزان شکل‌گیری NO مطابق بالا به دست می‌آید.

**فرآیند انبساط:** بعد از اتمام احتراق با کاهش دما و فشار، معادلات دما و فشار همراه با در نظر گرفتن شکل‌گیری NO تا لحظه بازشدن سوپاپ خروجی ادامه می‌یابد.

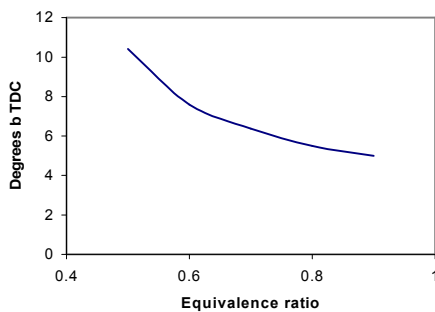
با توجه به این که فشار و میزان تغییرات فشار در نزدیکی شرایط استوکیومتریک بالا هستند و با علم به اینکه میزان تغییرات فشار بالاتر از ۶ اتمسفر در هر درجه میلنگ ممکن است ایجاد ضربه و ارتعاش موتور نماید، می‌توان نتیجه گرفت که در موتور هیدروژن‌سوز نوع مخلوط باید در محدوده ضریب تعادل  $\Phi=1/6$  و یا کمتر باشد.

در شکل ۴ تغییرات نشر اکسید ازت با ضریب تعادل ارائه شده است، همان طور که از شکل پیداست.



شکل ۴. نشر اکسید ازت در مقابل ضریب تعادل

انتشار اکسید ازت در ضریب تعادل  $\Phi=1/8$  بیشینه مقدار است. این بخاطر این است که بالابودن دما و موجود بودن اکسیژن، با هم در شکل‌گیری اکسید ازت، و از این رو نشر آن تأثیر دارند. بنابراین اگرچه دما در قدری بالاتر از شرایط استوکیومتریک بیشینه مقدار است، اما به دلیل کم بودن اکسیژن، مقدار انتشار اکسید ازت پایین است. از طرف دیگر همان طور که از شکل ۴ مشهود است، در شرایط  $\Phi=1/6$  و به پایین که موتور هیدروژن‌سوز بدون مشکل می‌تواند کار کند، مقدار اکسیدازت، پایین است. در شکل ۵ زمان بهینه جرقه در ضریب تعادل‌های مختلف نشان داده شده است.

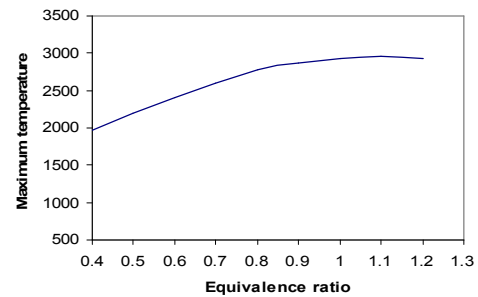


شکل ۵. زمان بهینه جرقه در مقابل ضریب تعادل

فرآیند تخلیه: از نقطه باز شدن سوپاپ خروجی، معادلات فشار و دما همراه با معادله میزان جرم خروجی باید به صورت همزمان حل شوند، تا سیکل کامل شود، باید توجه شود که محاسبات آنقدر تکرار می‌شود تا در پایان سیکل همه فرضیات در شروع سیکل با تقریب مناسب به دست آیند.

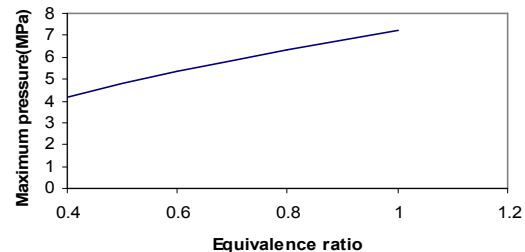
نتایج به دست آمده:

شکل‌های ۱ تا ۷ نتایج به دست آمده از محاسبات برای نسبت تراکم ۸ و سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه است. شکل ۱ بیشینه دمای حاصل در ضریب تعادل‌های مختلف را می‌دهد.



