

التحليل الحركي لكامة قرصية ذات أقواس دائرية مع تابع دحروجي دراسة حالة: كامة تحكم بصمام السحب لمحرك احتراق داخلي

د. أيمن الخباز الملقب بالتاجر⁽¹⁾

الملخص

يهدف هذا البحث إلى إجراء تحليل حركي لكامة قرصية ذات جانبية مكونة من أقواس دائرية متماسة مع تابع دحروجي ترددي قطري. تم استخراج العلاقات التي تحدد إزاحة التابع وسرعته وتسارعه بدلالة زاوية دوران الكامة على كل من الجانب المنحني للكامة والأنف، وأمكن من العلاقات المستخرجة الانتقال بسهولة إلى علاقات الكامة ذاتها مع كلا التابعين المدبب والمسطح دون الحاجة للاستنتاج الرياضي من جديد. تم رسم مخططات الحركة بدلالة زاوية دوران الكامة بهدف تقييم أداء الكامة حركياً. يؤدي التغير المفاجئ في التسارع خلال كل من شوطي الرفع والخفض إلى نشوء قوى عطالة متغيرة قيمة واتجاهاً تسبب أحمال صدم تؤثر في تركيب الكامة. جرى تقييم تأثير نصف قطر القطاع الكروي للتابع على تغير التسارع من خلال مثال عددي لكامة تستخدم في التحكم بفتح وإغلاق صمام السحب في محرك احتراق داخلي رباعي الشوط. أجريت مقارنة لأداء الكامة مع كل من نوعي التابعين: ذو القطاع الكروي والمسطح بهدف تحديد المجال الأمثل لنصف قطر القطاع الكروي التي تعطي أقل قيم للتغير المفاجئ في التسارع.

الكلمات المفتاحية: كامة ذات أقواس دائرية، تابع دحروجي، تابع ذو قطاع كروي، تابع مسطح.

⁽¹⁾مدرس في قسم هندسة الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق

Kinematic Analysis of a Circular-Arc Cam with Roller Follower

Case Study: Cam for Controlling Intake Valve in an I.C.E

Dr. Ayman Alkhabbaz/Altajer⁽¹⁾

Abstract

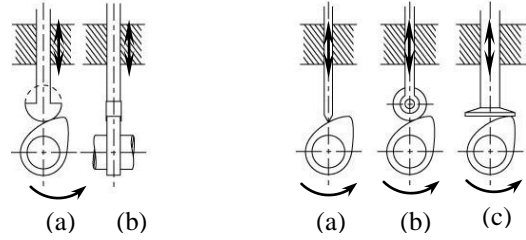
In this research, a kinematic analysis of a circular arc cam with radial reciprocating roller follower has been carried out. The relationships of displacement, velocity and acceleration of the follower on the face arc and nose in terms of the angle of rotation of the cam have been derived. The derived relationships allowed easily to transit to the same cam with both knife-edge and flat-faced followers without new mathematical derivation. Charts of motion are drawn in terms of the angle of rotation of the cam, in order to evaluate its performance kinematically. Sudden changes in acceleration during both the lift and down strokes lead to creation of variable inertia forces in value and direction, causing shock loads that affect the cam mechanism. To evaluate the effect of the radius of the spherical follower on the acceleration change, this research examined a numerical example of a cam that is used to control the opening and closing the intake valve in a four-stroke ICE. A comparison of cam performance was performed with both spherical and flat followers, in order to assess the optimum values for the radius of the spherical follower that gives less sudden change in acceleration.

Key words: Circular Arc Cam, Roller Follower, Spherical Follower, Flat-Faced Follower

⁽¹⁾ General Mechanics Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University.

1- المقدمة:

تعدّ تركيبة الكامنة من أبسط الوسائل التي تؤمن تقريباً أية حركة مطلوبة للتابع، حتى في فترات السكون، لذلك فإن لهذه التركيبات مجالات تطبيقية واسعة وعلى الأخص في محركات الاحتراق الداخلي. سوف يتناول هذا البحث الكامنة القرصية المستوية ذات الجانبية المكونة من أقواس دائرية متماسة فيما بينها، ومتناظرة حول مستوي تناظر مار من مركز الدوران؛ لذا يمكن استعمال أي نوع من التوابع، وكحالة خاصة التابع الدحروجي الذي تتكون نهايته من دحروج أو بكرة تتصل مع ساق التابع بازدواج دوراني كما هو مبين في b من الشكل (1)، حيث تعتمد حركة التابع الترددية على زاوية دوران الكامنة.



الشكل (1)

الشكل (2)

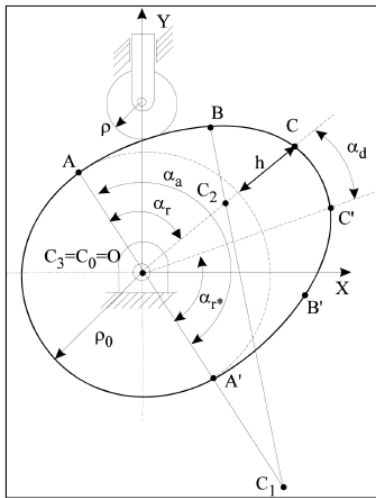
في محركات الاحتراق الداخلي يستعمل شكل معدل للتابع المسطح، بحيث تكون نهايته على شكل قطاع كروي، كما هو مبين في a من الشكل (2). إن إزاحة التابع الموافقة لدوران الكامنة تكافئ الإزاحة الناتجة من تابع دحروجي يساوي قطره لقطر الكرة المشكّلة لنهاية التابع، كما أن نقطة الأثر في التابع الكروي هي مركز الكرة المشكّلة لسطح نهايته. يستعمل هذا النوع عادة عندما يكون الحيز المتاح لتركيبة الكامنة محدوداً.

إن طبيعة دراسة الكامنة عندئذٍ تصبح تحليل حركة التابع الناتجة من جانبية محددة للكامنة، كما سيتضح لاحقاً، حيث سيعتمد مبدأ انعكاس الحركة في تثبيت الكامنة، وتدوير محور التابع حولها بعكس اتجاه دورانها

الفعلي، كما أن الكامنة تعتبر عند الحسابات تدور بسرعة زاوية ثابتة ω ، أي إنها تخضع لقانون الحركة الدورانية المنتظمة $\theta = \omega.t$ [1].

في البحث [10] جرى دراسة كامنة ذات أقواس دائرية كما هو مبين في الشكل (3) بحيث تم تطوير خوارزميات جبرية أعطت تصاميم مناسبة للكامنة سهلة التشغيل وقد تم تصنيع واختبار الكامنة تجريبياً.

