

کورس، سرعت، شتاب و تکان در سوپاپ‌های موتورهای پیستونی و تعیین نمودار زمان بندی تعویض سیال

احمد علی سهرابی
استادیار

مهدی اخلاقی
دانشیار

محمدرضا اعرابی
فارغ التحصیل کارشناسی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

دستگاه‌های زمان بندی تعویض سیال و چگونگی مکانیزم آنها اثر قابل ملاحظه‌ای بر توان، مخارج ساخت، صدا و تشکیل آلاینده‌های موتور دارند. در همین ارتباط چگونگی فرم دوره بادامک و بنابر آن کورس، سرعت، شتاب و تکان سوپاپ از اهمیت خاص برخوردار است. در مقاله‌ای که پیش روی دارید، نمودار زمان بندی سوپاپ‌ها به کمک معادله منحنی کورس سوپاپ تعیین شده است. معادله تابع کورس از روش 'polydyne' تعیین و به دنبال آن مشتق اول، دوم و سوم (سرعت، شتاب و تکان سوپاپ) به دست آمده‌اند. به کمک نتایج به دست آمده، نمودار زمان بندی سوپاپ موتور پیکان CC ۱۶۰۰ تعیین می‌شود که این مبنای مطالعات به منظور تعیین زمان مناسب باز و بسته شدن سوپاپ‌ها، فرم بهینه بادامک سیستم تعویض سیال و در نهایت طراحی میل بادامک است. در انتها کورس جدیدی برای پروفیل بادامک موتور پیکان CC ۱۶۰۰ پیشنهاد شده و با کورس فعلی بادامک پیکان، از لحاظ کورس، سرعت، شتاب و تکان مقایسه شده است.

Lift, Velocity, Acceleration, and Jerk of Piston Engine Valves, and the Determination of Valve timing Diagrams

M. Akhlaghi
Associate Prof.

A.A. Sohrabi
Assistant Prof.

M. Arabi
Graduate Student

Mech. Eng. Dept., Amirkabir Univ. of Tech.

Abstract

Valve timing and valve mechanism have a sound effect on the power output, manufacturing cost, noise, and the emissions of the engine. In this paper the valve timing diagram is determined by the equation of valve displacement (lift). The displacement function of the valve is determined by the method of polydyne, and its first, second, and third derivatives (i.e. velocity, acceleration, and jerk) are obtained.

From the results, the optimum valve timing and the optimum cam profile can be determined.

Finally, a new cam profile for the 1600 cc - Paykan engine is proposed and compared with the present one.

۱- مقدمه

دستگاه تعویض سیال از سیستم های ورودی و خروجی تشکیل می شود. وظیفه سیستم ورودی این است که در حین مرحله مکش حتی الامکان ورود مقدار زیادی گاز تازه (هوا و سوخت) را به داخل اطاق احتراق موتور میسر سازد. در مقابل سیستم تخلیه وظیفه دارد که در صورت امکان تمامی سیال سوخته را به خارج موتور هدایت نماید، از آنجایی که مقاطع ورود و خروج را نمی توان سریع و کامل باز کرد و به علاوه به دلیل استفاده از انرژی جنبشی گازهای تازه و سوخته زمان باز و بسته شدن مجراهای ورود و خروج را قبل و بعد از نقاط مرگ پیستون قرار می دهند.

زمان باز شدن سوپاپ خروج "EVO" باید طوری انتخاب شود که سبب حداقل کاست مرحله انفجار گشته و فشار داخل سیلندر خیلی سریع کاهش یابد، همچنین به منظور استفاده از انرژی جنبشی دود و با رعایت کاهش سریع مقطع خروج به هنگام نزدیکی به نقطه مرگ بالا لازم است، زمان بسته شدن مجرای خروج "EVC" بعد از نقطه مرگ بالا انتخاب شود [۱].

مجرای سیستم مکش قبل از نقطه مرگ بالا باز است، زیرا در لحظات اولیه، سطح مقطع باز کوچکی در اختیار است و به تدریج افزایش می یابد. از طرف دیگر از مکش گازهای سوخته برای به حرکت در آوردن بیشتر گازهای تازه استفاده می شود. بسته شدن سوپاپ خروجی بعد از نقطه مرگ بالا و باز شدن سوپاپ ورودی قبل از نقطه مرگ بالا، سبب می شود که به طور همزمان هر دو سوپاپ ورودی و خروجی، برای مدتی باز باشند. این مدت زمان تقاطع (overlapping) نامیده می شود که برای شستشوی سیال داخل اطاق احتراق و بیرون راندن بیشتر دود لازم است.

