

مقایسه انواع مدل های کاربردی اصطکاکی و احتراقی در موتور احتراق جرقه ای

محمد حسن شجاعی فرد* - امیر حسن کاکایی** - حمید دانامنش***

چکیده: اساسا با توجه به پیچیدگی عملکرد موتور احتراقی و متغیر بودن بسیاری از پارامترها در شرایط مختلف کارکرد، بررسی چگونگی عملکرد موتور جهت بهینه سازی از طریق آزمایش و تست بسیار هزینه بر و وقتگیر است. با توجه به پیشرفت روز افزون نرم افزارها و سخت افزارها این کار توسط مدل سازی کامپیوتری انجام می گیرد. همواره مدل سازی دقیق و سه بعدی موتور کار بسیار پیچیده و هزینه بر می باشد، لذا استفاده از روشهایی که سبب رسیدن به جوابهای معقول و فرضیات ساده کننده صحیح در شرایط یک بعدی باشد، می تواند بسیار قابل توجه باشد. یکی از نرم افزارهای یک بعدی تحلیل موتور که توسط کمپانیهای موتور ساز چون "A.V.L" و "F.E.V" جهت مدل سازی و بهینه سازی موتور استفاده می شود، سری نرم افزارهای "Gt-Suite" و بطور اختصاصی ماژول "Gt-Power" جهت مدل سازی موتور می باشد. از جمله تحقیقات انجام شده در مورد مدل سازی موتور احتراق جرقه ای می توان به مقاله ارایه شده توسط G. H. Abd Alla اشاره نمود. همچنین طی مدلسازی انجام شده توسط نرم افزار فوق این نتیجه حاصل شد که، از بین مدل های بکار رفته در موتور احتراق جرقه ای چون مدل انتقال حرارت موتور و سیال، مدل اصطکاک سیال و مدل اصطکاکی موتور و مدل احتراقی دو مدل احتراقی و اصطکاکی در عملکرد موتور احتراق جرقه ای بسیار تاثیر گذار بوده و قابل توجه میباشند، بطوریکه در مقاله ذیل اثرات هر یک از آنها در ارتباط با مدلسازی انجام شده در موتور ۱۳۲۳ سی سی پراید انژکتوری مورد بررسی دقیقتر قرار می گیرد.

واژه های کلیدی: مدل سازی موتور، مدل سازی احتراق، اصطکاک موتور

بررسی می شود. از بین نتایج حاصله پارامتر فشار درون سیلندر که غیر وابسته به سرعت پیستون می باشد می تواند بعنوان یک پارامتر مستقل مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد و نزدیکترین شرایط مدل به تست با کمترین میزان خطا مورد تایید قرار گرفته و از آن به بعد می توان مدل ارزیابی و تایید شده را بعنوان مدل پایه ای و مبنا جهت بهینه سازی بکار برده شود.

جدول ۱. اطلاعات استخراج شده از تست موتور ۱۳۲۳ سی سی پراید^۱

N	T(N.m)	P(kw)	MAP (mbar)	CTS (°C)	ATS (°C)	τ (ms)	θ (°CA)	λ	CO	CO2	O2	BSFC Kg/h	BFSC gr/Kw.h
1500	83.1	13	886	75	22	12.1	11	0.947	2.95	12.9	0.95	3.9	300
2000	87.9	18	886	76	22	12.6	11	0.947	2.68	13.1	0.84	5.3	294.4
2500	89.1	23	884	76	21	12.7	18	0.93	3.38	13.1	0.3	6.8	295.6
3000	91.3	28	882	76	21	13	20	0.918	3.11	13.3	0.26	8.2	293
3500	90	33	879	76	19	13.1	23	0.914	3.28	13.2	0.26	9.7	294
4000	88.2	37	881	77	19	13.4	24	0.891	4.14	12.7	0.22	11.4	308
4500	84.7	40	876	77	18	13.8	25	0.869	5.03	12.1	0.24	13.2	330