النتائج التي حصل عليها الباحثون تمكن من توسيع صياغة التصميم الحاسوبي والتجريبي وعدم اقتصره على ملامح دائرية لقوس محدد بل يمكن أن يمتد لأي

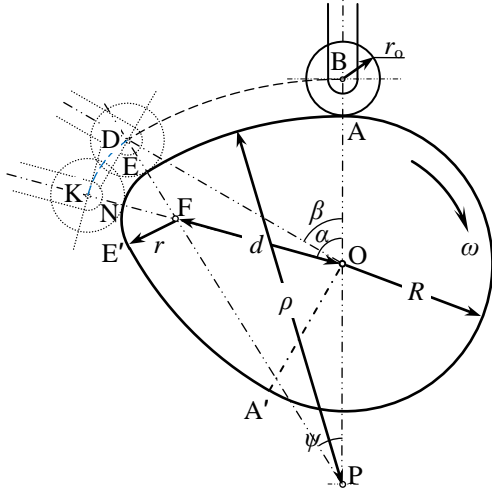


الشكل (3) رسم تخطيطي لكامنة قرصية مكونة من أقواس دائرية مع تابع دحروجي حسب [10].

البحث لم يقدم علاقات رياضية واضحة للكامنة القرصية موضوع هذا البحث.

أما البحث [5] فقد اهتم بالتصميم الأمثل لتركيبات الكامنة القرصية مع تابع دحروجي للتأثير المشترك لأحمال الصدم العالية وحمولات التماس بين التابع والكامنة، لذلك درس الباحث التحميل الديناميكي العالي (مثل تأثير انتشار موجات الضغط المرنة) التي تنتج عن حركة التابع

التابع بدءاً من نقطة التماس A، حتى يصبح التماس عند النهاية E لقوس الجانب الدائري.

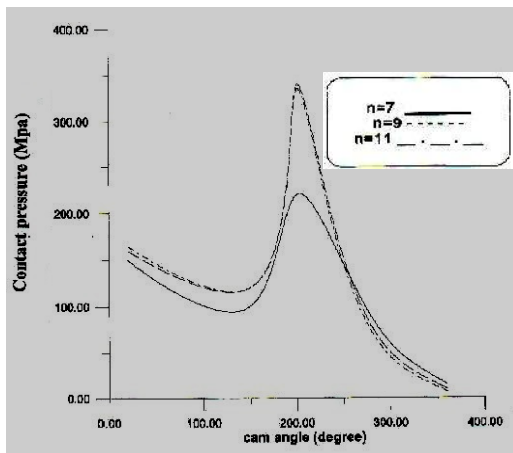


الشكل (5) رسم تخطيطي لكامة قرصية مكونة من أقواس دائرية مع تابع درجوي ترددي قطري.

سيتم أولاً إيجاد العلاقات الهندسية بين مختلف الأبعاد والزوايا التي تحدد جانبيه كامة مكونة من أقواس دائرية مع تابع درجوي ترددي قطري. حسب الشكل (5)، العوامل التي تحدد أداء التابع هي أبعاد الكامة وزواياها: $d, r, R, \beta, \psi, \alpha, r_o, \rho$ بالإضافة لـ S طول شوط التابع.

الدروجي على سطح الكامة والتي تختلف باختلاف الأحمال التلامسية الكبيرة عند سرعات الدوران العالية كما في الشكل (4).

والجدير بالذكر أيضاً أن العديد من مراجع نظرية الآلات [1]، [7]، [8]، [12] لم تتطرق تحليلياً للكامة القرصية المحددة الجانب موضوع هذا البحث.



الشكل (4) مخطط توزيع ضغط التماس على حافة الكامة القرصية حسب [5].

2- التحليل الحركي للكامة مع تابع درجوي

يبين الشكل (5) كامة من هذا النوع ذات تابع درجوي ترددي قطري، حيث مركز القوس الدائري AE هو P، ونصف قطره $(AP=EP = \rho)$. بما أن الكامة تدور بسرعة زاوية ثابتة ω باتجاه دوران عقارب الساعة، فإن محور التابع سيدور عند تثبيت الكامة عكس اتجاه دوران عقارب الساعة. من الواضح أن الزاوية $(APE = \psi)$ تمثل الزاوية التي تحصر قوس جانب الكامة الدائري الذي نصف قطره ρ ، بينما الزاوية $(BOD = \beta)$ تمثل الزاوية التي يدورها محور

$$\frac{OP}{\sin(\beta-\psi)} = \frac{PD}{\sin(180-\beta)} = \frac{PD}{\sin\beta}$$

$$\Rightarrow \sin(\beta-\psi) = OP \sin\beta / PD$$

وبما أن $OP = \rho - R$ و $PD = \rho + r_0$, ويفرض أن:

$$n = (\rho + r_0) / (\rho - R) \quad (4)$$

حيث n ثابت لا بعدي، ينتج بعد الإصلاح:

$$\tan\beta = (n \sin\psi) / (n \cos\psi - 1) \quad (5)$$

وبذلك نحصل على جملة معادلات، تربط بين متغيرات الكامة.

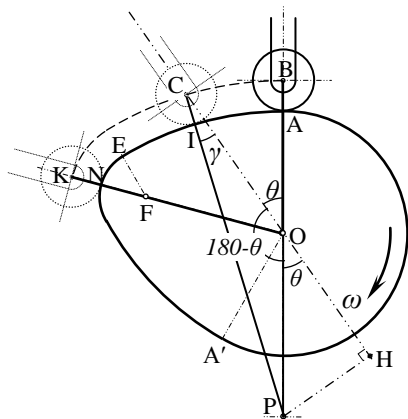
3- تحليل حركة التابع على جانب الكامة

تبدأ حركة التابع الدروجي على جانب الكامة عندما

يمس التابع جانب الكامة من الوضع A حتى E

خلال دوران الكامة زاوية: $0 \leq \theta \leq \beta$

فإذا دارت الكامة زاوية θ من أخفض وضع A ، فإن هذا يكافئ دوران محور التابع بالجهة المعاكسة بحيث يبقى محوره ماراً O ، بينما يجب أن يمر الخط المرسوم من مركز الدروج C ونقطة التماس I من مركز دائرة الجانب P . وبما أن نقطة الأثر للتابع هي مركز الدروج الذي يرسم منحنى الخطوة BCK ، كما في الشكل (7)،