بدیهی است در موتور پیکان با محدوده دورکاری عریض، سطح تقاطع را نمی توان خیلی بزرگ انتخاب کرد،

زیرا در دورهای پایین، دود به مجرای ورود داخل و دوباره به سیلندر برمی گردد.

از آنجایی که هوای ورودی به سیلندر دارای مومنتم است، بنابراین این می تواند باعث افزایش سوخت در داخل سیلندر گردد که به این پدیده اسکرود شدن (ramming) می گویند. برای جلوگیری از این پدیده در بستن سوپاپ هوا تعلل کرده و زمان بسته شدن سوپاپ ورودی IVC را بعد از نقطه مرگ پایین قرار میدهند. [۱]

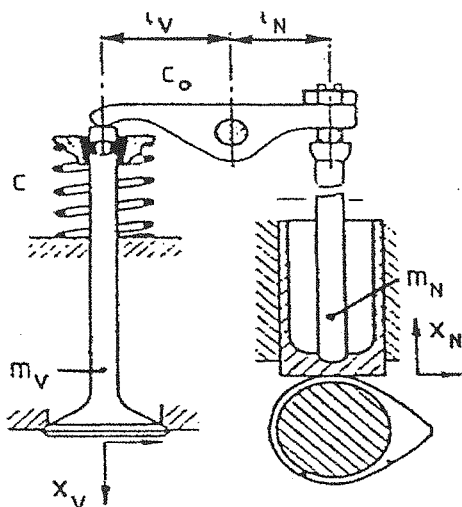
در این مقاله به کمک روش "Polydyne" کورس، سرعت، شتاب و تکان سوپاپ موتور پیکان ۱۶۰۰ cc را محاسبه و مورد ارزیابی قرار می دهیم.

۲- کورس، سرعت، و شتاب سوپاپ

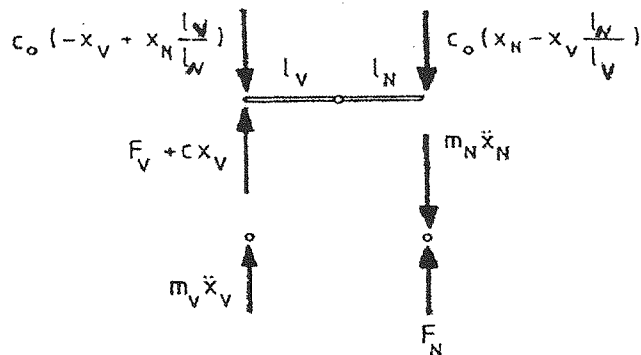
به طور کلی فرم بادامک باید به گونه ای باشد که منحنی کورس، حداقل تا مشتق دوم نسبت به زمان یا زاویه گردش میل بادامک، یکنواخت باشد.

محاسبه بادامک براساس روش های متفاوت صورت می گیرد، مناسب ترین روش برای تعیین تابع منحنی کورس بادامک و از آنجا تعیین منحنی سرعت و شتاب و تکان، روش polydyne است [۲، ۳، ۴]. براساس روش مذکور می توان تغییرات فرمی الاستیک سیستم سوپاپ در اثر نیروهای فنر و جرمی را نیز رعایت نمود.

دستگاه تعویض سیال موتور ۱۶۰۰ cc پیکان از نوع سوپاپ آویزان (Overhead Valves) و میل بادامک پایین است. جرم های متحرک این نوع سیستم ها، بزرگ و قابل ارتجاع هستند، بنابراین باید از ایجاد شتاب های خیلی بزرگ جلوگیری کرد. سیستم دو جرمی مطابق شکل ۱ به عنوان طرح سیستم تعویض سیال در نظر گرفته می شود.



$$C_0 (-x_v + x_N \frac{l_v}{l_N}) l_v = C_0 (x_N - x_v \frac{l_v}{l_N}) l_N$$



شکل (۱) مدل جایگزین سیستم تعویض سیال

رابطه (۳) ارتباط مابین کورس سوپاپ و کورس شکل بادامک را مشخص می‌سازد. اگر تغییرات کورس سوپاپ "X_v" برای موتور، مشخص شده و یا درخواست شده باشد، در این صورت به کمک تساوی (۳)، تغییرات کورس شکل بادامک (فرم بادامک) نقطه با نقطه محاسبه می‌شود. برای لقی "S" و "X_N" به همان مقدار افزایش می‌یابد. رابطه (۳) توسط تابع "polydyne" با رعایت شرایط مرزی مناسب به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$X = H_{max} + C_2 \phi^2 + C_p \phi^p + C_Q \phi^Q + C_R \phi^R + C_S \phi^S \quad (4)$$

X کورس شکل بادامک :
 $H_{max} = X_{max}$ حداکثر کورس شکل بادامک :
 ϕ زاویه چرخش بادامک :

بنابر این اگر بتوان کورس بادامک پیکان را به صورت رابطه (۴) نمایش داد، با استفاده از رابطه تعادل (۱) کورس سوپاپ نیز به دست خواهد آمد. براساس نقشه‌های شرکت ایران خودرو، اطلاعات مربوط به کورس بادامک پیکان ۱۶۰۰CC به صورت عددی می‌باشد. به این ترتیب که به ازای زاویه گردش میل بادامک، مقدار کورس مشخص است. بنابر این برای پیدا کردن معادله کورس بادامک باید از روش برازش منحنی^(۱) استفاده کرد.