MAP: Manifold Air Pressure.
 TP: Throttle Position.
 CTS: Coolant Temperature Sensor.
 ATS: Air Temperature Sensor.
 τ : Injection Time.
 θ : Advance Angle.
 $(A/F)_{STOCH} / (A/F)_{REAL}$

۱. مقدمه

جهت انجام مدل سازی ابتدا اطلاعات تست موتور مطابق جدول (۱) ثبت و با توجه به ورودیهای مربوط به هندسه موتور و پارامترهای اجزاء در شرایط تست چون تایمینگ جرقه و سوپاپها، شبیه سازی در محیط Gtise انجام می شود و نتایج اجرا را در محیط Post processing یا Gtpost مشاهده می نمایم سپس جهت تایید نتایج تست و مدل سازی می بایست یکی از پارامترهای اصلی موتور چون بازده حجمی مورد ارزیابی قرار گرفته تا صحت مدل سازی انجام شده را تایید نماید. پس از آن با استفاده از پارامترهای مختلف در مدل های اصطکاکی و مدل احتراقی نتایج خروجی مدل با تست

* رئیس دانشکده مهندسی خودرو دانشگاه علم و صنعت
 * معاون آموزشی پژوهشی و عضو هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت ایران
 دانشکده مهندسی خودرو

Kakae_ah@iust.ac.ir

* دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران دانشکده مهندسی خودرو

hamidsaipa@yahoo.com

سوپاپها و ضرایب جریان هوا در ورودی موتور به ازای مقادیر مختلف برخاستگی سوپاپ می باشد.

۳. مدل سازی احتراق

در این قسمت مدل نرخ آزاد شدن انرژی برای موتور اشتعال جرقه ای با دو مدل تابع ویب و استفاده از آرایه های فشار داخل سیلندر (P-Teta) بررسی می شوند، بطوریکه اشکال (۲) و (۳) و (۴) مقایسه گشتاور، توان و مصرف مخصوص سوخت را در این دو مدل احتراقی با هم را نمایش می دهند.

۳-۱ استفاده از تابع ویب

از تابع ویب ۱ برای محاسبه نرخ آزاد شدن انرژی به ازای زاویه لنگ استفاده می شود.^۳

این تابع که به تابع ریکاردو^۲ نیز معروف است، از طول سوزش و ورودی مستقل پارامترهای تابع شکل برای محاسبه نرخ جرمی سوزش استفاده می کند.

این مدل برای توصیف احتراق سوخت و هوای پیش آمیخته در چرخه احتراق جرقه ای مناسب است. کسر جرم سوخته متراکم به صورت تابعی از زاویه لنگ بصورت زیر تعریف می شود.

$$W = 1 - \exp\left[-AWI \left(\frac{\Delta\theta}{BDUR}\right)^{(WEXP)}\right]$$

W=cumulative mass fraction burned (کسر جرمی مخلوط سوخته شده)

$\Delta\theta$ = زمان سپری شده از احتراق

(crank degrees past start of combustion)

ضریب تابع ویب = AWI

که در آن نرخ احتراق جرقه ای بوسیله سه پارامتر معین شده در مدل کنترل انجام می شود.

● مدت زمان سپری شده بر حسب زاویه لنگ برای سوختن جرم مخلوط ۱۰ الی ۹۰ درصد از مخلوط = BDUR

● توان تابع ویب WEXP

● نقطه ای که ۵۰ درصد سوخت در آن سوخته است، بر حسب زاویه لنگ در بعد از نقطه مرگ بالا

هر چه WEXP بیشتر باشد نرخ آزاد شدن انرژی نیز افزایش می یابد. در مدل سازی انجام شده در این موتور پدیده کوبش لحاظ نشده است.

مقدار پیشنهادی برای ۵۰ درصد جرم سوخته بین ۰ تا ۲۰ اعلام شده است، بطوریکه تغییر آن باعث پس و پیش شدن احتراق در مدل می گردد.

