

# بررسی تجربی نوسانات فشار و تلفات اصطکاکی ناشی از افت تلمبه‌ای در فضای محفظه لنگ

محمد علی احترام

دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
سرپرست کارگروه دوفازی مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو (ایپکو)  
ali\_ehteram@aut.ac.ir

مهدی احمدی

رئیس اداره کل محاسبات مهندسی  
شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)  
m\_ahmadi@ip-co.com

حسن بصیرت تبریزی\*

استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
hbasirat@aut.ac.ir

سید مصطفی میرسلیم

استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
mo\_mirsalim@aut.ac.ir

سید شهاب الدین علویون

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک  
شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)  
sh\_alaviyoun@ip-co.com

\* نویسنده مسئول تاریخ دریافت: ۹۰۰۴۲۷ پذیرش نهایی مقاله: ۹۰۰۶۳۰

## چکیده

حرکت رفت و برگشتی سمبه موجب ایجاد تراکم و انبساط و حرکت سیال در داخل محفظه لنگ می‌شود. انرژی اتلافی حاصل از این حرکت یکی از عوامل کاهش بازدهی به شمار می‌آید. در این تحقیق افت اصطکاکی و نوسانات فشار در محفظه لنگ به صورت تجربی و عددی برآورد می‌شود. به منظور بررسی مقدار دامنه نوسانات فشار، مقادیر فشار زیر سمبه‌ها با حساسه فشار پیزوالکتریک با بسامد ۸۰ کیلوهرتز با تغییرات زاویه لنگ اندازه‌گیری می‌شود. مقایسه نتایج نشان دهنده قابلیت خوب الگوهای یک‌بعدی برای شبیه‌سازی نوسانات فشار و افت تلمبه‌ای در محفظه لنگ به خصوص برای سرعت‌های کم در صورت در نظر گرفتن تاثیر حرکت میل‌لنگ می‌باشد. با افزایش سرعت و محسوس‌تر شدن تاثیر چرخش میل‌لنگ، تفاوت پیش بینی الگوی یک‌بعدی با آزمایش تجربی بیشتر می‌شود. در این تحقیق با پیشنهاد یک مدل اصلاحی برای در نظر گرفتن تغییر مساحت ناشی از حرکت میل‌لنگ، خطای شبیه‌سازی یک بعدی تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. همچنین مساحت پنجره رابط فضای زیر استوانه‌ها بسته شده و تاثیر این بسته شدن در افت تلمبه‌ای دیده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، در سرعت‌های کم، بسامد نوسانات فشار محفظه لنگ، دو برابر بسامد ناشی از سرعت موتور و در سرعت‌های زیاد برابر بسامد ناشی از سرعت می‌شود. همچنین با افزایش سرعت موتور، دامنه نوسانات به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. در عین حال کاهش مساحت رابط زیر استوانه‌ها سبب افزایش چشمگیر میزان افت تلمبه‌ای موتور می‌شود.

کلید واژه‌ها: افت تلمبه‌ای، پنجره‌های تهویه، فشار محفظه لنگ، شبیه‌سازی یک‌بعدی

## ۱- مقدمه

امروزه با توسعه دانش طراحی و افزایش قیمت سوخت، تلاش‌ها برای کاهش هرچه بیشتر اتلافات در موتور افزایش یافته است.

انرژی اتلافی ناشی از تأثیر حرکت رفت و برگشتی سمبه بر حرکت گاز داخل محفظه لنگ، یکی از عوامل کاهش بازدهی موتور به شمار می‌آید. بررسی تغییرات فشار داخل محفظه لنگ و بررسی افت تلمبه‌ای ناشی از حرکت افقی گاز (افت تلمبه‌ای<sup>۱</sup> موجود در محفظه لنگ) از مواردی است که به صورت الگوهای ترمودینامیکی یک‌بعدی [۳-۱] و به صورت سه‌بعدی [۴] شبیه‌سازی و با روش‌های تجربی [۵-۸] اندازه‌گیری شده است. از قدیمی‌ترین پژوهش‌ها در زمینه شبیه‌سازی فشار محفظه لنگ می‌توان به پژوهش هاردنبرگ [۱] اشاره کرد. او یک الگوی ساده شده را در این رابطه ارائه کرد.