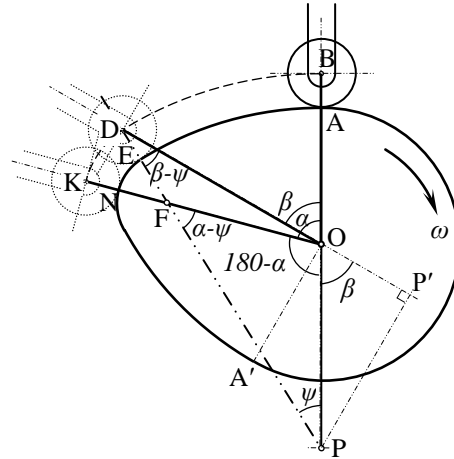


الشكل (7) علاقة الإزاحة على الجانب بدلالة الزاوية θ

من الشكل (6) نلاحظ أن طول شوط التابع S هو:

$$S = OK - OB = OF + FN + KN - (OA + AB)$$

$$S = d + r - R \quad (1)$$



الشكل (6) رسم تخطيطي لاستنتاج علاقات الأبعاد والزاويا

من تحليل المثلث OPF يتم إيجاد ρ حيث:

$$PF^2 = OP^2 + OF^2 - 2OP \cdot OF \cdot \cos(180 - \alpha)$$

بالتعويض بأطوال أضلاع المثلث بدلالة المتغيرات

ρ, r, R, d نحصل بعد الإصلاح على:

$$\rho = \frac{R^2 - r^2 + d^2 - 2R \cdot d \cdot \cos\alpha}{2(R - r - d \cdot \cos\alpha)} \quad (2)$$

كما أنه يمكن من المثلث نفسه تعيين قيمة الزاوية ψ :

$$\frac{OF}{\sin\psi} = \frac{PF}{\sin(180-\alpha)} = \frac{PF}{\sin\alpha} \Rightarrow \frac{d}{\sin\psi} = \frac{\rho - r}{\sin\alpha}$$

$$\Rightarrow \sin\psi = d \sin\alpha / (\rho - r) \quad (3)$$

أما زاوية الحركة β على جانب الكامة الدائري AE

فإنه يمكن تحديدها من تحليل المثلث ODP حيث:

$$A_{\theta} = \frac{dV_{\theta}}{dt} = \frac{dV_{\theta}}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \omega \cdot \frac{dV_{\theta}}{d\theta} =$$

$$= \omega^2 (\rho - R) \frac{d}{d\theta} \left[\sin \theta - \frac{\sin 2\theta}{2\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right]$$

$$A_{\theta} = \omega^2 (\rho - R) \left[\cos \theta - \frac{\sin^4 \theta + n^2 \cos 2\theta}{(n^2 - \sin^2 \theta)^{3/2}} \right] \quad (8)$$

يلاحظ من المعادلة (8) أن تسارع التابع يزداد من قيمة فجائية صغيرة عندما:

$$\theta = 0 \Rightarrow A_{\theta=0} = A_A = \omega^2 (\rho - R) (1 - 1/n)$$

إلى قيمة عظمى عندما:

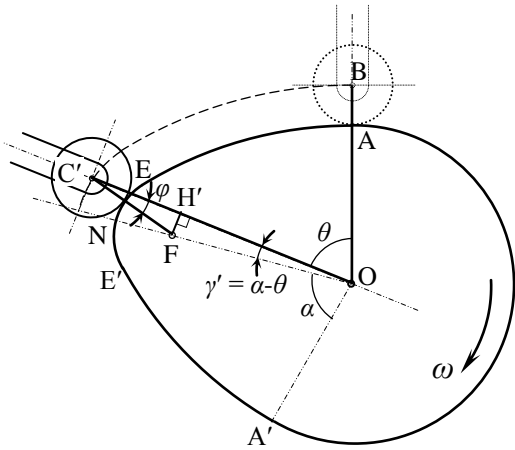
$$\theta = \beta \Rightarrow A_{(\theta=\beta)} = A_E =$$

$$= \omega^2 (\rho - R) \left[\cos \beta - \frac{\sin^4 \beta + n^2 \cos 2\beta}{(n^2 - \sin^2 \beta)^{3/2}} \right]$$

4- تحليل حركة التابع على أنف الكامة

تبدأ حركة التابع على أنف الكامة، عندما يمس الدحرج القوس الدائري EN خلال دوران الكامة زاوية:

$$\beta \leq \theta \leq \alpha$$



الشكل (8) علاقة الإزاحة على الأنف بدلالة الزاوية θ

فإذا دارت الكامة زاوية θ من أخفض وضع لمركز الدحرج B، كما هو مبين في الشكل (8)، فإن هذا يكافئ دوران محور التابع حتى الوضع C'، وتكون إزاحة التابع عندئذٍ هي:

تكون إزاحة التابع عندئذٍ هي:

$$x_{\theta} = OC - OB = HC - HO - OB =$$

$$= HC - OP \cos \theta - OB$$

إذ إن: OH يعامد PH، و $HC = PC \cos \gamma$

ومن تحليل المثلث OCP نجد:

$$\frac{OP}{\sin(\gamma)} = \frac{PC}{\sin(180 - \theta)} = \frac{PC}{\sin \theta} \Rightarrow$$

$$\sin(\gamma) = OP \sin \theta / PC$$

$$\sin(\gamma) = \frac{\rho - R}{\rho + r_o} \sin \theta \Rightarrow \sin^2(\gamma) = \frac{1}{n^2} \sin^2 \theta$$

تجدر الإشارة هنا إلى أن الزاوية γ هنا ما هي إلا زاوية الضغط والتي تعرّف في المراجع على أنها الزاوية بين اتجاه حركة التابع، والناظم المشترك للكامة والتابع عند نقطة التماس. يلاحظ في هذه الكامة أن زاوية الضغط تزداد مع زيادة زاوية حركة الكامة θ لتبلغ قيمتها العظمى عند نهاية الحركة على جانب الكامة.

بإيجاد $\cos \gamma$ بدلالة $\sin \gamma$ ينتج بعد الإصلاح:

$$\cos \gamma = \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} / n$$

كما أنه من المثلث القائم CHP لدينا

$$HC = PC \cos \gamma = (\rho + r_o) \cos \gamma$$

بالتعويض في علاقة الإزاحة x_{θ} والإصلاح ينتج:

$$x_{\theta} = (\rho - R) [\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta] - (R + r_o)$$

(6)

تحدد معادلة سرعة التابع V_{θ} من اشتقاق معادلة

إزاحة التابع (6) بالنسبة للزمن، حيث ينتج أن:

$$V_{\theta} = \frac{dx_{\theta}}{dt} = \frac{dx_{\theta}}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \omega \cdot \frac{dx_{\theta}}{d\theta} =$$

$$= \omega (\rho - R) \left[\frac{-2 \sin \theta \cdot \cos \theta}{2\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} + \sin \theta \right]$$

$$V_{\theta} = \omega (\rho - R) \left[\sin \theta - \frac{\sin 2\theta}{2\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right] \quad (7)$$

حيث ($\omega = d\theta/dt$) تمثل السرعة الزاوية الثابتة للكامة.