1 Wiebe Function.

2 Recardo.

مقدار پیشنهادی برای ۱۰ تا ۹۰ درصد جرم سوخته بین ۱۰ تا ۵۰ درجه زاویه میل لنگ است، به طوریکه کاهش این زمان حداکثر دما و فشار را تغییر می دهد، زیرا انرژی یکسانی در مدت زمان کوتاهی آزاد می شود.

۲. مدل سازی و ارزیابی بازده حجمی

بازده حجمی از پارامترهای بسیار مهم و تاثیر گذار در عملکرد موتور از جمله گشتاور می باشد. امروزه تلاش مهندسين در طراحی موتور دسترسی به بازده حجمی بالا در تمامی دورها و استفاده حداکثر از حجم جابجایی موتور می باشد.

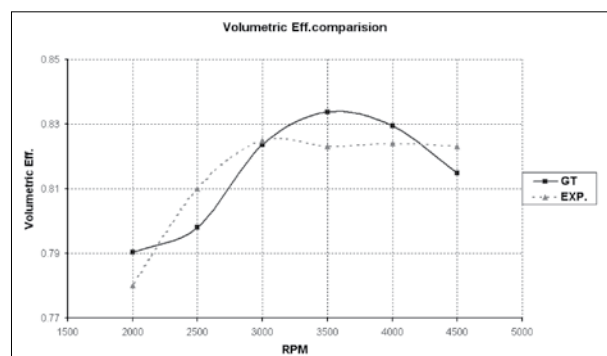
در تعیین بازده حجمی یک موتور مشخصات زیر بایستی تعیین شوند.

● مشخصات کامل هندسی سیستم مکش و تخلیه شامل طول و قطر پورتها و رانرهای ورودی و خروجی، حجم مخزن آرامش، حجم منیفولد ورودی و خروجی، مشخصات هندسی دریچه گاز و طول و قطر تمامی لوله های رابط، مشخصات و زمان بندی و پروفیل برخاستگی سوپاپ های ورودی و خروجی با ضرایب تخلیه و همچنین ضریب تخلیه دریچه گاز.

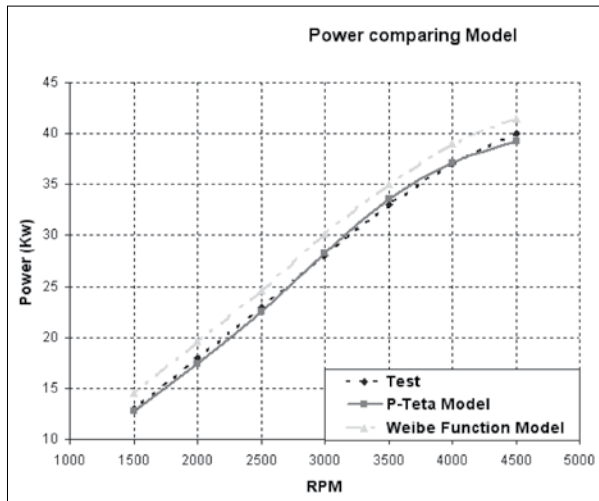
● ضرایب اصطکاک سطوح در قسمت های مختلف جداره لوله برای تعیین افت فشار.

● با توجه به اینکه بازده حجمی تابعی از چگالی هوا می باشد و چگالی هوا نیز به شدت به دما وابسته می باشد بنابراین دمای هوای ورودی به داخل موتور باید مشخص شود. برای رسیدن به این منظور باید دمای هوای محیط و نرخ انتقال حرارت مابین سیال و جداره مسیرهای مختلف ورودی محاسبه گردند و در نرم افزار شبیه سازی لحاظ شوند. بنابراین جهت بالابردن دقت مدل سازی در صورت امکان می بایست دمای جداره های مسیرهای مختلف جریان برای دورهای مختلف از نتایج تست استخراج شود.

