

بهینه سازی پروفیل بادامک دیسکی جهت مینیمم کردن انرژی اتلافی

مصطفی اسلامیان^۱، سوران حسنی فرد^۲

دانشگاه تبریز - دانشکده فنی مهندسی مکانیک - ساختمان شماره ۸

E-mail: hasanifard@tabrizu.ac.ir

چکیده

سیستم بادامک- پیرو در موتور اتوموبیل از محل هایی است که انرژی مصرفی آن قابل ملاحظه و در عملکرد موتور خیلی موثر می باشد. مهندسی سعی دارند همواره با ارائه طرحهای جدید، انرژی مصرفی این قسمت را کاهش دهند. انتخاب شکل هندسی خاصی برای پروفیل بادامک می تواند در تقلیل انرژی مصرفی سیستم مزبور نقش داشته باشد لذا پروفیل بادامک موتور پیکان را مد نظر گرفته تا با انجام محاسبات بهینه سازی، شکل هندسی خاص مورد نظر به دست آید. با استفاده از حساب تغییرات وحل عددی، نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مقدار قابل ملاحظه ای در انرژی مصرفی در مقایسه با پروفیل سیکلوئیدی که در حال حاضر در موتور پیکان بکار می رود، صرفه جویی می شود و مقدار ماکزیمم شتاب نیز کاهش پیدا می کند.

واژه های کلیدی: پروفیل بادامک - انرژی اتلافی - بهینه سازی.

مقدمه

بادامکهایی را می توان طرح کرد که تقریباً هر حرکت دلخواهی به پیروش بدهد ولی ممکن است در بعضی از سرعتها، تغییرات شتاب حرکت خیلی زیاد باشد که نتیجه آن تنش زیاد و ارتعاش سیستم است. در موتورهای احتراق داخلی قسمتی از توان کلی موتور صرف غلبه بر اصطکاکهای داخلی موتور می شود، که آن را توان اصطکاکی موتور می نامند. توان داخلی موتور که آن را توان اندیکاتوری نیز می نامند، توانی است که عملاً در اثر احتراق سوخت در داخل سیلندر های موتور بوجود می آید. توانی که از موتور گرفته می شود از رابطه زیر بدست می آید:

$$bhp = ihp - fhp$$

که در آن bhp توان خروجی موتور، ihp توان اندیکاتوری و fhp توان اصطکاکی موتور می باشند. بدیهی است که هر چه توان تلف شده به صورت اصطکاک درموتور کمتر باشد، توان خروجی گرفته شده از موتور بیشتر خواهد بود [۲].

امروزه کاهش انرژی اتلافی، یکی از برنامه های ضروری است که در موتور های احتراق داخلی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از قسمتهای مهم ومؤثر در عملکرد موتور، سیستم بادامک- پیرو آن می باشد. از طرفی پروفیل بادامک مهمترین فاکتور در محاسبه خصوصیات عملکردی هر موتوری به شمار می آید، لذا موتورهایی که از هر نظر به غیر از شکل پروفیل بادامکشان با هم همسان وهمانند هستند، ممکن است خصوصیات عملکردی کاملاً متفاوتی داشته باشند [۱].

هنگامی که میل بادامک دوران می کند، مقداری از انرژی در مکانیزم سوپاپ بصورت اصطکاک تلف خواهد شد. بنا براین در طراحی پروفیل بادامک باید برای مینیمم کردن انرژی تلف شده اصطکاکی مزبور، تلاش کرد. یعنی پروفیل بادامک را طوری طرح نمود که در طول یک چرخه، کمترین مقدار انرژی به صورت اصطکاک تلف شود.

۱- دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز

$$B_4 = 1 - \mu^2$$

$$B_5 = \frac{2\mu}{\xi}$$

رابطه (۳) همان تابع هدف است که می خواهیم با روش بهینه سازی حساب تغییرات، y ها را طوری به دست بیاوریم که این تابع را مینیمم کند.