اولین رابطه حرکت مابین نیروی جرم، نیروی فنر و نیرو در اثر الاستیسیته محرک به شرح زیر است:

$$-m_v \ddot{x}_v - (F_v + Cx_v) + C_0 (X_N \frac{l_v}{l_N} - X_v) = 0 \quad (1)$$

دومین رابطه حرکت مابین نیروی بادامک، نیروی جرم و نیرو در اثر الاستیسیته محرک نیز به شرح زیر می‌باشد:

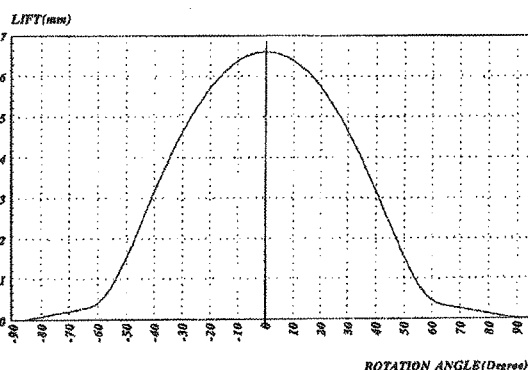
$$F_N - m_N \ddot{X}_N - C_0 (X_N - X_v \frac{l_N}{l_v}) = 0 \quad (2)$$

جرم (معادل جرم سوپاپ): m_v
 جرم (معادل جرم بادامک): m_N
 کورس سوپاپ: X_v
 کورس بادامک: X_N
 بازوی اهرم: l_N, l_v
 نیروی بادامک: F_N
 نیروی پیش تنیده: F_v
 ثابت فنر (ضریب فنریت) فنر سوپاپ: C
 ثابت فنر (ضریب فنریت) محرک (تقریبی): C_0
 از تساوی (۱) خواهیم داشت:

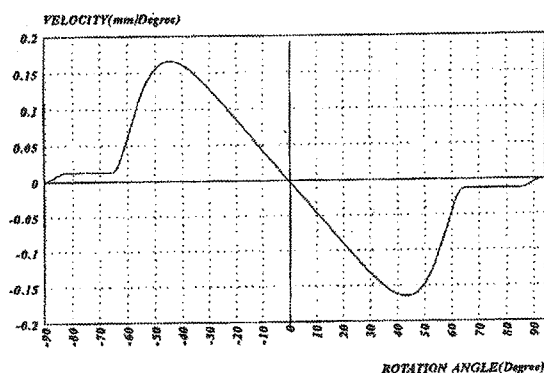
$$C_0 X_N \frac{l_v}{l_N} = m_v \ddot{X}_v + (F_v + Cx_v) + C_0 X_v$$

$$X_N = \frac{m_v \cdot l_v}{C_0 \cdot l_N} \ddot{X}_v + \frac{(C + C_0)}{C_0} \cdot \frac{l_v}{l_N} X_v + \frac{1}{C_0} \cdot \frac{l_v}{l_N} \cdot F_v \quad (3)$$

از مشتق گیری عددی است، به علت تعداد زیاد داده ها از دقت خوبی برخوردار است.