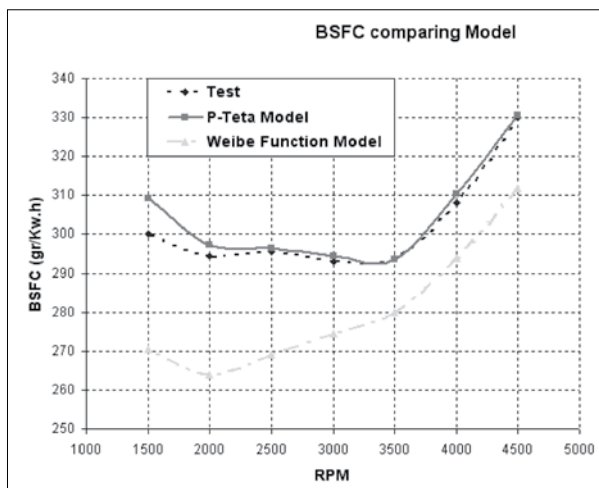
● بازده حجمی به شدت به فشار هوای ورودی به داخل سیلندر وابسته است همانطوریکه می دانیم فشار هوای ورودی به داخل سیلندر در تمام مرحله باز و بسته شدن سوپاپ تغییر می کند. بنابراین باید فشار هوای ورودی در هر لحظه از برخاستگی سوپاپ ورودی و همچنین در لحظاتی که هر دو سوپاپ ورودی و خروجی باز هستند Over lapping را تعیین نمود. تغییرات فشار هوا در ورودی موتور وابسته به حرکت موج فشاری در مسیرهای مختلف موتور می باشد. حرکت موج فشاری نیز تابعی از هندسه مسیرهای مختلف جریان و زمانبندی



شکل ۱. مقایسه بازده حجمی در موتور تست شده و مدل را با حداکثر ۱.۴۸٪ خطا در دور ۲۵۰۰ دور در دقیقه^۲



شکل ۳. نمودار مقایسه توان در مدل تابع ویب و مدل P-Teta با تست



شکل ۴. نمودار مقایسه مصرف مخصوص سوخت در مدل تابع ویب و مدل P-Teta با تست

همانگونه که از شکل (۲) و (۴) مشخص است تطابق نزدیکتر نتایج تست و مدل در دورهای بالا بعلاوه تحلیل یک بعدی جریان در این نرم افزار می باشد، که مویب این مطلب است که اثرات سه بعدی جریان بعلاوه سرعت کمتر سیال و احیانا عدم تشکیل حرکت گردابه ها در دورهای پایینتر کمتر است.

۵. مدل اصطکاک جریان سیال^۱

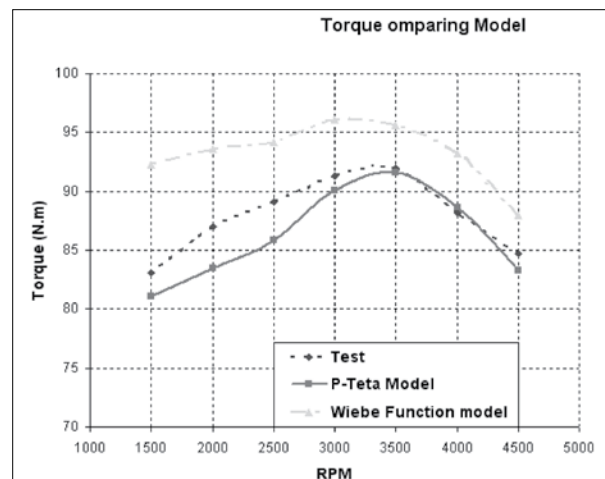
برای محاسبه ضریب اصطکاک سیال و دیواره محاسبات زیر به ترتیب انجام می شوند:

● ابتدا عدد رینولدز سیال محاسبه می شود، $Red = \frac{\rho U D}{\mu}$ که در این رابطه U سرعت لحظه ای سیال، D قطر

مقدار پیشنهادی برای توان WEXP بین ۱ تا ۵ اعلام شده است، که مقدار ۲ در مدل نتایج بهتری را نشان می داد، بطوریکه کاهش این عدد منجر به احتراق آرامتر می گردد.