شرط احراز حد نهایی برای تابع مرکب (۳) این است که شرط اولر- پواسون برقرار باشد [۴].

$$\frac{\partial M}{\partial y} - \frac{d}{d\theta} \frac{\partial M}{\partial y'} + \frac{d^2}{d\theta^2} \frac{\partial M}{\partial y''} = 0 \quad (۴)$$

در حالیکه M جمله داخل علامت انتگرال را معرفی می کند. با محاسبه مشتقات M نسبت به y ، y' و y'' و دیفرانسیل های مرتبه اول و دوم نسبت به θ و جایگذاری در رابطه (۴)، معادله دیفرانسیلی از مرتبه دوم بصورت زیر به دست می آید:

$$y'' = \frac{-(b_1 y' + b_2 y y' + b_3 y^2 + b_4 y^3 + b_5 y y'^2 + b_6 y + b_7)}{(b_8 + b_9 y' + b_{10} y + b_{11} y^2 + b_{12} y'^2)} \quad (۵)$$

که در آن b_1 تا b_{12} بر حسب مقادیر معلوم B_1 تا B_5 عبارتند از:

$$b_1 = 3B_1 B_4^2 B_5 \mu$$

$$b_2 = 4B_3 B_4 B_5 \mu$$

$$b_3 = 2B_1 B_5^2 \mu + B_3 B_4 B_5$$

$$b_4 = B_3 B_5^2$$

$$b_5 = 4B_3 B_5^2 \mu$$

$$b_6 = 2B_3 B_4^2 \mu$$

$$b_7 = B_1 B_4^2 \mu$$

$$b_8 = 2B_1 B_4 B_5 + 2B_2 B_4^2 \mu$$

$$b_9 = 3B_2 B_4 B_5 \mu$$

$$b_{10} = 2B_3 B_4 B_5 - 2B_1 B_5^2 \mu$$

$$b_{11} = -2B_3 B_5^2 \mu$$

$$b_{12} = B_2 B_5^2$$

مقدار انرژی تلف شده در مکانیزم سوپاپ حدود ۷/۵ الی ۲۱ درصد کل تلفات اصطکاکی موتور است و بنابراین میتواند تأثیر زیادی در توان خروجی موتور داشته باشد [۳].

بدست آوردن معادله هدف

اجزای اصلی سیستم بادامک- سوپاپ موتور پیکان عبارتند از:

میل بادامک، تاپیت (استکانی)، میل تاپیت، اسبک، پیچ تنظیم، سوپاپ و فنر سوپاپ، که در شکل (۱) نشان داده شده است.

انرژی اتلافی در سیستم بادامک- پیرو برای یک دور چرخش بادامک از رابطه زیر بدست می آید:

$$E = \int_0^{2\pi} M d\theta \quad (۱)$$

که در آن M گشتاور نیروها نسبت به مرکز بادامک و θ زاویه گردش بادامک است که برای یک چرخه از ۰ تا 2π تغییر می کند.

گشتاور اتلافی M را میتوان بر حسب نیروهای اصطکاک و تماسی بین بادامک و پیرو به صورت زیر نوشت:

$$M = Fy + Ny' \quad (۲)$$

در حالیکه y تابعی از θ و y' مشتق y نسبت به θ می باشد. با نوشتن معادله های حرکت روی تک تک اجزاء سیستم مکانیزم سوپاپ و تلفیق آنها با همدیگر می توان معادله ای کلی برای بیان انرژی اتلافی نوشت که بعد از اختصار به صورت رابطه (۳) در می آید که در آن ثوابت B_1 تا B_5 بر حسب مشخصه های معلوم اجزای مکانیزم سوپاپ نوشته شده اند [۵].

$$E = \int_0^{2\pi} \frac{(B_1 + B_2 y'' + B_3 y)(y' + \mu y)}{B_4 + B_5 y'} d\theta \quad (۳)$$