شکل (۲) منحنی کورس بادامک پیکان ۱۶۰۰ CC



شکل (۳) منحنی سرعت بادامک پیکان ۱۶۰۰ CC با

روش مشتق گیری عددی

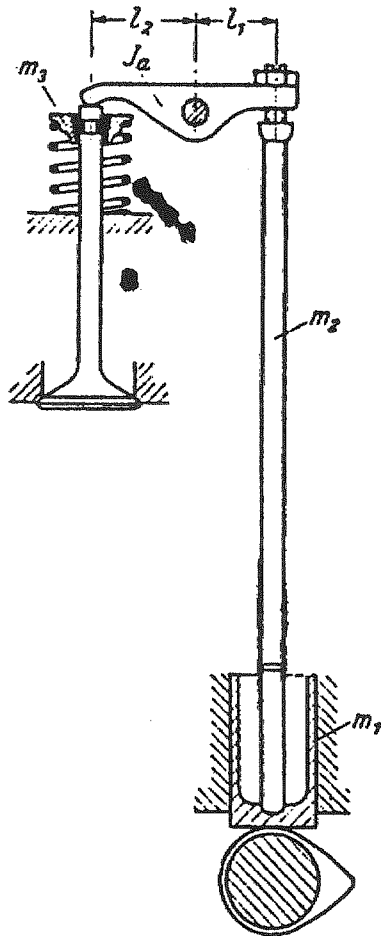
منحنی شتاب (شکل ۴) به لحاظ نیروهای وارده به سوپاپ و جرم های حرکتی حائز اهمیت است. عدم وجود قرینگی در منحنی شتاب در سمت چپ و راست نوک بادامک و ناهمواری در منحنی در ناحیه قبل بادامک و انتهای کورس از مشخصه های منحنی به دست آمده است. در محدوده لقی (۸۵ - و ۸۶ درجه از میل بادامک) مشاهده می شود که منحنی شتاب هموار نیست و دارای یک تغییر ناگهانی است که باعث بوجود آمدن شکل قله مانندی در این نواحی شده است. بدیهی است در عمل تغییر ناگهانی منحنی کورس سوپاپ در حین فاصله لقی و پس از سپری شدن آن توسط «قبل بادامک» گرفته می شود.

به منظور برآزش منحنی در معادله (۴) نرم افزاری تهیه شده است که در آن User با مشخص کردن توان های (P و Q, R, S) و شرایط مرزی مورد نیاز و همچنین تعداد ضابطه های معادله منحنی کورس، نزدیکترین معادله به منحنی کورس بادامک را به دست می آورد (لازم به ذکر است که شرایط مرزی از اطلاعات گرفته شده ایران خودرو برای کورس بادامک پیکان ۱۶۰۰ CC به دست می آیند). توضیح اینکه توان های دلخواه (P و Q, R, S) و همچنین نقاطی که به عنوان شرایط مرزی در نرم افزار وارد می شوند، در تعیین معادله منحنی مورد نظر بسیار حائز اهمیت هستند. زیرا کوچکترین تغییر در این پارامترها می تواند منحنی ایجاد شده را از منحنی کورس بادامک موتور پیکان بسیار دور نماید.

با تغییر توان ها و شرایط مرزی نتیجه می گیریم که نمی توان تمامی اطلاعات داده شده را در یک منحنی برآزش نمود. بعبارت دیگر تابعی با تنها یک ضابطه وجود ندارد که تمامی مقادیر داده شده در آن صدق کند. لذا باید از یک تابع چند ضابطه ای استفاده نمود که تمامی نقاط را بپوشاند. در صورتی که از یک تابع پنج ضابطه ای استفاده نماییم، می توانیم تمامی اطلاعات داده شده را در منحنی کورس پوشش دهیم. این عمل را با انتخاب تعداد پنج منحنی در نرم افزار و انتخاب توان ها و شرایط مناسب و همچنین محدوده مناسب برای برآزش هر یک از منحنی ها، در روی کورس انجام می دهیم. با انجام این عمل نمودار منحنی به دست آمده و با نمودار کورس بادامک موتور پیکان کاملاً منطبق می گردند. ولی در مشتق گیری از آنجاییکه هر یک از منحنی ها دارای معادله خاص خود است و در محدوده خاص خود تعریف شده است، در محل اتصال هر یک از منحنی ها به دیگری گسستگی مشاهده می شود. بکارگیری منحنی های سینوسی به شرط قرینگی کورس بادامک می تواند، نتایج قابل قبولی را ارائه دهد. اما به دلیل عدم قرینگی کورس بادامک پیکان (زاویه گردش ۹۰.۵ - تا ۹۴.۵ میل بادامک) ترکیب منحنی های سینوسی و چند جمله ای برای برآزش به نتایج رضایت بخشی منتهی نمی شود.

با توجه به مطالب فوق بهترین و دقیقترین راه برای به دست آوردن منحنی سرعت و شتاب از منحنی کورس، بکارگیری روش مشتق گیری است. نتایج شکل ۲ و ۳ نشان می دهند که منحنی کورس بادامک پیکان با دقت خوبی رسم شده است. همچنین منحنی سرعت که حاصل

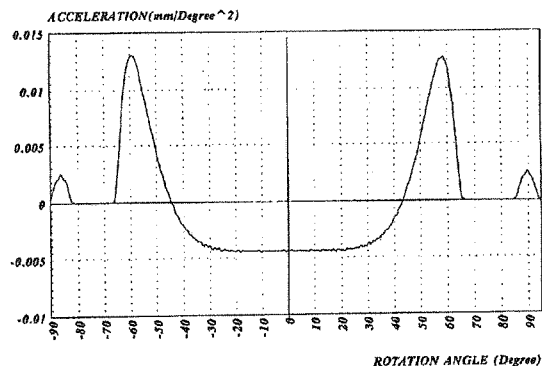
نخواهد داشت، لذا مقدار سرعت و شتاب سوپاپ را قبل از این زاویه برابر صفر قرار می دهیم. در رابطه (۱) جرم m_v (جرم معادل جرم سوپاپ) آمده است که از رابطه زیر و با توجه به شکل ۵ محاسبه می شود.