رانگاتان [۲]، الگوی یک‌بعدی برای محاسبه افت تلمبه‌ای و تغییرات حالت برای جریان داخل محفظه میل‌لنگ ارائه و نتایج را برای موتورهای V شکل و موتور تک استوانه‌ای اعتبارسنجی کرد. همچنین دیقان [۳] با استفاده از نرم افزار تجاری ریکاردو -ویو<sup>۲</sup>، (نرم افزار شبیه‌سازی یک‌بعدی) تغییرات فشار و افت‌های اصطکاکی را برای موتورهای مسابقه‌ای شبیه‌سازی و تأثیر حجم زیر سمبه و مساحت عبور گازها را در این موتورها بررسی کرده است. او تأثیر گازهای نشستی از کنار حلقه‌ها را روی تغییرات فشار ناچیز فرض کرده و تنها تأثیر آن را در فشار میانگین محفظه لنگ معرفی کرده است. بر اساس بررسی دیقان، میزان افت اصطکاکی ناشی از تهویه در موتورهای مسابقه‌ای بدلیل دور بالای آنها درصد قابل توجهی از اصطکاک موتور را شامل می‌شود. همچنین ضعف اصلی کار دیقان عدم مقایسه نتایج با نتایج تجربی مربوط به فشار لحظه‌ای و کار اتلافی می‌باشد.

در شبیه‌سازی‌های یک‌بعدی که تا به حال انجام شده، از تأثیر حرکت میل‌لنگ بر مساحت عبوری و اغتشاش جریان صرف نظر شده که خطای زیادی را به خصوص در دوره‌های بالا ایجاد می‌کند. به منظور رفع این ضعف شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی در برخی از تحقیقات انجام شده است.

باید توجه داشت که حرکت سیال داخل محفظه لنگ، کاملاً سه‌بعدی و آشفته است.

برای مثال ادلبور در پایان نامه خود، نرم افزار فایر<sup>۳</sup> را به منظور شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان در محفظه لنگ توسعه داده است [۴]. برای این منظور او از هندسه ساده برای میل‌لنگ و شبکه بندی پویا برای حل بهره برده است اما نتایج خود را با نتایج تجربی مقایسه نکرده است.

باید توجه داشت ایجاد تغییرات جهت بهینه سازی و بهبود، در الگوهای سه‌بعدی نسبت به الگوی یک‌بعدی بسیار هزینه‌بر تر است.

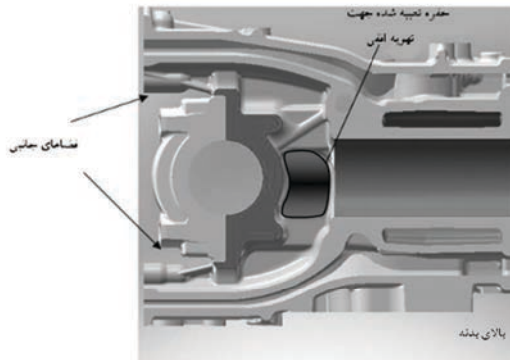
با توجه تحقیقات انجام شده، افت تلمبه‌ای ناشی از حرکت سیال در فضای زیر استوانه‌ها به خصوص در سرعت‌های زیاد می‌تواند درصدی از اصطکاک کل موتور را تشکیل دهد. در صورتی که حجم جابجا شده از سیال نتواند از فضای زیر سمبه خارج شود، دامنه تغییرات فشار داخل محفظه لنگ افزایش می‌یابد. از آنجاکه که قسمتی از فضای محفظه لنگ با میل‌لنگ و سطح روغن پر می‌شود، در بیشتر موتورهای جدید بنزینی که بیشتر از یک استوانه دارند، پنجره‌هایی را در بدنه، بالای یاتاقان‌های میل‌لنگ جهت جابجا شدن هوا در فضای زیر سمبه‌ها در نظر می‌گیرند. مساحت پنجره‌های تهویه با توجه به میزان تحمل بدنه موتور در مقابل تنش‌های خستگی و میزان افت تلمبه‌ای ناشی از تهویه افقی مشخص می‌شود. افت تلمبه‌ای تهویه افقی، ناشی از حرکت سیال از میان پنجره‌های تهویه<sup>۴</sup> می‌باشد. با وجود تحقیقات مختلفی که روی عوامل اصطکاک مکانیکی مجموعه سمبه و دسته سمبه موتور ملی انجام شده، مانند [۹]، تحقیقاتی روی افت تلمبه‌ای موتور انجام نشده است.

همچنین باید توجه داشت مطالعه و دید کافی روی تغییرات حالت گاز و بسامد نوسانات فشار در مسیر تهویه میل‌لنگ برای طراحی جداساز روغن که یکی از اجزای سامانه تهویه محفظه لنگ می‌باشد، ضروری است.