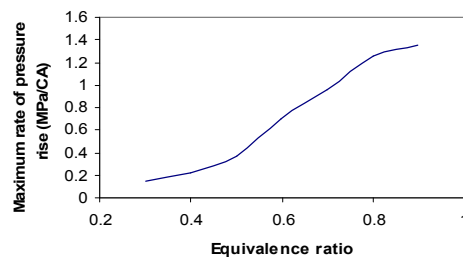
شکل ۱. بیشینه دما در مقابل ضریب تعادل

مطابق شکل بیشینه دما در نسبت  $\Phi=1/1$  که قدری بالاتر از شرایط استوکیومتریک است، به دست می‌آید. بیشینه فشار در ضریب تعادل‌های مختلف، در شکل ۲ نشان داده شده است.



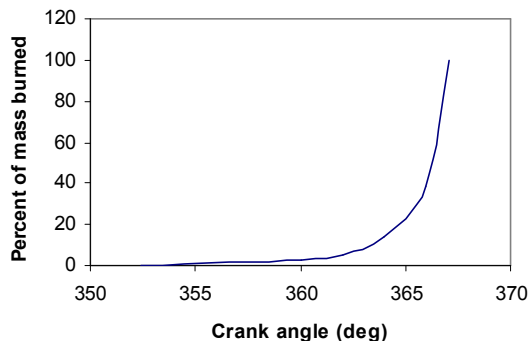
شکل ۲. بیشینه فشار سیلندر در مقابل ضریب تعادل

میزان تغییرات فشار در هر درجه زاویه میل لنگ در شکل ۳ برای ضریب‌های تعادل مختلف داده شده است.



شکل ۳. بیشینه میزان بالا رفتن فشار در مقابل ضریب تعادل

درصد جرم سوخته شده در فرآیند احتراق، در زوایای مختلف میل لنگ در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹. درصد جرم سوخته در زوایای مختلف میلنگ

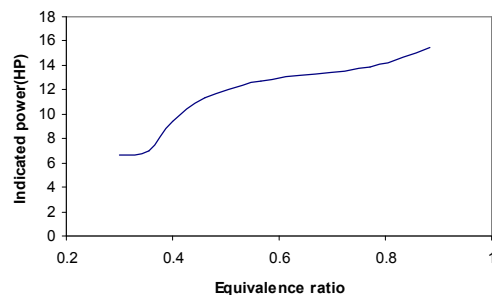
همان‌گونه که از شکل پیداست، در ابتدای احتراق فقط بخش کوچکی از مخلوط سوخته می‌شود و بیشتر مخلوط در چند درجه آخر طول احتراق می‌سوزد. این به دلیل افزایش یافتن سرعت شعله با بالا رفتن سطح جلو شعله است.

### ۳. نتیجه‌گیری

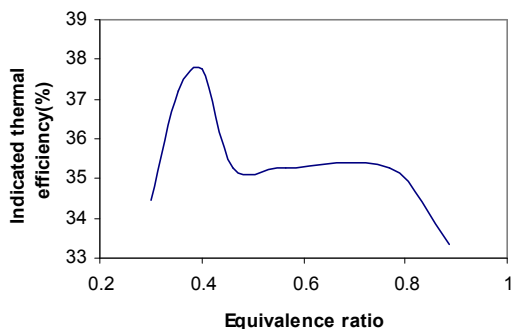
در مطالعه حاضر از روی نمودارهای بیشینه دما، بیشینه فشار و بیشینه میزان افزایش فشار در ضریب- تعادل های مختلف، مشاهده می‌شود که این مقادیر در شرایط نزدیک به استوکیومتریک بالا هستند (به دلیل میزان احتراق سریع مخلوط هیدروژن و هوا). بنابراین مخلوطی با ضریب تعادل کمتر می‌بایست در موتور استفاده شود. براساس مقدار بیشینه میزان افزایش فشاری که ایجاد ضربه نکند یک ضریب تعادل که ضریب تعادل مخلوط هیدروژن و هوا باید از آن کمتر باشد به دست می‌آید (این ضریب تعادل برای شرایط مفروض نسبت تراکم ۸ و دور موتور ۲۰۰۰ دور در دقیقه در مطالعه حاضر  $\phi=0.6$  است). تحت شرایط مخلوطی با ضریب تعادل کمتر از  $\phi=0.6$ ، مشاهده می‌شود که میزان نشر اکسید ازت به عنوان تنها آلاینده موتور، پایین، عملکرد و بازدهی موتور، بالا ولی توان اندیکاتوری آن پایین است.