شکل (۵)

$$m_v = m_3 + \left(\frac{I_N}{I_v}\right)^2 (m_2 + m_1) + \frac{J_a}{I_v^2} \quad (6)$$

J_a ممان اینرسی جرم اهرم است. با توجه به موارد بیان شده نمودارهای کورس، سرعت و شتاب سوپاپ ورودی (و یا خروجی) به ترتیب در شکل های ۶، ۷ و ۸ آمده است.



شکل (۴) منحنی شتاب بادامک پیکان ۱۶۰۰ CC با روش مشتق گیری عددی

برای به دست آوردن کورس سوپاپ از رابطه تعادل (۱) استفاده می شود. برای به دست آوردن کورس واقعی سوپاپ (۲) و حل معادله از روش ضرایب نامعین معادلات دیفرانسیل از مرتبه دو استفاده شده است.

همانطور که گفته شد، معادله کورس بادامک به صورت یک تابع پنج ضابطه ای روی فواصل:

1. درجه میل بادامک 68° تا 90.5°
2. درجه میل بادامک 53° تا 68°
3. درجه میل بادامک 50° تا 53°
4. درجه میل بادامک 65° تا 50°
5. درجه میل بادامک 94.5° تا 65°

بیان شده است. لازم به ذکر است که هر یک از ضوابط این تابع از ۶ درجه می باشند. در ضمن مقادیر ثابت معادله (۱) از نقشه ها و اطلاعات دریافتی از ایران خودرو استخراج گردیده است.

برای مقایسه، کورس تئوری سوپاپ (۳) را با رعایت نسبت تبدیل اهرم (اسبک) به دست می آوریم:

$$X_v (\text{Theo.}) = \frac{L_v}{L_N} X_N \quad (5)$$

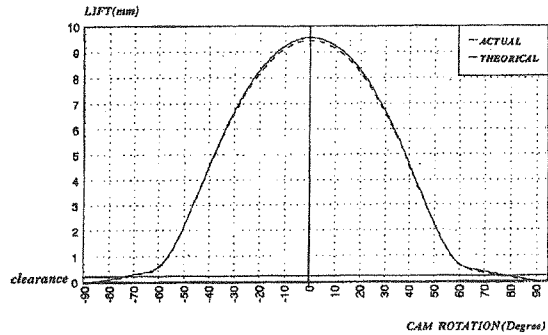
نکته قابل توجه در مقایسه کورس سوپاپ، وجود لقی در سیستم محرک می باشد که باعث جابجایی کورس بادامک به اندازه لقی و در نتیجه باعث کاهش کورس سوپاپ می گردد. مقدار لقی برای سوپاپ ورود $0.2/2 \text{ mm}$ و برای سوپاپ دود $0.4/4 \text{ mm}$ در نظر گرفته می شود. البته باید توجه داشت که این مقدار لقی برای سوپاپ دود در حین عملکرد به دلیل انبساط گرمایی در حدود لقی سوپاپ ورود ($0.2/2 \text{ mm}$) خواهد بود. از آنجاییکه سوپاپ تا زاویه بر طرف شدن لقی، حرکتی

IVC=86° CRANK ANGLE ABDC

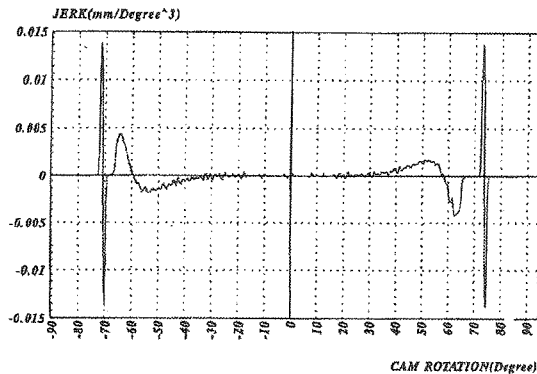
EVO= 66° CRANK ANGLE BBDC

EVC=20° CRANK ANGLE ATDC

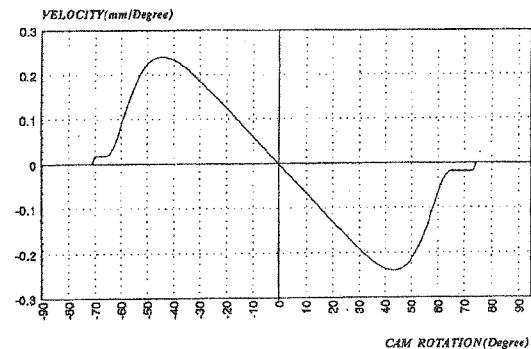
با رعایت مقادیر فوق، منحنی زمانبندی سوپاپ ها در شکل (۱۰) آمده است.