در این مقاله ابتدا نحوه شبیه‌سازی حرکت سمبه و سپس معادلات یک‌بعدی حاکم بر مساله بیان شده است. باید توجه داشت که مهمترین نکته برای یک شبیه‌سازی ترمودینامیکی خوب، ساده‌سازی و اعمال فرضیات درست برای معادلات است. در صورتی که این معادلات به درستی ساده‌سازی شود، می‌تواند در عین تسهیل در فهم مساله، طراح را از انجام محاسبات پیچیده عددی بی‌نیاز نماید. در ادامه نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی که در حالت موتورگردانی و با اندازه‌گیری فشار لحظه‌ای محفظه لنگ انجام شده، مقایسه شده است. شبیه‌سازی‌های

۳- AVL Fire  
۴- Ventilation Hole

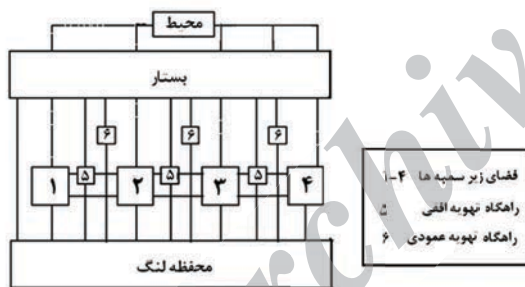
۱- Pumping loss  
۲- Ricardo WAVE



شکل ۲ نمایش پنجره تهویه افقی و فضاهای جانبی تهویه محفظه لنگ موتور ملی

به منظور شبیه‌سازی عددی، مسیر تهویه محفظه لنگ به اجزاء کوچکتری که هر کدام نقش یک حجم ترمودینامیکی را ایفا می‌کنند تقسیم می‌شود.

در شکل ۳ نحوه ارتباط حجم‌های در نظر گرفته شده نشان داده شده است.



شکل ۳ نحوه‌ی ارتباط تقسیم‌بندی مسیر تهویه محفظه لنگ به حجم محدود

به منظور شبیه‌سازی تبادل جرم در فضای زیر سمبه در طی حرکت آن (حجم‌های ۱ تا ۴ در شکل ۳) حرکت سمبه را به ازاء تغییرات بسیار کوچک در زاویه میل لنگ به دو مرحله تقسیم بندی می‌کنیم.

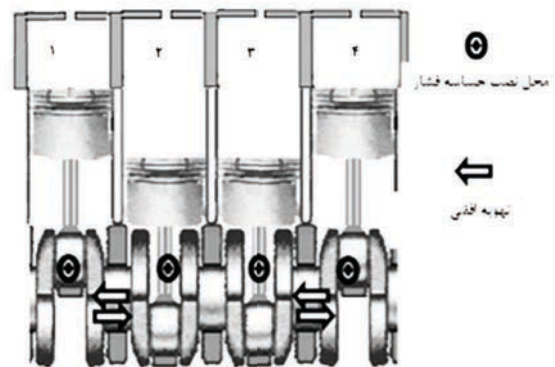
- ۱- سمبه ثابت است و مخلوط که فشرده شده است، خارج می‌شود.
  - ۲- سمبه در یک فرآیند شبه تعادلی و پلی‌تروپیک پایین می‌آید (یا بالا می‌رود) ولی جرمی از فضای زیر سمبه خارج نمی‌شود.
- این تقسیم‌بندی صرفاً برای تغییرات کوچک در زاویه لنگ صحیح به نظر می‌رسد. با جمع نتایج بدست آمده از این فرایندهای پیاپی،

یک‌بعدی انجام شده در مقالات مربوط به موتورهای وی (V) شکل، تک‌استوانه‌ای و یا مایل بوده به طوری که از تاثیر چرخش میل لنگ بر بسته شدن فضای عبور گاز در آنها صرف نظر شده است. در این پژوهش، برخلاف سایر پژوهش‌های یک‌بعدی انجام شده، به علت بررسی یک موتور خطی ۴ استوانه‌ای و نزدیکی میل لنگ به محل سوراخ تهویه، چرخش میل لنگ نیز شبیه‌سازی شده و اثر این الگو بر بهبود نتایج بررسی شده است.

## ۲- شبیه‌سازی تغییرات فشار

در این بخش فرضیات و روش انجام شبیه‌سازی یک بعدی نوسانات فشار در فضای پایینی هر استوانه تشریح شده است. تغییرات فشار در زیر هر سمبه علاوه بر اینکه تابع حرکت آن است، بدلیل وجود جریان جانبی در محفظه لنگ تابع حرکت سایر سمبه‌ها نیز می‌باشد.

در یک موتور ۴ استوانه‌ای خطی تغییرات فشار محفظه لنگ متأثر از حرکت هم‌زمان سمبه‌های ۱ و ۴ در کنار حرکت خلاف جهت سمبه‌های ۲ و ۳ می‌باشد (شکل ۱).

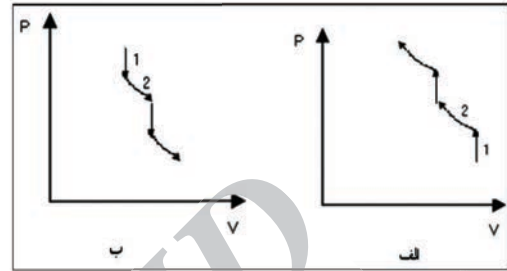


شکل ۱ نمایش تهویه افقی و محل‌های نصب حساسه فشار در محفظه لنگ

عبور جریان افقی تابع مساحت ناحیه رابط بین فضای زیر استوانه‌ها می‌باشد. این فضاها شامل پنجره تهویه در بالای یاتاقان و فضای میانی یاتاقان و سطح روغن (فضای جانبی) می‌باشد (شکل ۲).