أما معادلة تسارع التابع A_{θ} ، فإنها تنتج من اشتقاق

معادلة سرعة التابع (7) بالنسبة للزمن، حيث نحصل:

$$A_{\gamma'=(\alpha-\beta)} = A_E = -\omega^2 \cdot d [\cos(\alpha - \beta) + \frac{\sin^4(\alpha - \beta) + n'^2 \cdot \cos 2(\alpha - \beta)}{[n'^2 - \sin^2(\alpha - \beta)]^{3/2}}]$$

إلى قيمة أخرى أعلى أو أدنى عندما:

$$\gamma' = 0 \Rightarrow A_{(\gamma'=0)} = A_N = -\omega^2 \cdot d (1 + \frac{1}{n'})$$

وهكذا فإن حركة التابع متباطئة خلال هذه الفترة، ويمكن أن يحدث أعظم تباطؤ للتابع وفقاً للمعادلة (12) عند E، أو N كما في الشكل (15) بحسب القيم النسبية لكل من d و n ، ولا يتأكد ذلك إلا بالحساب العددي.

من المهم ذكره، أن المعادلات المستخرجة من (1) إلى (12) لحالة تابع دحرجي ترددي قطري تصلح أيضاً للتابع الكروي Spherical Follower والذي يفضل استخدامه في محركات الاحتراق الداخلي، بسبب كون الحيز المتاح لتركيب الكامة محدوداً.

ومن الجدير بالذكر أيضاً أن المعادلات المستخرجة من

(1) إلى (12) تسمح بالانتقال إلى نوعين آخرين من التتابع مع نفس نوع الكامة وهما:

- التابع المدبب Knife-Edge Follower

- التابع المسطح Flat-Faced Follower

دون الحاجة للاستخراج من جديد لكل من الحالتين المذكورتين وسيتم بيان ذلك كما يلي:

• حالة الكامة مع تابع مدبب ترددي قطري:

يمكن استناداً للشكل (9) إيجاد المعادلات التي تربط بين الأبعاد والزوايا وكذلك معادلات الإزاحة والسرعة والتسارع لنقطة الأثر على كل من الجانب والأنف دون الحاجة للاستنتاج الرياضي، حيث يلاحظ أنه في التابع المدبب يتلاشى الدحرج وينعدم نصف قطره أي $r_o = 0$ منه ينتج أن العلاقات (1) و (2) و (3) تبقى على حالها دون تغيير، والعلاقتان (4) و (5) تصبحان على الشكل:

$$x = OC' - OB = OH' + H'C' - (OA + AB)$$

حيث ينتج من تحليل المثلث OCF أن:

$$x = OF \cdot \cos(\alpha - \theta) + FC' \cdot \cos \phi - (OA + AB)$$

منه:

$$x = d \cdot \cos(\alpha - \theta) + (r + r_o) \cos \phi - (R + r_o)$$

$$FH' = OF \cdot \sin(\alpha - \theta) = FC' \cdot \sin \phi \quad \text{وبما أن:}$$

$$d \cdot \sin(\alpha - \theta) = (r + r_o) \sin \phi \Rightarrow$$

$$\sin \phi = d \sin(\alpha - \theta) / (r + r_o)$$

فإذا وضعنا:

$$\gamma' = (\alpha - \theta) \quad , \quad n' = (r + r_o) / d \quad (9)$$

حيث إن γ' تمثل زاوية الدوران الموافقة للحركة على أنف الكامة، وهي زاوية متناقصة قيمتها العظمى ($\gamma'_{\max} = \alpha - \beta$) عندما يمس الدحرج بداية الأنف ($\theta = \beta$) في E، وقيمتها الصغرى ($\gamma'_{\min} = \alpha - \alpha = 0$) عندما يمس الدحرج نهاية الأنف ($\theta = \alpha$) في N.

بالتعويض في معادلة إزاحة التابع x والإصلاح

$$x_{\gamma'} = d(\cos \gamma' + \sqrt{n'^2 - \sin^2 \gamma'}) - (R + r_o) \quad (10)$$

تحدد معادلة سرعة التابع $V_{\gamma'}$ من اشتقاق معادلة

إزاحة التابع (10) بالنسبة للزمن، حيث نحصل:

$$V_{\gamma'} = \frac{dx_{\gamma'}}{dt} = d \left[-\sin \gamma' - \frac{\sin 2\gamma'}{2\sqrt{(n'^2 - \sin^2 \gamma')}} \right] \frac{d\gamma'}{dt}$$

$$V_{\gamma'} = \omega \cdot d \left[\sin \gamma' + \frac{\sin 2\gamma'}{2\sqrt{(n'^2 - \sin^2 \gamma')}} \right] \quad (11)$$

$$\frac{d\gamma'}{dt} = \frac{d}{dt}(\alpha - \theta) = \frac{d\alpha}{dt} - \frac{d\theta}{dt} = -\omega$$

أما معادلة تباطؤ التابع $A_{\gamma'}$ ، فإنه تنتج من اشتقاق

معادلة سرعة التابع (11) المتناقصة بالنسبة للزمن:

$$A_{\gamma'} = -\omega^2 \cdot d \left[\cos \gamma' + \frac{\sin^4 \gamma' + n'^2 \cdot \cos 2\gamma'}{(n'^2 - \sin^2 \gamma')^{3/2}} \right] \quad (12)$$

يلاحظ من المعادلة (12) أن تباطؤ التابع يتغير من

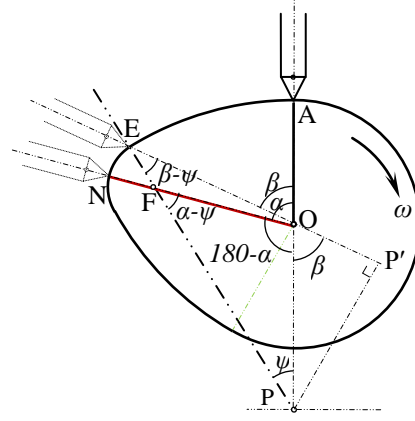
قيمة مقدارها:

$$n^* = \rho / (\rho - R) \quad (4)'$$

$$A_{\gamma'} = -\omega^2 \cdot d \left[\cos \gamma' + \frac{\sin^4 \gamma' + n'^{*2} \cdot \cos 2\gamma'}{(n'^{*2} - \sin^2 \gamma')^{3/2}} \right] \quad (12)'$$

$$\tan \beta = n^* \sin \psi / (n^* \cos \psi - 1) \quad (5)'$$

إن التماس بين الكامة ونهاية التابع في هذه الحالة هو تماس نقطي، تنتج منه حركة انزلاقية نسبية كبيرة بين الكامة والتابع، كما هو مبين في a من الشكل (1).