به دلیل سرعت بالاتر شعله در موتور هیدروژن سوز، آوانس جرقه کاهش می‌یابد.

در شکل ۶ و ۷ توان اندیکاتوری موتور و بازده اندیکاتوری بر حسب ضریب تعادل نشان داده شده‌اند. بازده اندیکاتوری موتور هیدروژن سوز بخصوص در شرایط فقیر  $\phi \leq 0.6$  بالاتر است اگرچه توان موتور کمتر خواهد بود.

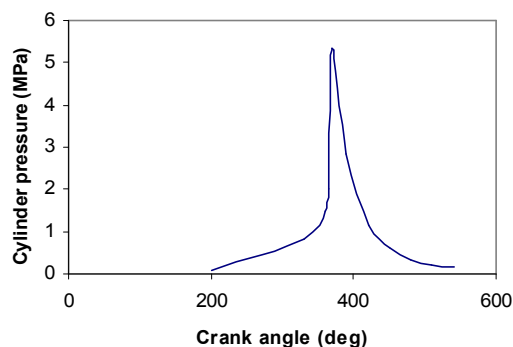


شکل ۶. توان اندیکاتوری در مقابل ضریب تعادل



شکل ۷. بازده اندیکاتوری در مقابل ضریب تعادل

شکل ۸ فشار سیلندر در زوایای مختلف میل لنگ را برای  $\phi=0.6$  مخلوط نشان می‌دهد.



شکل ۸. فشار سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ

۴. علائم و اختصارات

L	پایین دست	A	سطح
l	لایه ای	B	قطر
p	پیستون	h	انتالابی بر واحد جرم - ضریب جابجایی
res	باقیمانده	K	ضریب هدایت
st	استوکیومتریکی	k	نسبت گرمای ویژه ها
T	اشفته	L	بلندشدن سوپاپ- کورس پیستون
t	کل	m	جرم
u	نسوخته	N	دور در دقیقه
w	دیواره	P	فشار
o	زمان شروع جرقه	R	نسبت طول شاتون به شعاع لنگ
بالا نویس		r	نسبت تراکم
—	میانگین	Q	انتقال حرارت
.	میزان تغییرات نسبت به زاویه میلنگ	S	سرعت
		T	دما
		t	زمان
		u	سرعت
		V	حجم

۵. مراجع

1. Sierens, R. Verhelst, S. and Verstaeten, S. (2005) "An overview of hydrogen-fueled internal combustion engines", Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition, Istanbul, Turkey, 13-15 July 2005.
2. Shaygan, N. and Moderzareh, M. R. (1998) "The Development of a mixer and automatic ignition system for hydrogen -fueled engine", 17<sup>th</sup> Congress of the World Energy Council, Houston, Texas, USA, September 13-18, 1998.
- ۳- شایگان، ناصر و باقریان، علی (۱۳۷۸) "چگونگی هیدروژن سوزکردن موتور پیکان"، اولین همایش سراسری موتورهای درونسوز، (۲۷ و ۲۸ بهمن ماه ۱۳۷۸)
4. Shaygan, N. (2006) "Modeling of hydrogen fueled spark-ignited engine", World Renewable Energy Congress IX and Exhibition, Florence, Italy, 19-25 August 2006.
5. Sher, E. and Hacoheh, Y. (1987) " On the modeling of a SI 4-stroke cycle engine fueled with hydrogen-enriched gasoline", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 11, PP. 773-781.
6. Heywood, J. B. (1989) "Internal combustion engine fundamentals", Mc. Graw-Hill Book Company.

حروف یونانی

$\phi$	نسبت تعادل
v	ویسکوسیته سینماتیکی
$\rho$	دانسیته
$\theta$	زاویه میل لنگ
$\tau$	مشخصه زمان
اندیس	
a	هوا
b	سوخته
C	حجم مرده- نسبت تراکم
Ch	سر سیلندر
e	مؤثر
f	سوخت- شعله
H	بالا دست
IC	سوپاپ ورودی بسته
IO	سوپاپ ورودی باز
iv	سوپاپ ورودی
j	اجزا