منحنی‌های تغییرات فشار با زاویه لنگ بدست می‌آید.

منحنی تغییرات فشار بر حسب حجم در بالا رفتن و پایین آمدن سمبه به صورت شکل ۴ در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۴ فرایندهای در نظر گرفته شده الف - پایین آمدن سمبه ب- بالا رفتن سمبه (فرایند ۱ هم حجم و فرایند ۲ ایزتروپیک)

همچنین عبور جریان از یک فضا به فضا دیگر توسط معادله روزنه و با توجه به مساحت رابط بین فضاها پایش می‌شود. در صورتی که جریان قابل تراکم باشد معادله تغییرات جریان جرمی به صورت (۵) بیان می‌شود.

$$\frac{\partial m_i}{\partial \theta} = \frac{C_d P_i A_s}{6N} \sqrt{\frac{2}{RK_i T_i}} \sqrt{\frac{k}{k-1} \left[ \left(\frac{P_e}{P_i}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_e}{P_i}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (5)$$

در معادله (۵)  $A_s$ ، سطح مقطع مؤثر عبور جریان است. به منظور بررسی تاثیر حرکت میل لنگ بر مساحت مؤثر عبور جریان، معادله‌ی (۶) که با توجه به شکل و نوع حرکت میل لنگ تقریب زده شده، در این پژوهش به این صورت معرفی شده است.

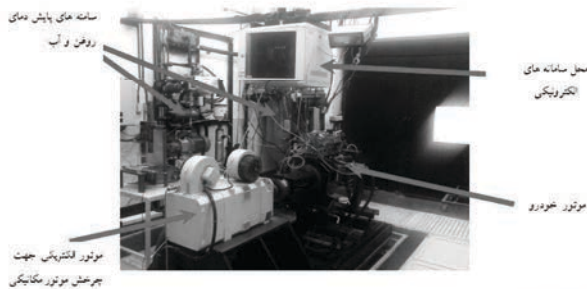
$$A_s = (A_L + A_v) |\sin(\theta)| + \frac{A_L}{2} \quad (6)$$

در معادله (۶)  $A_v$ ،  $A_L$ ،  $\theta$  به ترتیب سطح مقطع مساحت جانبی، سطح مساحت پنجره تهویه و زاویه میل لنگ می‌باشند. منظور از مساحت جانبی، مساحت و فضای بالای سطح روغن (یا قاب نردبانی) است که هوا می‌تواند در کنار پنجره تهویه از آن عبور کند (شکل ۲). نکته مهم در مورد معادلات ترمودینامیکی بیان شده این است که تاثیر آشفته‌گی جریان ناشی از حرکت سمبه‌ها و اجزاء متحرک در این معادلات دیده نمی‌شود.

### ۳- نحوه آزمایش تجربی

به منظور کسب معیار لازم برای اعتبارسنجی الگوی ارائه شده از آزمایشی با هدف اندازه‌گیری لحظه‌ای فشار زیر استوانه‌ها انجام شد. در این بخش روش انجام آزمایش شرح داده می‌شود.

آزمایش تجربی در اتاق آزمایش اصطکاکی مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو انجام شده است. دمای آب و فشار و دمای روغن در همه سرعت‌ها با پایشگر، ثابت نگه داشته شده است (شکل ۵).



شکل ۵ نمایش اجزاء اتاق آزمایش موتورگردانی مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو

به دلیل تعادل دمایی جریان در محفظه لنگ با بدنه آن (اگر این تعادل در نظر گرفته نشود میزان دمای محفظه لنگ با زمان به دلیل افزایش کار اصطکاکی افزایش می‌یابد)، فرض شده که همه میزان کار اتلافی ناشی از تهویه محفظه لنگ با میزان حرارتی که کل مجموعه از دست می‌دهد برابر است. در بیان معادلات حاکم بر سامانه به جای تغییرات زمانی از تغییرات بر مبنای زاویه لنگ استفاده شده است. معادلات حاکم بر مساله بدین صورت قابل بیان می‌باشد.