شکل (۶) منحنی کورس سوپاپ ورودی



شکل (۹) منحنی تکان سوپاپ ورودی

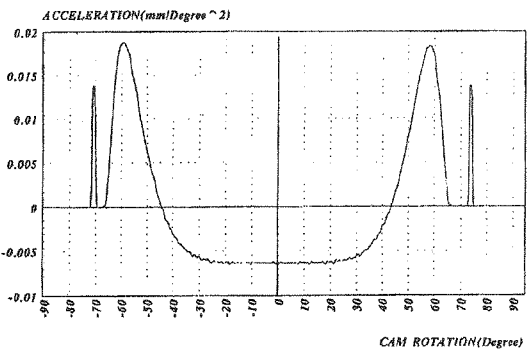


شکل (۷) منحنی سرعت سوپاپ ورودی

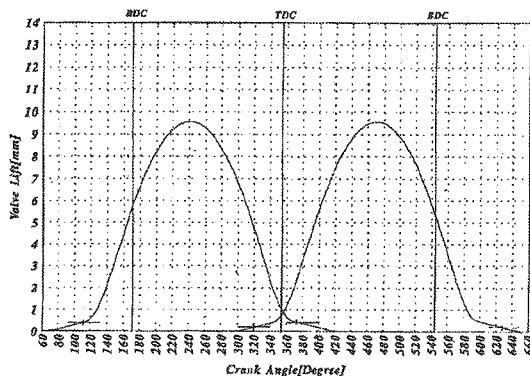
۴- بررسی منحنی تکان (Jerk) در سوپاپ های موتور پیکان ۱۶۰۰ cc و اصلاح پروفیل بادامک

به طور کلی مشتق منحنی شتاب نسبت به زمان (یا زاویه گردش میل بادامک) نشان دهنده تکان (jerk) در سیستم است.

با مشتق گیری عددی از منحنی شتاب سوپاپ ورودی که در شکل (۸) آمده است، منحنی تکان سوپاپ ورودی به دست می آید شکل (۹).



شکل (۸) منحنی شتاب سوپاپ ورودی



شکل (۱۰) منحنی زمان بندی پیکان ۱۶۰۰ CC

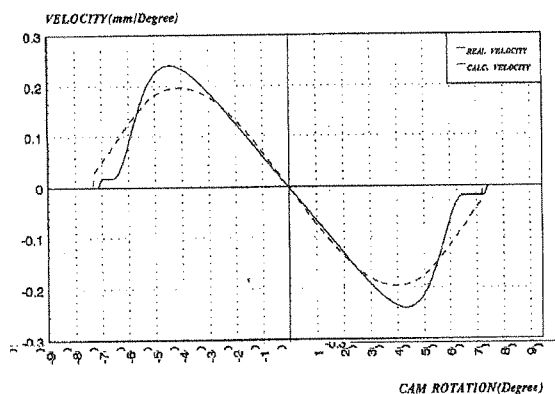
۳- منحنی زمان بندی تعویض سیال موتور پیکان ۱۶۰۰ cc

رسم منحنی زمان بندی باید براساس زمان باز و بسته شدن سوپاپ ورود و خروج نسبت به نقاط مرگ بالا و پایین (BDC, TDC) پیستون انجام گیرد. زوایای باز و بسته شدن سوپاپ ها نسبت به میل لنگ باتوجه به اطلاعات ایران خودرو عبارتند از:

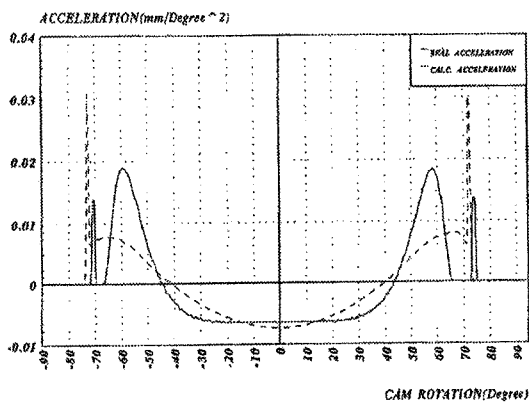
IVO=44° CRANK ANGLE BTDC

از آنجاییکه این تحقیقات برای شرکت ایران خودرو انجام گرفته است، لذا از آوردن این تابع و مقادیر عددی کورس محاسباتی بادامک معذور بوده و اعلام نتایج منوط به اجازه از شرکت ایران خودرو می باشد.