حالة الكامة مع تابع مسطح ترددي قطري:

يمكن استناداً للشكل (10) إيجاد المعادلات التي تربط بين الأبعاد والزوايا وكذلك معادلات الإزاحة والسرعة والتسارع لنقطة الأثر على كل من الجانب والأنف دون الحاجة للاستنتاج الرياضي، حيث يلاحظ أنه في التابع المسطح يصبح نصف قطر الدحرج لا نهائي أي

$$r_0 = \infty \text{ منه ينتج أن العلاقات}$$

$$(1) \text{ و } (2) \text{ و } (3) \text{ تبقى على حالها دون تغيير.}$$

$$\text{من العلاقة (4) ينتج: } n = (\rho + \infty) / (\rho - R) = \infty$$

$$\text{من العلاقة (5) ينتج:}$$

$$\tan \beta \cos \psi - \sin \psi = \frac{1}{n} \tan \beta = \frac{1}{\infty} \tan \beta = 0$$

ومن

$$\tan \beta = \tan \psi \Rightarrow \beta = \psi$$

أي إن الزاوية ψ ستطبق في هذه الحالة على الزاوية β كما هو مبين في الشكل (10).

الشكل (9) رسم تخطيطي لكامة قرصية مكونة من أقواس دائرية مع تابع مدبب ترددي قطري.

علاقات الإزاحة والسرعة والتسارع على الجانب تصبح:

$$x_{\theta} = (\rho - R) [\sqrt{n'^{*2} - \sin^2 \theta} - \cos \theta] - (R) \quad (6)'$$

$$V_{\theta} = \omega (\rho - R) \left[\sin \theta - \frac{\sin 2\theta}{2\sqrt{n'^{*2} - \sin^2 \theta}} \right] \quad (7)'$$

$$A_{\theta} = \omega^2 (\rho - R) \left[\cos \theta - \frac{\sin^4 \theta + n'^{*2} \cos 2\theta}{(n'^{*2} - \sin^2 \theta)^{3/2}} \right] \quad (8)'$$

وعلاقات الحركة على الأنف تصبح بعد وضع:

$$(\alpha - \theta) = \gamma' \quad , \quad r / d = n'^{*} \quad (9)'$$

$$x_{\gamma'} = d (\cos \gamma' + \sqrt{n'^{*2} - \sin^2 \gamma'}) - (R) \quad (10)'$$

$$V_{\gamma'} = \omega \cdot d \left[\sin \gamma' + \frac{\sin 2\gamma'}{2\sqrt{(n'^{*2} - \sin^2 \gamma')}} \right] \quad (11)'$$

دائرية مع تابع مسطح ترددي قطري في معظم المراجع العلمية مثل: [1]، [7]، [8]، [11] وقد استطعنا الحصول عليها مباشرة دون الحاجة للاستنتاج الرياضي.

5- دراسة حالة - كامرة مع تابع للتحكم

بصمام السحب لمحرك احتراق داخلي

استناداً إلى ما سبق، تم تمثيل مخططات الإزاحة، والسرعة والتسارع للتابع في المجال من A إلى N كما هو مبين في الأشكال (13) و(14) و(15). ولرسم هذه المخططات لا بد من إعطاء قيم عددية لأبعاد الكامرة لبيان تغيرات مخططات الحركة بدلالة زاوية دوران الكامرة θ بدقة. يلاحظ من الفقرة 2 أنه تم استخراج أربع علاقات تربط بين متغيرات الكامرة التسعة، وبالتالي يجب إعطاء قيم لخمس من هذه المتغيرات ومن ثم حل أربع معادلات بأربعة مجاهيل وهذه المعادلات هي: (1)، (2)، (3) و(5).

وبهدف المقارنة بين أداء التابع المسطح والتابع ذو القطاع الكروي، سيتم استخدام تطبيق عددي فعلي لكامرة مكونة من أقواس دائرية متماسة فيما بينها تستعمل في ضبط توقيت صمام السحب لمحرك بنزين رباعي الشوط كما هو مبين في الشكل (11).



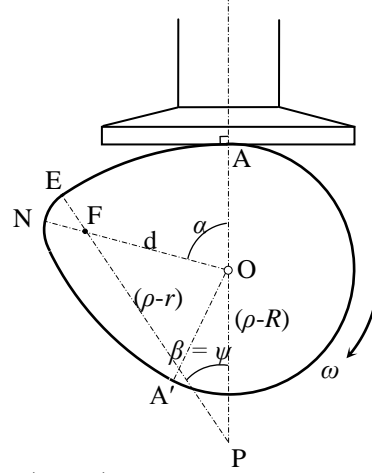
الشكل (11)

آلية التحكم بصمام السحب والطردي في محرك احتراق

بكتابة العلاقة (6) بالشكل

$$x_{\theta} = (\rho + r_0) \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} - \sin^2 \theta} - (\rho - R) \cos \theta - (R + r_0)$$

فعندما تتناهي r_0 إلى ∞ و n تتناهي إلى ∞ نحصل



الشكل (10) رسم تخطيطي لكامرة قرصية

كونة من أقواس دائرية مع تابع مسطح ترددي

على علاقات الحركة على الجانب حيث ينتج من العلاقات (6) و(7) و(8):

$$x_{\theta} = (\rho - R) (1 - \cos \theta) \quad (6)''$$

$$V_{\theta} = \omega (\rho - R) \sin \theta \quad (7)''$$

$$A_{\theta} = \omega^2 (\rho - R) \cos \theta \quad (8)''$$

وكذلك الأمر بالنسبة لعلاقات الحركة على الأنف (10) و(11) و(12) الأنفة الذكر نحصل بعد وضع:

$$n' = \frac{r + \infty}{d} = \infty, \quad r_0 = \infty, \quad \gamma' = (\alpha - \theta)$$

$$x_{\theta} = d \cdot \cos(\alpha - \theta) + r - R \quad (10)''$$

$$V_{\theta} = \omega \cdot d \cdot \sin(\alpha - \theta) \quad (11)''$$

$$A_{\theta} = -\omega^2 \cdot d \cdot \cos(\alpha - \theta) \quad (12)''$$

وهذه العلاقات مستنتجة لحالة كامرة مكونة من أقواس

هي: $2\alpha = 180/2 = 90^\circ$. أما ما يحدث فعليا بحسب الشرط أعلاه فإنه سيعطي:

$$2\alpha = (15 + 180 + 45) / 2 = 120^\circ$$

أي إن زاوية الرفع أو الخفض ستكون 60° كما أن زاوية دوران الكامة الكلية 360° مما يعني أن زاوية السكون ستكون $240^\circ = 360 - 120$ خلالها يكون التابع بحالة سكون أي إن صمام السحب بحالة إغلاق.