۱- معادله بقای جرم

$$\frac{\partial m_{cv}}{\partial \theta} = \sum_i \frac{\partial m_i}{\partial \theta} - \sum_e \frac{\partial m_e}{\partial \theta} \quad (1)$$

۲- معادله بقای انرژی

$$\frac{\partial Q_{cv}}{\partial \theta} + \sum_i \frac{\partial (mh)_i}{\partial \theta} - \sum_e \frac{\partial (mh)_e}{\partial \theta} = \frac{\partial (mu)_{cv}}{\partial \theta} + \frac{\partial W_{cv}}{\partial \theta} \quad (2)$$

۳- قانون حالت برای گاز ایده‌آل

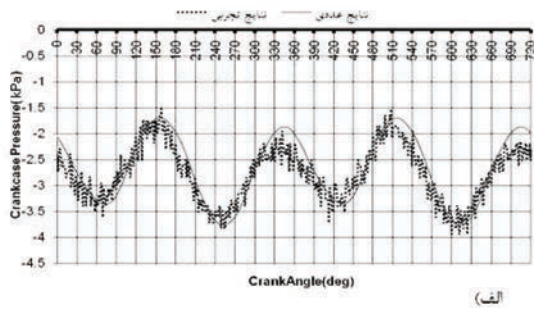
$$PV = m_{cv} RT \quad (3)$$

۴- تغییرات فشار و حجم که به صورت پلی‌تروپیک برای هوا ( $n=1.4$ ) در نظر گرفته شده است

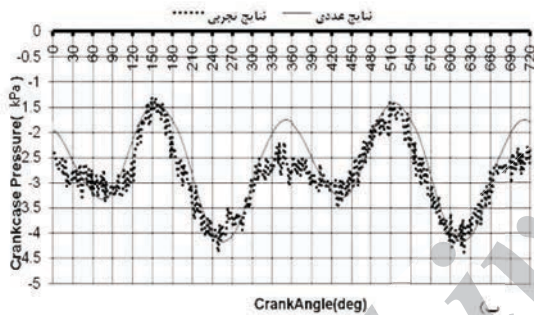
$$PV^n = cte \quad (4)$$

(استوانه ۱) دارد.

در شکل ۹ نتایج عددی با و بدون در نظر گرفتن اثر میل لنگ ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، در نظر گرفتن تاثیر حرکت میل لنگ تا حد قابل قبولی سبب نزدیکی نتایج شبیه سازی به نتایج تجربی به خصوص در سرعت های بالای ۴۰۰۰ د.د.د می شود (خطای بیشینه ۱۰ درصدی).

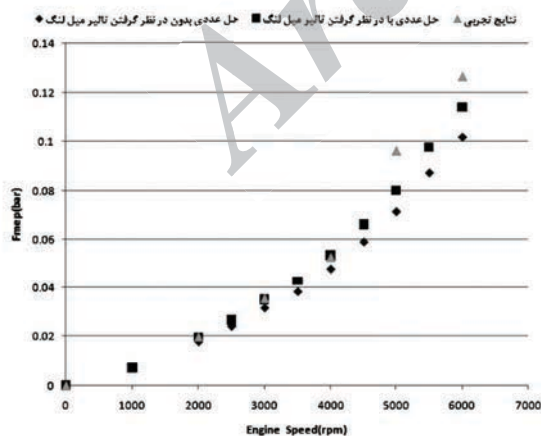


(الف)



(ب)

**شکل ۸** نمایش فشار در فضای زیر استوانه های مختلف که از حل عددی بدست آمده (الف) دور ۲۰۰۰ د.د.د (ب) ۳۰۰۰ د.د.د.

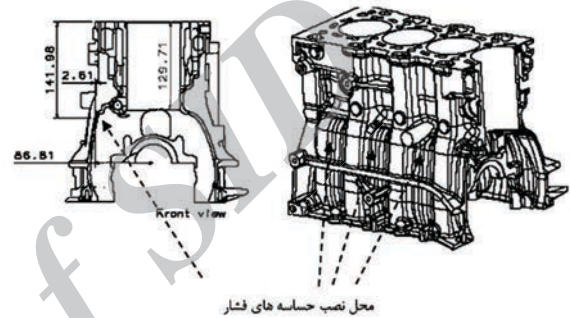


**شکل ۹** مقایسه نتایج شبیه سازی و نتایج تجربی بدست آمده برای افت تلمبه ای محفظه لنگ در دورهای مختلف



**شکل ۶** حساسه فشار پیزو Kistler

در شکل ۷ نوع حساسه فشار و در شکل ۷ محل نصب حساسه فشار نشان داده شده است.



محل نصب حساسه های فشار

**شکل ۷** نمایش محل نصب سنسورهای فشار

موتور مورد استفاده موتور ملی (ای-اف-۷) است که مشخصات ابعادی آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

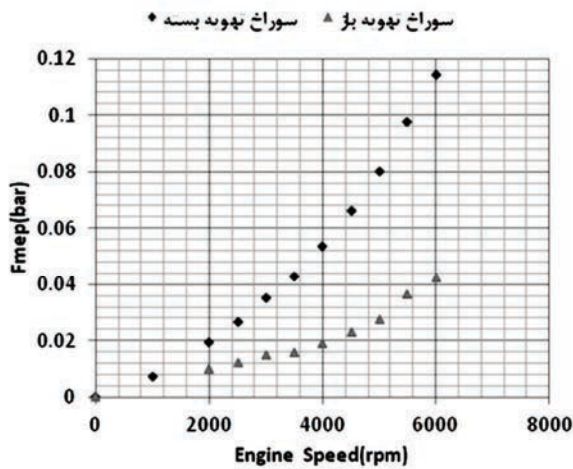
**جدول ۱** مشخصات فیزیکی موتور

a(m)	B(m)	L(m)	r
۰/۰۵	۰/۱	۰/۲۲	۱/۳

آزمایش تجربی از سرعت ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ د.د.د انجام شده است. به منظور بررسی تاثیر میزان مساحت پنجره تهویه، در یک مرحله این پنجره با ساز و کار صفحه و پیچ بسته شده است. قطر معادل پنجره تهویه برای موتور ملی ۴۵ میلیمتر می باشد.