که در آن E اتلاف انرژی و:

$$B_1 = M_e g - M_v g \frac{l_2}{l_1} - K_s r \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 + K_s d_1 \frac{l_2}{l_1}$$

$$- M_a g \frac{x}{l_1} + M_t g$$

$$B_2 = (M_v \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 + \frac{I}{l_1^2} + M_t + M_e) \omega^2$$

$$B_3 = K_s \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2$$

شرایط مرزی مسأله

شرایط مرزی مسأله با توجه به محدودیت های موجود بادامک موتور پیکان و همچنین پارامترهایی مربوط به مکانیزم و حرکت مطلوب پیرو تعیین می گردد. با توجه به این شرایط می توان گفت که مقدار y در نقطه $\theta = 0^\circ$ باید برابر r (شعاع دایره پایه بادامک) و در نقطه $\theta = 90^\circ$ برابر $r + h$ باشد (h حداکثر جابجایی پیرو می باشد). همچنین در نقاط $\theta = 0^\circ$ و $\theta = 90^\circ$ مقدار y' باید برابر صفر باشد. لازم به یادآوری است که بادامک مورد نظر متقارن بوده و 180 درجه از پروفیل به دایره پایه منطبق می باشد.

نتایج بهینه سازی

در حل عددی معادله دیفرانسیل (۵) باید توجه داشت که تغییرات y بر حسب زاویه گردش بادامک از 0 تا 90 درجه کاملاً حالت صعودی دارد اما y' تا نقطه خاصی بین 0 و 90 درجه حالت صعودی و از آن نقطه به بعد حالت نزولی خواهد داشت تا اینکه در $\theta = 90^\circ$ به صفر برسد. پس لازم به ذکر است در نقطه مزبور، در فاصله $[0, 90]$ باید علامت y' (ویا شتاب) عوض شود. انتخاب نقطه تغییر علامت شتاب به محدودیت های طراحی از جمله طول بادامک، شعاع دایره پایه و... بستگی دارد. بنابراین در قسمت اول حرکت، پیرو با شتاب مثبت به سمت بالا حرکت کرده و در قسمت دوم، با تغییر دادن علامت معادله دیفرانسیل، پیرو با شتاب کند شونده به سمت بالا حرکت می نماید.

بررسی و تحلیل کلی نتایج حاکی از آن است که تأثیر پارامترهایی چون سفتی فنر سوپاپ، جرم تایپت و جرم سوپاپ به همراه پیچ تنظیم، روی عملکرد سیستم بیشتر از سایر پارامترها بوده است [۵].

سفتی فنر سوپاپ نباید به اندازه ای کم باشد که باعث شود بین بادامک و پیرو پرش بوجود بیاید یعنی نیروی تماسی بین بادامک و پیرو به صفر برسد. همچنین مقدار آن نباید به اندازه ای زیاد باشد که باعث اتلاف انرژی بیش از حد در مجموعه سوپاپ گردد. در اینجا هر چند هدف کمینه کردن انرژی اتلافی است، با این حال بهتر است در مورد پرش هم یک بررسی اجمالی به عمل آید.

می توان گفت با در نظر گرفتن مجموعه تایپت و میل تایپت در فاز پایین آمدن بادامک، شرط زیر باید برقرار باشد:

$$F_a - M\ddot{y} > 0$$

که در آن \ddot{y} حداکثر شتاب تایپت در فاز پایین آمدن، M مجموعه جرم تایپت و میل تایپت و F_a نیروی تماسی بین اسبک و میل تایپت می باشد. با نوشتن معادله حرکت روی اسبک می توان نیروی F_a را بر حسب نیروی فنر سوپاپ به صورت زیر نوشت [۵]:

$$F_a \times l_1 = K_s dl_2 - I\alpha$$

که در آن l_1 و l_2 به ترتیب فواصل مرکز دوران اسبک تا محور میل تایپت و محور سوپاپ، K_s مقدار بهینه سختی فنر سوپاپ، d تغییر مکان ماکزیمم فنر، I ممان اینرسی اسبک و α شتاب زاویه ای آن می باشد. با جایگذاری مقادیر معلوم در رابطه اخیر، مقادیر 461.3 و 175.8 نیوتن، به ترتیب برای F_a و $M\ddot{y}$ بدست می آید. لذا می توان نتیجه گرفت که با انتخاب مقدار بهینه 25000 N/m برای سختی فنر سوپاپ مسئله پرش بوجود نخواهد آمد.