برای مقایسه کورس محاسباتی (کورس پیشنهادی) و کورس واقعی (کورس فعلی)، منحنی های سرعت، شتاب و تکان سوپاپ های این دو کورس در شکل های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) آمده است. همانطور که در منحنی های شتاب و تکان مشاهده می شود، به استثنای مرحله آغاز حرکت سوپاپ، در بقیه نقاط، منحنی شتاب هموارتر بوده و مقدار تکان در این نقاط به سمت صفر میل می کند.



شکل (۱۲): منحنی سرعت بادامک فعلی و بادامک اصلاح شده



شکل (۱۳): منحنی شتاب بادامک فعلی و بادامک اصلاح شده

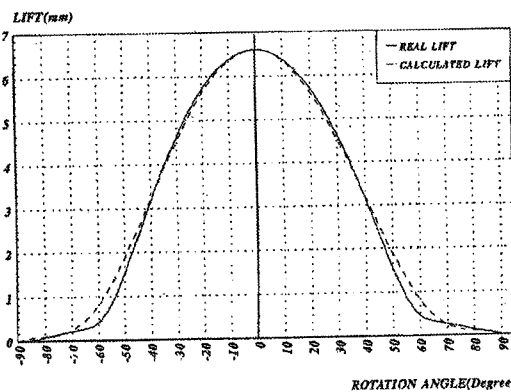
همانطور که در شکل مشاهده می شود، در محدوده زاویه 70- و 75 درجه میل بادامک یعنی زمانی که لقی سوپاپ برطرف می شود، تکان شدیدی در سوپاپ بوجود می آید. همچنین در محدوده زاویه (50- - 70-) درجه میل بادامک و (70-50) درجه میل بادامک مقداری تکان در سیستم وجود دارد.

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود، در پروفیل بادامک ۱۶۰۰cc اتصال قبل بادامک به گرده اصلی بادامک خیلی تیز صورت می گیرد، این وضعیت موجب ایجاد شتاب ها و بدین ترتیب نیروهای جرمی بزرگ خواهد شد و همچنین دلیل بوجود آمدن تکان در نواحی ذکر شده می باشد.

برای کاهش نیروهای جرمی و تکان در سوپاپ های موتور پیکان و در نتیجه کارکرد متعادل تر آن باید طرح مناسب تری برای پروفیل بادامک ارائه داد، که در این طرح باید مقدار مناسب قبل بادامک و اتصال نرمتر قبل بادامک به گرده اصلی بادامک در نظر گرفته شود.

از طرف دیگر تغییر در قبل بادامک و نحوه اتصال آن به گرده اصلی بادامک بر سطوح مکش و تخلیه اثر گذاشته و باعث تغییر در مقدار تقاطع (over lapping) سوپاپ ها می گردد. بنابراین اصلاح مناسب پروفیل بادامک می تواند موجب کاهش معایب مربوط به منحنی زمانبندی سوپاپ ها گردد.

بدین منظور منحنی کورسی که در شکل (۱۱) (منحنی خط چین) در کنار کورس فعلی بادامک (منحنی با خط پر) رسم شده است، پیشنهاد می گردد. این کورس به عنوان کورس محاسباتی بادامک و کورس فعلی به عنوان کورس واقعی در نظر گرفته شده اند. منحنی این کورس توسط یک تابع یک ضابطه ای قابل تعریف است که از شکل کلی تابع polydyne تبعیت می کند.



شکل (۱۱) نمودار کورس بادامک فعلی و بادامک اصلاح شده

باتوجه به نتایج به دست آمده برای موتور 1600CC پیکان علاوه بر اینکه روش محاسباتی انتخاب شده دقیقاً با واقعیت تطبیق می‌کند. منحنی کورس بادامک تا مشتق دوم نسبت به زاویه گردش میل بادامک یکنواختی بسیار خوبی را نشان می‌دهد.

فرم بادامک نسبت به خط صفر در حداکثر کورس قرینه نیست و اختلاف جزئی در نیمه های بادامک وجود دارد.

نمودار بادامک نشان می‌دهد که کورس «قبل بادامک» نسبتاً کوتاه است. انتخاب خیلی بزرگ قبل بادامک به دلیل باز شدن تدریجی سوپاپ و تأثیر بارهای حرارتی بزرگ مناسب نیست. اما به منظور کاهش ضربه، کورس «قبل بادامک» باید بزرگتر از حداکثر لقی باشد. اتصال قبل بادامک به گرده اصلی بادامک خیلی تیز است، به طوری که این وضعیت موجب ایجاد شتاب های بزرگ و بدین ترتیب نیروهای جرمی بزرگ و همچنین تکان در سیستم خواهد شد. همچنین قسمت مربوط به سطح مکش و تخلیه نیز کاهش می‌یابد.