يلاحظ أنه لدينا أربع متغيرات معطاة من شروط التطبيق العددي وهي: R, S, r, α . أما بقية المتغيرات d, ρ, Ψ و β فيتم حسابها من العلاقات من (1) إلى (5)، والمتغير التاسع هو r_o والذي سيتم تغييره لاحقاً لبيان تأثيره على قيم التغير المفاجئ في التسارع خلال شوط الرفع كما هو مبين في الشكل (15) لذلك سنقوم أولاً بحساب المتغيرات الأخرى:

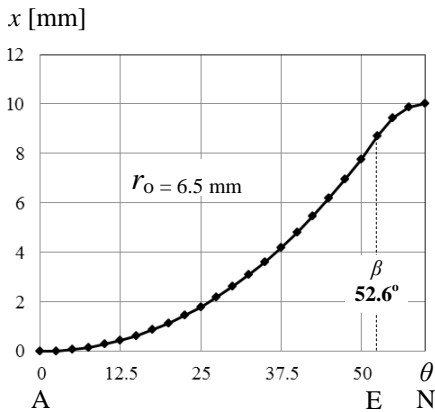
أولاً: من أجل تابع ذي قطاع كروي حسب الشكل

(6):

بتعويض القيم العددية في العلاقات (1) ← (5) ينتج:

$$d = 32.5 \text{ mm} , \rho = 69 \text{ mm} , \psi = 25^\circ$$

$$n = 1.716 , \beta = 52.63^\circ$$

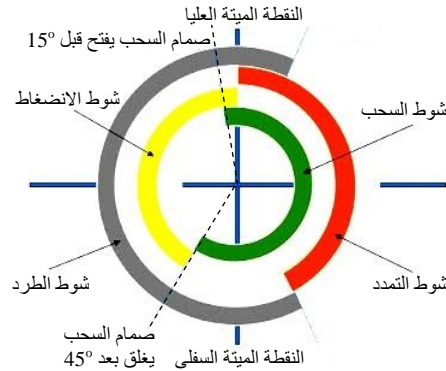


الشكل (13) تغير إزاحة التابع بدلالة الزاوية θ

تستلزم الدراسة الحرارية للمحرك، كما هو مبين في الشكل (12)، ضرورة البدء بفتح الصمام عندما يكون الوضع الزاوي للمرفق متقدماً بزاوية 15° قبل النقطة الميتة العليا، بينما يجب إغلاق الصمام عندما يكون المرفق قد دار بزاوية 45° بعد وضع النقطة الميتة السفلى وذلك بهدف إدخال أكبر قدر من شحنة مزيج الهواء والوقود خلال شوط السحب. (تختلف قيم هاتين الزاويتين من محرك لآخر حسب التصميم).

المعطيات العددية للكامة:

نصف قطر الدائرة الأساسية للكامة $R = 25 \text{ mm}$
شوط رفع التابع $S = 10 \text{ mm}$
نصف قطر دائرة أنف الكامة $r = 2.5 \text{ mm}$
نصف قطر دائرة القطاع الكروي $r_o = 6.5 \text{ mm}$
سرعة دوران عمود المرفق 4000 r.p.m



الشكل (12) مخطط توقيت صمام السحب في

محرك احتراق داخلي رباعي الشوط.

بما أن المحرك رباعي الشوط، فإن كل دورتين للعمود المرفقي توافق دورة واحدة لعمود الكامة وبالتالي:

$$n = 4000/2 = 2000 \text{ r.p.m}$$
 سرعة دوران الكامة

$$\omega = 2\pi \cdot 2000/60 = 209.44 \text{ r/s}$$
 ومنه السرعة الزاوية

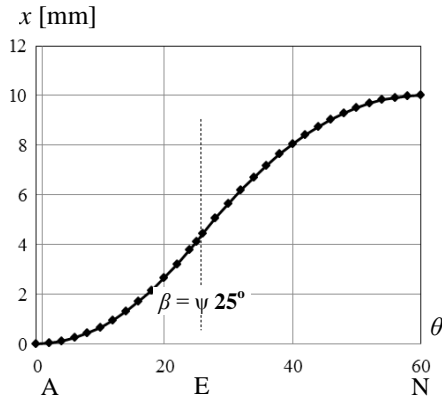
وبما أنه لإتمام شوط السحب يدور عمود المرفق زاوية قدرها $180^\circ = 720/4$ ، وخلالها يرتفع التابع وينخفض وبالتالي زاوية العمل الكلية النظرية اللازمة لشوط الرفع

ثانياً: من أجل تابع مسطح حسب الشكل (10) :

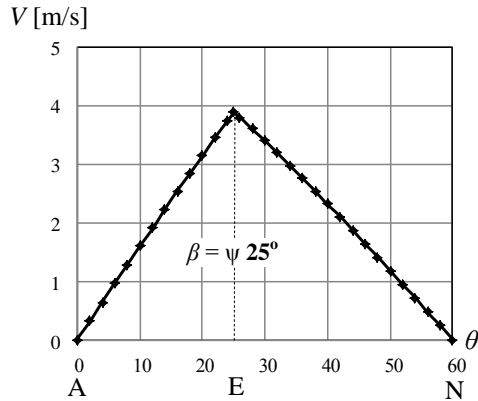
من العلاقات (1) ← (5) ينتج:

$$d = 32.5 \text{ mm} , \rho = 69 \text{ mm} , \psi = 25^\circ$$

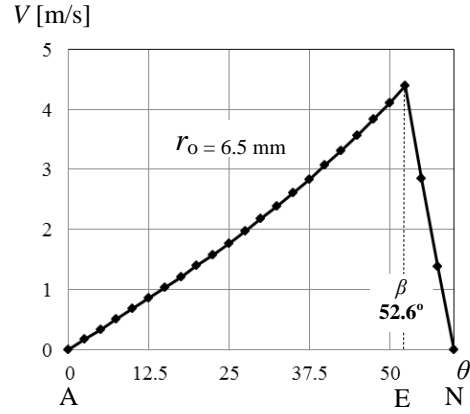
$$n = \infty \Rightarrow \beta = \psi = 25^\circ$$