در طرح فنر دوتایی جدید که هنوز برای موتور پیکان به مرحله تولید نرسیده است، برای بادامک هارمونیک، سفتی های 7500 N/m و 12000 N/m به ترتیب برای فنرهای داخلی و خارجی پیشنهاد شده است [۶]. نتایج بهینه برای اجزاء مکانیزم سوپاپ پیکان مطابق جدول (۱) و نتایج حاصل از حل عددی معادله دیفرانسیل (۵) با روش رانگ-کاتا در بازه $[0, 90]$ مطابق جدول (۲) می باشند.

لازم به ذکر است که طول کلی بادامک به کار رفته در موتور پیکان برابر 36.6mm بوده و این مقدار بدون تغییر در بادامک بهینه نیز به کار برده شده است. با معلوم بودن مقادیر متعدد برای y' و y ، پروفیل بادامک بهینه، که قرار است چنین حرکتی را ایجاد کند، رسم می شود. شکل (۲) پروفیل بادامک بهینه را نشان می دهد. با توجه به شکل و جدول (۲) ملا حظه می شود که این پروفیل قابل ساخت است.

نتیجه گیری

برای آنکه بتوان مقایسه ای بین پروفیل بادامک بهینه با منحنیهای بادامکهای متداول هارمونیک و سیکلوئیدی از نظر اتلاف انرژی در مکانیزم سوپاپ، به عمل آورد لازم است که با در نظر گرفتن شرایط یکسان و لحاظ کردن شرایط و محدودیت های طراحی، مقادیر y, y', y'' برای منحنیهای مذکور نیز محاسبه شده و انرژی اتلافی هر کدام با انرژی تلف شده بادامک بهینه مقایسه گردد. انرژی اتلافی در مکانیزم، با مساحت زیر منحنی گشتاور نیروهای کل برحسب زاویه بادامک برابر است. سطح زیر نمودار $M - \theta$ برای سه بادامک بهینه، هارمونیک و سیکلوئید در بازه $[0, 90]$ از حرکت بادامک به ترتیب برابر $2.9939 N.m$ و $3.0285 N.m$ ، $2.6752 N.m$ می باشد.

شکل (۳) منحنیهای گشتاور نیروهای کل را برحسب زاویه چرخش بادامک، برای بادامکهای بهینه، هارمونیک و سیکلوئید نشان می دهد. منحنی های جابجایی، سرعت و شتاب بادامک بهینه به ترتیب در شکل های (۴)، (۵) و (۶) نشان داده شده اند. منحنی تغییرات شتاب پروفیل های هارمونیک و سیکلوئیدی نیز برای مقایسه این سه نوع بادامک با طرح بهینه از لحاظ سینماتیکی در شکل های (۷) و (۸) نشان داده شده اند. از لحاظ سینماتیکی، در سرعتهای خیلی زیاد مثلاً بیش از $5000 rpm$ ، افت ناگهانی شتاب یک عیب به شمار می آید اما در سرعتهای متعارفی، طرح بهینه از لحاظ افت ناگهانی شتاب قابل دفاع و از نظر کلی عملکردی دارای جنبه های مثبتی است.

مزایای استفاده از طرح پروفیل بادامک بهینه برای بادامک پیکان در مقایسه با منحنیهای هارمونیک و سیکلوئیدی عبارتند از:

۱- انرژی اتلافی در بادامک بهینه به میزان $11/6$ درصد نسبت به بادامک هارمونیک و $10/6$ درصد نسبت به بادامک سیکلوئید کاهش داشته است.