۲-۳ استفاده از آرایه فشار داخل سیلندر (P-Teta)

با توجه به نتایج خروجی موتور مهمترین پارامتریکی که چگونگی عملکرد یک موتور را نمایش میدهد و حتی موتور سازان نوپای چینی هم با استفاده از داده های موتور سازان دیگر کمپانیها مبادرت به ساخت و کپی سازی موتور ها می نمایند، همان اطلاعات فشار سیلندر بر حسب زاویه گردش میل لنگ می باشد. در مورد موتور پراید این اطلاعات از نتایج تست موتور پراید ۱۳۲۳ سی سی از شرکت مگاموتور استخراج گردیده است. نتایج (P-Teta) در یک فایل فرعی جداگانه در نرم افزار "Gt-Power" بنام فایل مدل احتراقی با توجه به مشخصات هندسه سیلندر، راندمان حجمی و آرایه های فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ و میزان نرخ سوخت ارسالی توسط انژکتور و دمای دیواره سیلندر و همچنین زوایای آدوانس جرقه، قرار داده و اجرا گردید. پس از اجرای آن فایل و Export نتایج خروجی این فایل در یک فایل دیگر بنام فایل Heat Release ذخیره گردید، بطوریکه خروجی آن شامل هفت نرخ انتقال حرارت بنامهای Heat Release 1-1 الی Heat Release 1-7 با توجه به دوران های در نظر گرفته شده موتور از ۱۵۰۰ دور بر دقیقه تا ۴۵۰۰ دور بر دقیقه بود. با کپی کردن مقادیر نرخ های انتقال حرارت در فایل اصلی مدل و ملحوظ نمودن ضریب انتقال حرارت که در فایل خروجی مدل احتراقی حاصل می شود، می توان آرایه ضریب انتقال حرارت موسوم به Cumulative Heat Transfer را در دورهای مختلف را بدست آورد و در فایل اصلی مدل موتور پراید قرار داد. نتایج حاصل از این مدل سازی و تطابق با موتور تست شده در اشکال (۲) و (۳) و (۴) آورده شده است.



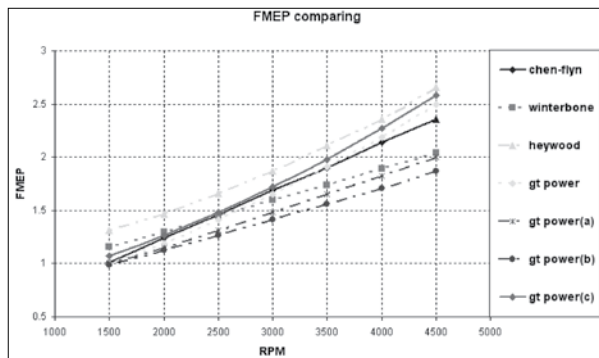
شکل ۲. نمودار مقایسه گشتاور در مدل تابع ویب و مدل P-Teta با تست

جدول ۲. حالت‌های انتخابی ریز پارامترهای اصطکاک موتور با توجه به درصد خطای مدل و تست

Constant of FMEP	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
Peak Cyl. Factor	0.004	0.005	0.006	0.004	0.005	0.006	0.004	0.005	0.006
Mean Speed Factor	0.08	0.09	0.1	0.08	0.09	0.1	0.08	0.09	0.1
Mean Speed Factor Squared	0.0006	0.0009	0.0012	0.0006	0.0009	0.0012	0.0006	0.0009	0.0012
%Err. Of Torque @3000rpm	-0.19%	-1.80%	-3.43%	-1.34%	-3%	-4.60%	-2.50%	-4.12%	-5.7%
%Err. Of Power @3000rpm	2.19%	0.57%	-1.09%	1.04%	-0.60%	-2.30%	-0.12%	-1.80%	-3.6%