الاستیسته سیستم تعویض گاز موتور پیکان بدون در نظر گرفتن تأثیر گشتاور ضربه ای مابین سوپاپ و بادامک خیلی زیاد نیست. زیرا نمودارهای زمان بندی واقعی و تئوری کورس سوپاپ تقریباً یکی هستند.

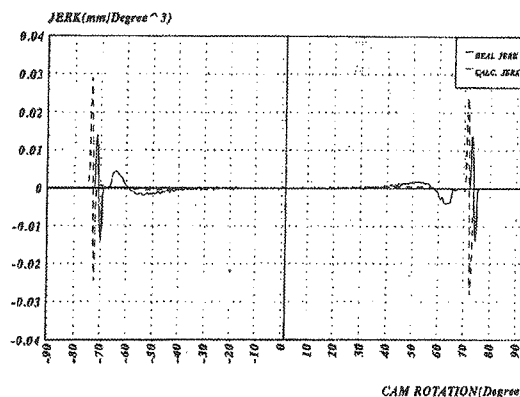
فرم اصلاح شده پیشنهادی که در آن اتصال نرمتر قبل بادامک و گرده اصلی در نظر گرفته شده است، تکان کمتری نسبت به پروفیل بادامک فعلی دارد. بدیهی است نتایج دقیق تر به کمک آزمایش های کامل در ایستگاه آزمایش موتور در ارتباط با آلودگی، مصرف و توان مشخص خواهد شد.

پانویس

1) Curve Fitting

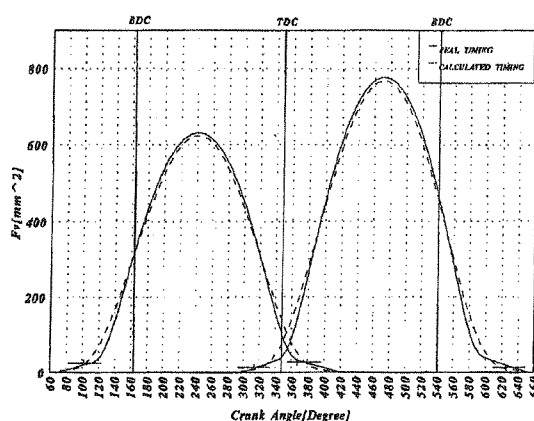
۲) کورس سوپاپ براساس اطلاعات اندازه دوره بادامک و با رعایت الاستیسته سیستم کورس واقعی سوپاپ نامیده شده است.

۳) کورس سوپاپ با رعایت نسبت تبدیل اسبک سیستم تعویض گاز، به عنوان کورس محاسبه ای - تئوری نامیده شده است.



شکل (۱۴) منحنی تکان بادامک فعلی و بادامک اصلاح شده

همچنین برای مقایسه بیشتر، منحنی زمانبندی سوپاپ های ورود و خروج این دو کورس در شکل (۱۵) آمده است. نتایج بررسی های تئوری نشان می‌دهد که کورس پیشنهادی فوق مناسب بوده و معایب کورس فعلی را کاهش می‌دهد. اما برای بررسی های دقیق تر، پس از ساخت میل سوپاپ جدید باید آزمایش های کاملی بر روی این میل سوپاپ انجام گیرد.



شکل (۱۵) منحنی زمانبندی سوپاپ های بادامک فعلی و بادامک اصلاح شده

بحث و نتیجه گیری

به کمک روش محاسباتی "polydyne" می‌توان فرم های مختلف پروفیل بادامک را قبل از ساخت به لحاظ شتاب و تکان در سیستم مورد بررسی دقیق قرار داد.

[4] Lenz H.P., Bamer F. Akhlaghi M.: Verbrennungs-Kraftmaschinen Vertiefung IVK WIEN 1990

[5] محمدرضا اعرابی - فرشید احمدیان، زمان بندی سوپاپ ها و تعیین پارامترهای موثر در طراحی پروفیل بادامک و عملکرد موتور پیکان ۱۶۰۰ با میل سوپاپ فعلی، پروژه کارشناسی، ۱۳۷۵، دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

[۱] مهدی اخلاقی، طراحی موتورهای پیستونی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۶۳

[2] Dudley, W. M.: New methods in valve cam design", SAE Transactions 1948,S. 19-33

[3] Thoren, T. R., Engemann H.H., Stoddart D.A, "Cam Design Related to Valve Train Dynamics." SAE Quarterly Transactions Jan 1952