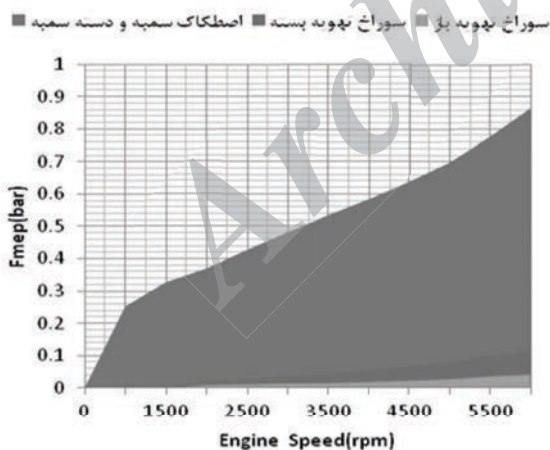
#### ۴- مقایسه و بررسی نتایج

در این بخش ابتدا نتایج شبیه سازی و نتایج تجربی مقایسه و سپس میزان افت تلمبه ای بدست آمده در موتور در کنار نوسانات فشار تحلیل می شود. با توجه به شکل ۸، میزان فشار محاسبه شده با روش عددی انطباق خوبی با نتایج اندازه گیری شده برای سرعت ۳۰۰۰ و ۲۰۰۰ د.د.د



شکل ۱۱ بررسی تاثیر بسته شدن پنجره تهویه در افت تلمبه‌ای تهویه افقی محفظه لنگ

به منظور بررسی اهمیت افت تلمبه‌ای در موتور، در شکل ۱۲ میزان افت تلمبه‌ای در محفظه لنگ در مقایسه با اصطکاک مجموعه سمبه و دسته سمبه برای موتور ملی نشان داده شده است. باید توجه داشت که در هنگام آزمایش اصطکاکی معمولاً افت تلمبه‌ای محفظه لنگ در اصطکاک سمبه و دسته سمبه نهفته است به طوری که با حذف سمبه، علاوه بر حذف اصطکاک تماسی حلقه‌ها، افت تلمبه‌ای نیز ناچاراً حذف می‌شود.

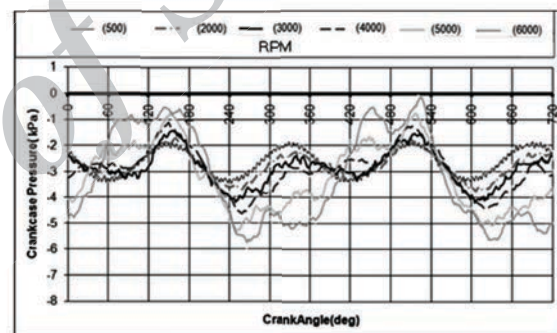


شکل ۱۲ بررسی میزان نقش افت تلمبه‌ای در افت اصطکاکی مجموعه سمبه و دسته سمبه موتور ملی

با توجه به این شکل، افت تلمبه‌ای محفظه لنگ در حالتی که سوراخ تهویه بسته است تا ۱۲ درصد و در حالتی که باز است تا ۶ درصد از اصطکاک مجموعه‌ای سمبه و دسته سمبه را تشکیل می‌دهد.

با توجه به مقایسه انجام شده، الگوی پیشنهادی برای در نظر گرفتن اثر حرکت میل‌لنگ تا حد قابل قبولی سبب بهبود نتایج عددی می‌شود. اما بدلیل محدودیت الگویی ترمودینامیکی ارائه شده در دخیل کردن اثر آشفته‌گی جریان به خصوص در شبیه‌سازی فضاهای جانبی و همچنین عدم توانایی تخمین دقیق ضریب  $C_d$  (در معادله ۵) خطایی معادل ۱۰ درصد در دوره‌های بالا دیده می‌شود. البته مقدار پیش‌بینی شده از مقدار اندازه‌گیری شده کمتر است. بنابراین در صورت استفاده از این الگو برای شبیه‌سازی موتور در مرحله طراحی مفهومی باید ضریب اطمینانی معادل ده درصد برای اصطکاک ناشی از تهویه دیده شود.

در شکل ۱۰ نوسانات فشار در دوره‌های مختلف نشان داده شده است. افزایش دور علاوه بر افزایش دامنه نوسانات فشار، شکل منحنی فشار را نیز تغییر می‌دهد.