جدول ۳. انتخاب یکی از چهار حالتی که کمترین میزان انحراف را در نرم افزار Gt-Power دارد

Parametr's	Gt power	Gt power(a)	Gt power(b)	Gt power(c)
Constant of MEP	0.4	0.4	0.4	0.4
Peak Cyl. Factor	0.004	0.004	0.005	0.006
Mean Speed Factor	0.08	0.1	0.09	0.08
Mean Speed Factor Squard	0.0006	0.0012	0.0009	0.0006



شکل ۵. نمودار مقایسه مدل‌های مختلف اصطکاک موتور

با مقایسه نتایج شکل (۵) به این نتیجه می‌رسیم که مدل انتخابی در Gt Power با مدل چن فلاین در اکثر دورها همخوانی دارد و بسیار به آن نزدیک است.

۶. نتیجه گیری

از مقایسه دو مدل احتراقی تابع ویب و فشار داخل سیلندر مدل فشار داخل سیلندر خصوصاً در دورهای بالای ۳۰۰۰ دور بر دقیقه بسیار به نتایج تست نزدیک بود، که خود دلیلی بر این مطلب است که در اعداد رینولدز بالاتر اثرات سه بعدی جریان سیال چون گردابه‌ها کمتر شده و اثر یک بعدی بودن سیال در دوره‌های بالاتر به جواب نزدیکتری می‌شود. همچنین مطابق شکل (۵) از بین مدل‌های اصطکاک مدل تجربی ارابه شده در مرجع هیوود که در مورد موتورهای بنزینی ۸۵۰ الی ۲۰۰۰ سی سی مصداق دارد، مقدار اصطکاک بیشتری را در تمامی دورها در نظر می‌گیرد و مدل اصطکاک وینتر بون در دوره‌های پایین تطابق بیشتری با تست داشته ولی در دوره‌های بالاتر مقدار آن بتدریج کمتر از حالت تست می‌شود، نهایتاً مدل اصطکاک چن فلاین با مدل در نظر گرفته شده در حالت‌های a و b (Gt-Power) و (Gt-Power) c

لوله، چگالی لحظه ای و ویسکوزیته سیال می‌باشد. ضخامت لایه مرزی که وابسته به رژیم جریان می‌باشد از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta = .10D$$

$$\delta = .25D$$

برای اعداد رینولدز بالای ۴۰۰۰ ضریب اصطکاک Cf از روش زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{C_f}{2} = .027 Re_{\delta}^{-.025}$$

1. Modeling of pipe wall friction

برای اعداد رینولدز زیر ۴۰۰۰ ضریب اصطکاک Cf بصورت زیر خواهد بود:

$$\frac{C_f}{2} = \frac{4}{Re_{\delta}}$$

از آنجایی که می‌دانیم ویسکوزیته دینامیکی به شدت وابسته به دما بوده و با تغییر آن تغییرات قابل توجهی خواهیم داشت. ویسکوزیته دینامیکی هوا به صورت تابعی از دما به روش زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu = 33 \times 10^{-6} \times T^{.7} [Kg / m / s]$$

که در این رابطه T دما در هر لحظه می‌باشد.