۲- استفاده از پروفیل بادامک بهینه نسبت به بادامک سیکلوئید حدود $2/2 - 8/8$ درصد از تلفات کل موتور، و نسبت به بادامک هارمونیک حدود $2/4 - 9/9$ درصد از تلفات کل موتور را کاهش می دهد.

۳- مقدار ماکزیمم شتاب و به تبع آن حداکثر بارهای اینرسی در بادامک بهینه نسبت به بادامک هارمونیک به میزان 10 درصد و نسبت به بادامک سیکلوئید به میزان 28 درصد کاهش داشته است.

فهرست نمادها

y	جابجایی پیرو
\dot{y}	سرعت پیرو
\ddot{y}	شتاب پیرو
M_e	جرم تاپیت (استکانی)
M_t	جرم میل تاپیت
M_v	جرم مجموعه سوپاپ
M_a	جرم اسبک
I	ممان اینرسی اسبک
θ	زاویه چرخش بادامک
F	نیروی اصطکاک بین بادامک و پیرو
N	نیروی تماسی بین بادامک و پیرو
r	شعاع دایره پایه بادامک
ω	سرعت زاویه ای بادامک
μ	ضریب اصطکاک
l_1, l_2	فواصل بین مرکز دوران اسبک تا لبه های آن
K_s	ثابت فنر سوپاپ
ξ	طول استکانی

مراجع

1. Haldesman James, D. Ellinger Herbert, E. AUTOMOTIVE ENGINES, PRENTICE HALL, PP.410, 1997.
2. س.م. نبوی، نیروده اتومبیل (ترجمه)، انتشارات نویسنده، چاپ سوم، ۱۳۶۲. (کتاب)
3. م. علی زاده، ز. ولد خانی، برآورد اصطکاک و گشتاور و توان تلفاتی در مکانیزم سوپاپ موتور پیکان ۱۶۰۰، همایش بین المللی موتورهای درونسوز، ۱۳۸۰.
4. L. Elsgolts, Differential Equation and the Calculus of Variations, Mir Publishers, Moscow, 1973.

جدول ۱- نتایج بهینه برای اجزاء مکانیزم سوپاپ

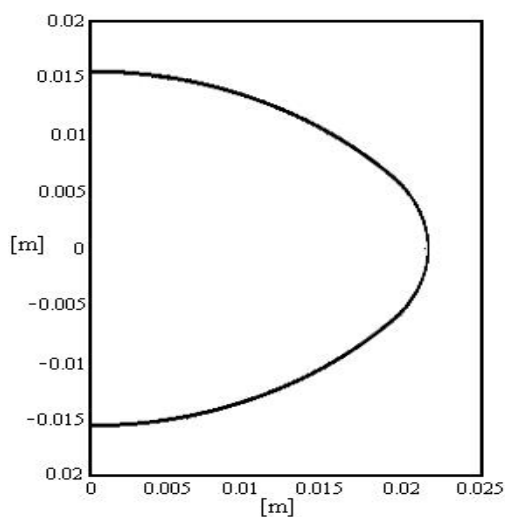
مقادیر قبلی	نتایج بهینه	اجزای مکانیزم
50300N/m	25000 N/m	K_S سختی فنر سوپاپ
0.107kg	0.1568 kg	M_T جرم مجموعه سوپاپ
0.068kg	0.1083kg	M_e جرم تایپت
0.0150m	0.0156m	r شعاع دایره پایه بادامک

5. س.حسینی فرد، طراحی بهینه پروفیل بادامک دیسکی جهت مینیمم کردن انرژی اصطکاکی در طول یک سیکل، پایاننامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۱.