شکل ۱۰ میزان نوسانات فشار اندازه‌گیری شده در زیر سمبه اول در دوره‌های مختلف بر حسب زاویه لنگ

افت تلمبه‌ای تهویه محفظه لنگ از انتگرال‌گیری فشار اندازه‌گیری شده بر حسب حجم جابجایی زیر سمبه بدست می‌آید. به منظور بررسی بیشتر تاثیر مساحت پنجره‌های تهویه، این پنجره‌ها یک بار در موتور مسدود شده‌اند. میزان تغییر افت تلمبه‌ای ناشی از مسدود شدن پنجره‌های تهویه که با استفاده از شبیه‌سازی عددی بدست آمده در شکل ۱۱ در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این نمودار مسدود شدن پنجره‌های تهویه افقی می‌تواند میزان افت تلمبه‌ای را در محفظه لنگ تا ۲ برابر افزایش دهد. همچنین افزایش سرعت سبب بیشتر شدن تاثیر پنجره‌های تهویه می‌شود، بنابراین به خصوص در موتورهای سرعت بالا معمولاً لازم است که در طراحی این پنجره‌ها دقت لازم در نظر گرفته شود.

یک الگوی اصلاحی میزان مساحت موثر عبور جریان که به دلیل حرکت میل‌لنگ تغییر می‌کند اصلاح شود. اعمال الگوی اصلاحی سبب بهبود نتایج تا رسیدن به خطای حداکثری ۱۰٪ در دوره‌های بالا شد. علت وجود این خطا در نظر نگرفتن آشفته‌گی جریان و ثابت در نظر گرفت ضریب تخلیه می‌باشد که اصلاح آن مستلزم استفاده از حل‌های سه‌بعدی است. همچنین مساحت رابط زیر استوانه‌ها بسته و تاثیر این بسته شدن در افزایش افت تلمبه‌ای دیده شد. با افزایش سرعت، دامنه نوسانات به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. در عین حال کاهش مساحت رابط زیر استوانه‌ها سبب افزایش چشمگیر میزان اصطکاک موتور تا ۶٪ می‌شود. بنابراین لازم است در موتورهای ۴ استوانه‌ای خطی محاسبات لازم جهت عبور جریان جانبی در نظر گرفته شود.

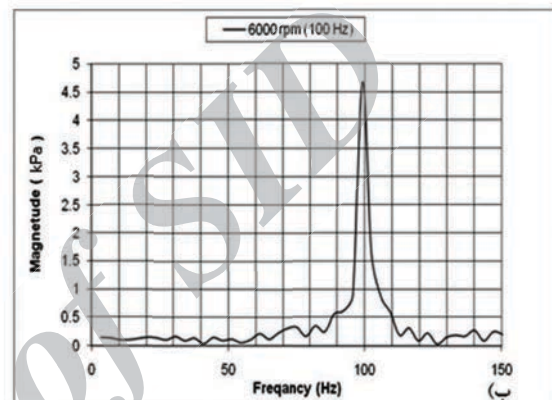
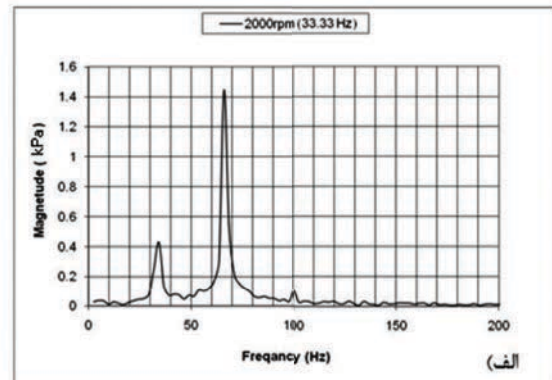
در عین حال، با توجه به نتایج به دست آمده، در سرعت‌های کم، بسامد نوسانات فشار محفظه لنگ، دو برابر بسامد ناشی از سرعت موتور و در سرعت‌های زیاد برابر بسامد ناشی از سرعت می‌شود. علت این پدیده این است که حجم محفظه لنگ به دلیل حرکت سمبه‌ها (سمبه‌ها طبق ساختار لنگ لغزنده حرکت می‌کنند و هم زمان دو سمبه به سمت بالا و دو سمبه با سرعتی متفاوت به سمت پایین در حرکت هستند) متغیر است و با تقریباً دو برابر بسامد موتور تغییر می‌کنند. در نتیجه فشار در کل محفظه لنگ نیز تحت تاثیر آن دارای نوسانی با بسامد دوبرابر است. با افزایش سرعت موتور، به علت افزایش سرعت عبور گازها از پنجره تهویه و زمان کم موجود برای عبور گاز، فضای زیر سمبه‌ها همانند یک موتور تک استوانه‌ای عمل می‌کند و بسامد فشار زیر سمبه‌ها با بسامد موتور یکی می‌شود.

### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو (ایپکو) و مهندس سید وحید حسینی جهت حمایت از این پژوهش قدردانی می‌شود.

### فهرست علائم

$A_s$	مساحت عبور جریان، $m^2$
$A_L$	مساحت جانبی
$A_v$	مساحت پنجره تهویه
$a$	طول لنگ، $m$
$B$	شعاع سمبه، $m$
$C_d$	ضریب تخلیه



شکل ۱۳ نتایج ناشی از تبدیل فوریه نوسانات فشار در زیر سمبه اول الف) در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د ب) در سرعت ۶۰۰۰ د.د.د

یکی از اهداف این تحقیق، در کنار بررسی میزان افت اصطکاک، بررسی تاثیر بسامد نوسانات فشار محفظه لنگ به دلیل تاثیر آن بر ایجاد نوسانات دبی گازهای ناشی موتور در حالت کارکرد عادی است. بنابراین از توزیع فشار اندازه‌گیری شده زیر استوانه ۱ در دو دور ۲۰۰۰ و ۶۰۰۰ د.د.د تبدیل فوریه سریع گرفته شده است. بر اساس شکل ۱۳، برای استوانه اول در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د فشار دارای دو الگوی نوسانی است که یکی با بسامد موتور در این سرعت و دیگری (که غالب است) با دوبرابر بسامد موتور برابر است، اما با افزایش سرعت موتور به ۶۰۰۰ د.د.د، بسامد این نوسانات با بسامد موتور برابر می‌شود.

### ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از این پژوهش، مقایسه نتایج شبیه‌سازی افت تلمبه‌ای موتور با استفاده از الگوی یک‌بعدی با نتایج تجربی نشان دهنده انطباق خوب نتایج عددی بخصوص در سرعت‌های کم است. با افزایش سرعت و محسوس‌تر شدن تاثیر چرخش میل‌لنگ بر مساحت عبور جریان، تفاوت پیش بینی الگوی یک‌بعدی با آزمایش تجربی به علت افزایش تاثیر حرکت میل‌لنگ بیشتر شد. بنابراین سعی شد با ارائه

**References:**

[1]. H.Hardenberg, Gas Movements in Crankcase of Reciprocating Engines. MTZ Motortechnische Zeitschrift(1972), 33 (12), pp. 463-468.  
 [2]. Raj P. Ranganathan, Engine Crankcase Pumping Flow Model ,sae paper,1999-01-0215,1999  
 [3]. P.Deighan, N.Zuhdi, N., Crankcase Flow Modeling for a Racing Motorcycle Engine ,SAE-Paper 2007-01-0266.2007  
 [4]. W.Edelbauer , A. Diemath , H. Kratochwill , G. Brenn , Simulation of the ventilation losses in the crankcase of an internal combustion engine, Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal, Volume 10, Number 1 / 2010  
 [5]. T. Ogawa, T.Suzuki, S. Ezaki, T. Suzuki, Reduction of Friction Losses in Crankcase at High Engine Speeds,sae paper ,2006-01-3350,2006  
 [6]. G.Koch,F.Haubner, Lubrication and Ventilation System of Modern Engines Measurements,Calculations and Analysis sae paper, 2002-01-1315,2002  
 [7]. R.Barthel, F.Haubner , J.Dohmen ,Influence of the lubrication and ventilation system upon the friction losses in high performance engines. Technische Mitteilungen. Vol. 95, no. 4, pp. 180-187. Dec. 2002  
 [8]. H.Arisawa , M.Nishimura ,H.Watanabe ,Atsushi U.Kazuki, A.Yamasaki, Study on Similarity of Pumping Flow in Engine Crankcase SAE number 2009-11-03  
 [9]. M.Kazemi, S.Alizadenia, T.Tavakoli Hashjin, Gh. Najafi, prediction oil parameter of connecting rod small end bearing of ef7 engine by using artificial neural network by simulation in avl excite software,engine research fall 2010; 6(20):22-29

$K$	ضریب تغییر سطح
$k$	ضریب ایزنتروپیک
$L$	طول دسته سمبه، m
$m$	جرم، kg
$n$	ضریب پلی تروپیک
$N$	سرعت دورانی د.د.د، rmp
$P$	فشار، Pa
$R$	ثابت گاز، J/kgK
$r$	نسبت تراکم در زیر سمبه
$T$	دما، K
$u$	انرژی داخلی، J/kg
$V$	حجم، $m^3$
$v$	سرعت گاز، m/s
$x$	کیفیت مخلوط
<b>علائم یونانی</b>	
$\theta$	درجه میل لنگ
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
<b>زیر نویس ها</b>	
.	حدس اولیه
$2\phi$	مشخصات دو فازی
$e$	جریان خروجی
$cv$	حجم کنترل
$i$	جریان ورودی
out	حالت در خروجی