مدلسازی اصطکاک موتور

همان طوری که قبلاً هم اشاره شد یکی از پارامترهای مهمی که در عملکرد موتور تاثیر بسزایی دارد اصطکاک موتور است، در این مرحله به بررسی مدل‌های اصطکاک موتور و مقایسه آنها با هم پرداخته می‌شود. انواع مدل‌های اصطکاک معمول بکار رفته در موتور SI سه مدل ارابه شده در ذیل می‌باشند و مدل چهارم که توسط نرم افزار Gt-Power معرفی شده است از رابطه زیر تبعیت می‌کند.

$$FMEP = \text{constant part of FMEP} + (\text{Peak cylinder pressure factor}) * \text{pressure max.cylinder} + (\text{mean piston speed factor}) * \text{speed mean.piston} + (\text{Mean piston speed squared factor}) * \text{speed 2 mean.piston}$$

که:

$$\text{Constant part of FEMP. (bar) } 0.5 - 0.3$$

$$\text{Peak Cylinder Pressure Factor } 0.004 - 0.006$$

$$\text{Mean Piston Speed Factor. bar/(m/s) } 0.08 - 0.1$$

$$\text{Mean piston speed squared factor. bar/(m/s}^2) 0.0006 - 0.0012$$

انواع مدل‌های اصطکاک معمول بکار رفته در موتور SI بشرح ذیل می‌باشد

$$1- \text{ مدل چن فلاین: } FMEP_{(bar)} = 0.137 + (P_{max} / 200) + 0.162 v_p (m / s)$$

$$2- \text{ مدل وینتر بون: } FMEP = 0.061 + (P_{max} / 60) + 0.294 (N / 1000)$$

$$3- \text{ مدل تجربی هیوود: } FMEP = 0.97 + 0.15 (N / 1000) + 0.05 (N / 1000)^2$$

$$4- \text{ مدل Gt power: } FMEP = 0.97 + 0.15 (N / 1000) + 0.05 (N / 1000)^2$$

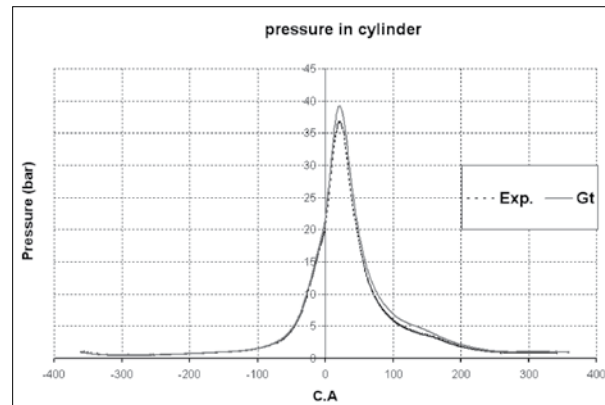
به دلیل اهمیت این پارامتر یک مقایسه کلی مطابق جدول (۱) روی ریز پارامترهای اصطکاک موتور با توجه به مدل ارابه شده در نرم افزار Gt-Power نیز انجام شده است.

مناسبی را بین تست و مدل آرایه می دهد، بطوریکه بخش اعظم از این افزایش مقدار مربوط به فرضیات ساده کننده مدلینگ می باشد.

منابع

- [1] Mega Motor co. engineering dept.
- [2] Report AV/2005/05 Project No.AV 6123 From SCHRICK CO.member of the AVL group.
- [3] Annand W.J.D,B.Sc G.E.Roe M.A Phd. Gas Flow in the Internal Combustion Engine, Hassner Publishing,Inc. 1991.
- [4] Gt-Power Software Reference.
- [5] Stone Richard, Introduction to international combustion engines, 1999
- [6] Heywood John B., Internal Combustion Engine Fundamental, 1988.
- [7] G. H. Abd Alla, Computer Simulation of a Four Stroke Spark Ignition Engine, Energy Conservation and Management, Vol. 43, Issue 8, May 2002, pp. 1043-106.

c (Gt-Power) بیشترین تطابق را با حالت Gt-Power دارد. پس از لحاظ نمودن مدل احتراقی فشار داخل سیلندر و مدل اصطکاکی Gt-Power پارامتر مهم فشار داخل سیلندر که مستقل از دور موتور است مطابق شکل (۶) با انحراف ۶٫۲ درصدی در نقطه پیک منحنی، تطابق



شکل ۶. نمودار تطابق فشار داخل سیلندر در مدل و تست