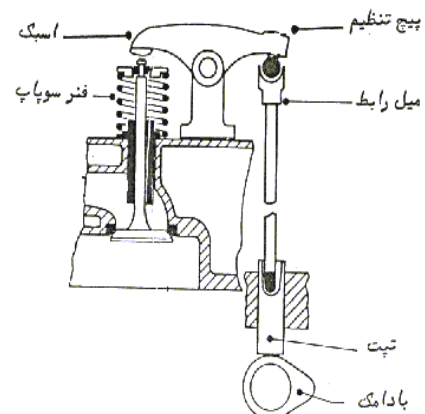
6. ح.ر. جاهد مطلق، م. حمزه ای، سوپاپ موتور پیکان ۱۶۰۰، بخش دوم، طرح دوتایی کردن فنر سوپاپ و مزایای آن، همایش بین المللی موتورهای درونسوز، ۱۳۸۰.

جدول ۲- نتایج بهینه حاصل از حل عددی معادله دیفرانسیل

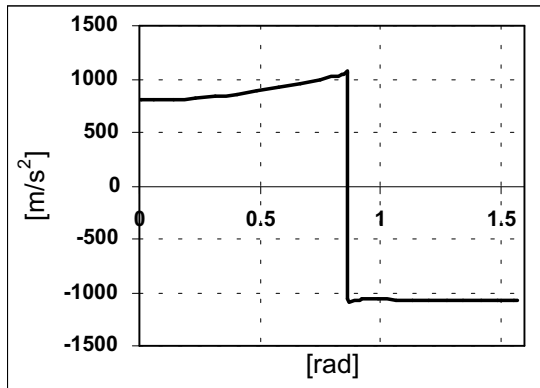
θ (rad)	θ (درجه)	y(m)	y'(m)	y''	θ (rad)	θ (درجه)	y(m)	y'(m)	y''
0	0	0.0156	0	0.0081	0.865	49.5	0.0188	0.0078	-0.0108
0.0099	0.56	0.0156	0.0001	0.0081	0.923	52.8	0.0192	0.0072	-0.0108
0.0594	3.4	0.0156	0.0005	0.0081	0.993	56.9	0.0197	0.0064	-0.0108
0.1459	8.3	0.0157	0.0012	0.0082	1.064	60.9	0.0201	0.0056	-0.0109
0.2324	13.3	0.0128	0.0019	0.0083	1.134	65.01	0.0205	0.0049	-0.0109
0.3189	18.2	0.0160	0.0026	0.0085	1.205	69.06	0.0208	0.0041	-0.0109
0.4054	23.2	0.0163	0.0034	0.0087	1.2759	73.1	0.0211	0.0033	-0.0109
0.4919	28.1	0.0166	0.0041	0.0090	1.346	77.1	0.0213	0.0026	-0.0109
0.5784	33.1	0.0170	0.0049	0.0093	1.417	81.1	0.0215	0.0018	-0.0109
0.6649	38.1	0.0174	0.0057	0.0097	1.487	85.2	0.0216	0.0010	-0.0109
0.7514	43	0.0180	0.0066	0.0101	1.558	89.2	0.0216	0.0003	-0.0109
0.8379	48	0.0186	0.0075	0.0106	1.570	90	0.0216	0.0000	-0.0109
0.8650	49.5	0.0188	0.0078	0.0108	-	-	-	-	-