الشكل (16) تغير إزاحة التابع بدلالة الزاوية θ

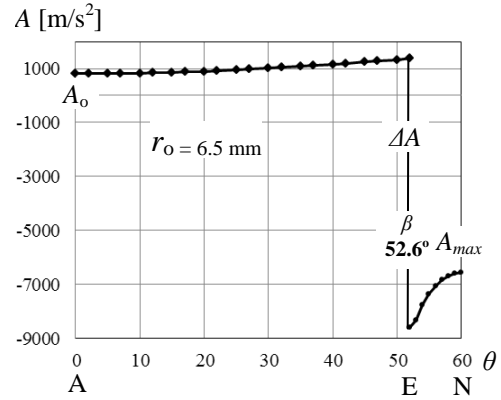


الشكل (17) تغير سرعه التابع بدلاله الزاويه θ



الشكل (14) تغير سرعة التابع بدلالة الزاوية θ

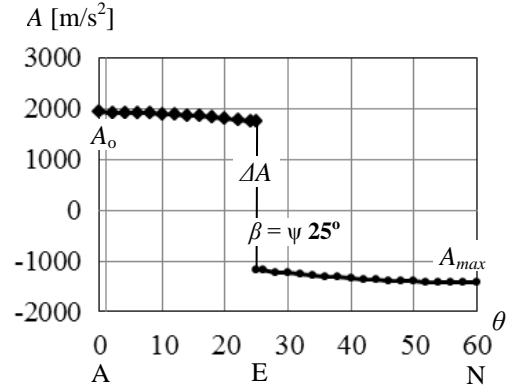
تبين الأشكال (13)، (14)، (15) تغيرات الإزاحة والسرعة والتسارع من أجل تابع ذي قطاع كروي بنصف قطر 6.5 mm وهي قيمة أولية مفروضة.



الشكل (15) تغير تسارع التابع بدلالة الزاوية θ

عند بداية الحركة على الأنف أو نهايته حسب شكل نهاية التابع.

- حسب مخططي التسارع (15) و(18) يلاحظ وجود تغير مفاجئ في التسارع عند نقطة انتقال نقطة تماس التابع الدحرجي أو المسطح E من نهاية الحركة على الجانب المنحني وبداية الحركة على الأنف ممثلاً بالخط الرأسى المبين على مخطط التسارع.
 - التسارع يغير اتجاهه فجأة عند بداية كل شوط ونهايته وعند نقطتي الانعطاف مما يؤدي الى معدل تغير لا نهائي في القوى الديناميكية مما يؤدي لحدوث ما يسمى الرجفة (Jerk)؛ بسبب الاهتزاز الشديد الذي تحدثه في تركيبة الكامرة.
 - من الضروري إذاً في حال سرعات دوران عالية، اختيار الحركة بشكل يعطي أقل قيم ممكنة لقوى العطالة؛ بخاصة خلال فترات الحركة التي تؤثر فيها هذه القوى، باتجاه إبعاد التابع عن سطح الكامرة والتي تحدث أثناء الحركة المتباطئة على أنف الكامرة خلال شوط الرفع أو المتسارعة على أنف الكامرة خلال شوط الخفض. كما أن نمط تغير هذه القوى له تأثير أساسي في نشوء أحمال ديناميكية فجائية إذا كان معدل تغير قوى العطالة كبيراً.
- إن لمخطط التسارع أهمية خاصة في دراسة الكامرات؛ وبخاصة في حالة سرعات دوران عالية؛ لأن قيمة التسارع تتناسب مع مربع السرعة الزاوية كما هو واضح من العلاقتين (8) و(12) يمكن أن يؤدي اختيار حركة معينة لتابع ما إلى حدوث اهتزازات وإجهادات عالية ينتج منها تآكل سريع في سطوح التماس.
- أما مخططات حركة التابع خلال شوط الخفض من N إلى A' حسب الأشكال (6)، (7)، (8) و(10) فإنها



الشكل (18) تغير تسارع التابع بدلالة الزاوية θ

- عندها تتخذ تغيرات الإزاحة والسرعة والتسارع من أجل تابع مسطح ترددي الأشكال (16)، (17)، (18) :
- يلاحظ من مخططات الحركة ما يلي:**
- إن سرعة خلال كل من شوطي الرفع والخفض هي حتماً متغيرة.
 - التابع يبدأ حركته من السكون عند بداية كل من الشوطين ليعود إلى السكون في نهاية كل منهما.
 - حركة التابع خلال كل من شوطيه، تبدأ متسارعة لفترة ثم تصبح متباطئة حتى نهاية الشوط. يؤدي ذلك إلى نشوء قوى عطالة متغيرة قيمة واتجهاً تؤثر في إبعاد التابع عن سطح الكامرة؛ خلال الفترات التي يكون فيها اتجاه التسارع أو التباطؤ نحو مركز دوران الكامرة.
 - يتغير التسارع بحيث يزداد من الصفر إلى قيمة ما عند A بداية الحركة على الجانب بشكل مفاجئ ويتابع بالتزايد للتابع الدحرجي أو التناقص للتابع المسطح حتى النقطة E الموافقة لنهاية الحركة على الجانب المنحني.
 - الحركة على الأنف متباطئة حيث يبين المنحني من E إلى N تغير التباطؤ بحيث يحدث التباطؤ الأعظمي

تمت برمجة علاقات الكامة المستخرجة أعلاه على برنامج EES و Excel، وتم تغيير البارامترات تبعاً استناداً لمعطيات الجدول (2)، من ثم تم لكل حالة على حدة تحديد تأثير زيادة r على حساب تناقص d والحفاظ على طول الشوط S وزاوية الرفع α ، كونها قيم تصميمية، وفي الوقت نفسه تم زيادة r_0 تدريجياً وتم حساب قيم A_0 ، ΔA و A_{max} ، بهدف تحديد مجال قيم r_0 المثلى التي تعطي أقل قيمةً للتسارعات المذكورة أعلاه والتخلص من التابع المسطح قدر الإمكان. وقد نتج عن ذلك حجم حسابات كبير تم تلخيصه بالجدولين (1)، (2)، والمخططات (19)، (20) و (21).