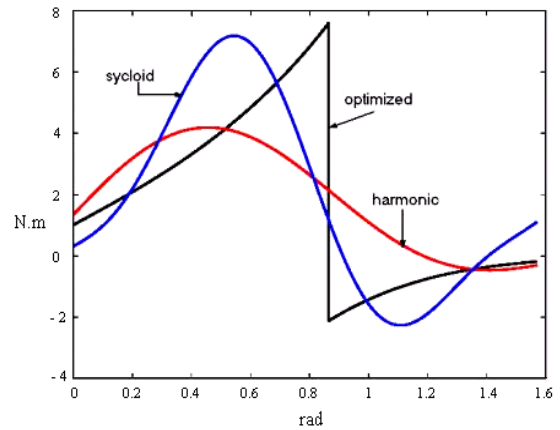
شکل ۲- پروفیل بادامک بهینه



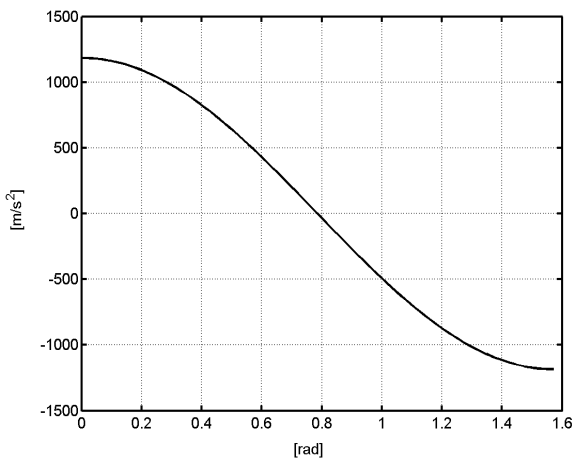
شکل ۱- سیستم بادامک- پیرو موتور پیکان



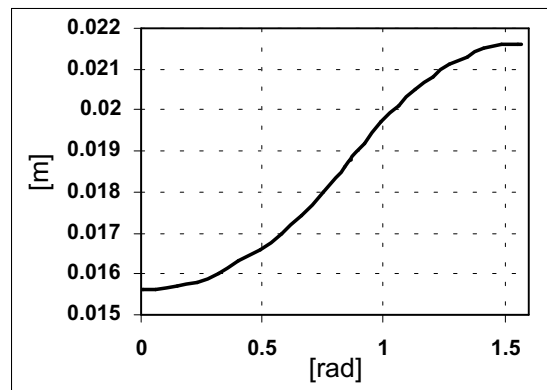
شکل ۶- منحنی شتاب بادامک بهینه



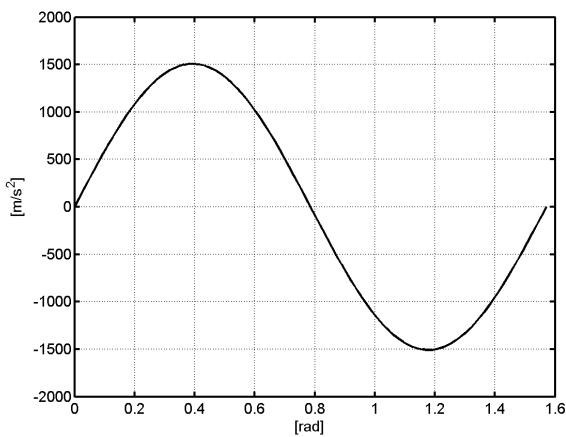
شکل ۳- منحنی گشتاور- زاویه برای بادامکهای بهینه، هارمونیک و سیکلوئید



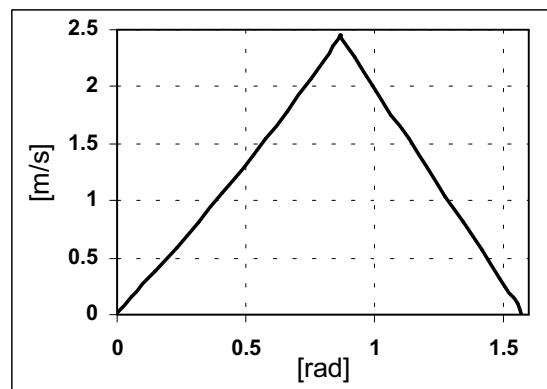
شکل ۷- منحنی شتاب بادامک هارمونیک



شکل ۴- منحنی جابجایی بادامک بهینه



شکل ۸- منحنی شتاب بادامک سیکلوئید



شکل ۵- منحنی سرعت بادامک بهینه