يلاحظ من الشكل (19) أنه مع زيادة نصف قطر انحناء القطاع الكروي r_0 تقترب زاوية الحركة على الجانب المنحني β تدريجياً من الزاوية ψ الثابتة في التابع المسطح، حيث $r_0 = \infty$ مما يثبت صحة العلاقات المستخرجة لتابع مسطح حسب الشكل (10). أما الشكل (20) والمأخوذ مباشرة من الجدول (1) وكذلك من الحالة الأولى للجدول (2) فهو يبين أصغر تغير مفاجئ في التسارع ΔA بين قيمته في نهاية الحركة على الجانب المنحني وبداية الحركة على الأنف، وكذلك قيم التسارع بداية الجانب والتباطؤ بداية الأنف، وهي تحدث كما هو واضح من الشكل (20) عند قيم لنصف قطر للقطاع الكروي تزيد عن 100 mm. يلاحظ أنه عند قيم منخفضة لـ r_0 في المجال:

$$6.5 \text{ mm} \leq r_0 < 50 \text{ mm}$$

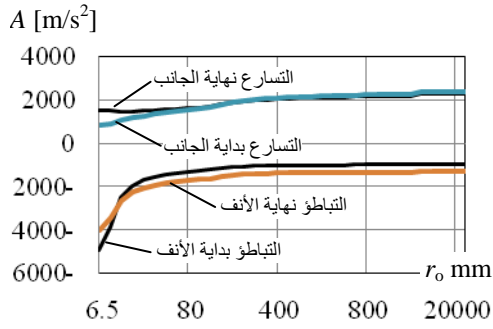
متناظرة مع المخططات المبينة في الأشكال من (13) إلى (18) حول المحور الشاقولي المار من N . بما أن التابع المسطح يشغل حيزاً كبيراً، لذا يمكن استبداله بتابع ذي نهاية معدلة على شكل قطاع كروي. وسيكون أحد أهداف هذا البحث إيجاد نصف القطر الأمثل r_0 حيث تكون التغيرات المفاجئة في التسارع أقل ما يمكن.

لدراسة متغيرات الكامة التي تؤثر بشكل مباشر على التغير المفاجئ في التسارع خلال شوط الرفع سنقوم بتثبيت بعض المتغيرات التي لا يمكن تعديلها تصميمياً لكامة تتحكم بفتح وإغلاق صمام السحب في محرك احتراق داخلي رباعي الشوط وهذه المتغيرات هي:

- نصف قطر دائرة الأساس R .
- طول شوط الرفع أو الخفض S .
- زاوية الرفع أو الخفض α .

وسنقوم بتغيير قيم r والبعد d وكذلك بزيادة نصف قطر دائرة القطاع الكروي r_0 بهدف إيجاد مجال قيمه المثلى التي تعطي، وحسب الشكلين (15) و (18) :

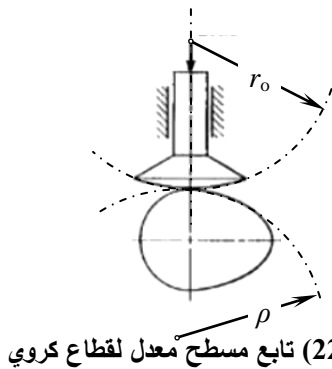
- أقل قيمة للتسارع عند بداية الجانب A_0 ، والتي تكون فيها قوة العطالة F^{in} بعكس جهة حركة التابع أي تعمل سلبياً كقوة ضغط إضافية على سطح التابع.
- أقل قيمة للتغير المفاجئ في التسارع ΔA عند الانتقال من الجانب المنحني إلى أنف الكامة، والتي ستكون سبباً للرجفة.
- أقل قيمة للتباطؤ الأعظمي A_{max} أي قوة العطالة العظمى F_{max}^{in} عند بداية أو نهاية الأنف والتي بناءً عليها يتم اختيار عامل صلابة النابض K المناسب لمنع التابع من فقدان تماسه مع سطح الكامة.



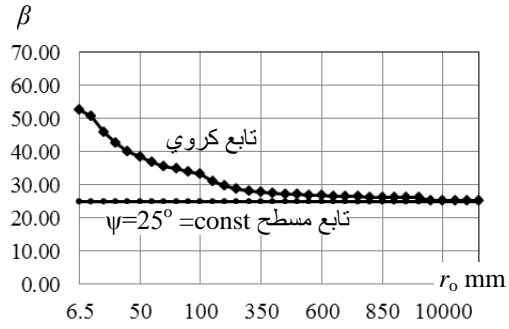
الشكل (21) تغير تسارع التابع بدلالة البعد r_0
 $R=25 \text{ mm}$, $r=8.5 \text{ mm}$, $d=26.5 \text{ mm}$,
 $\rho=80.2 \text{ mm}$, $\psi=19.5^\circ$, $\alpha=60^\circ$

عطالة أكبر على الجانب وتناقص غير كبير للتباطؤ الأعظمي A_E مما يعني قوة عطالة أقل. والنتيجة السعي لإنقاص r قدر الإمكان وزيادة d والحفاظ على بقية المتغيرات واعتماد قيمة r_0 من 100 mm فما فوق بحيث لا يصبح التابع مسطح $r_0 = \infty$ وتجنب القيم دون الـ 50 mm

تمت الحسابات لأجل أمثلة عديدة أخرى مدرجة في الجدول (2)، وجميعها تصلح للاستخدام في التحكم بفتح صمام السحب لمحرك احتراق داخلي رباعي الشوط، وتبين لجميع الحالات أن القيمة المثالية لـ r_0 ، كما هو مبين في الشكل (22)، كانت ضـ من المجال $100 \text{ mm} \leq r_0 \leq 250 \text{ mm}$ ، وتبين أن قيم r_0 بدأت ببعض الحالات من قيمة 50 mm. والتي يكون عندها التحميل الديناميكي الذي ينتج عنه الرجفة أو الاهتزاز (Jerk) أقل ما يمكن.



الشكل (22) تابع مسطح معدل لقطاع كروي



الشكل (19) تغير الزاوية β بدلالة البعد r_0

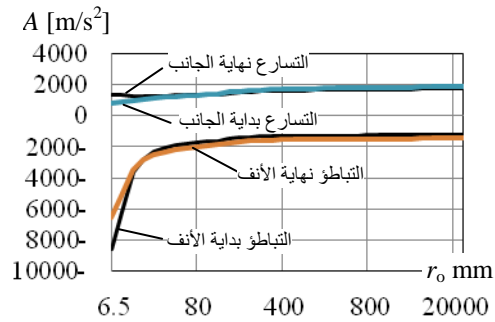
$R = 25 \text{ mm}$, $r = 2.5 \text{ mm}$, $d = 32.5 \text{ mm}$,
 $\rho = 69 \text{ mm}$, $\psi = 25^\circ$, $\alpha = 60^\circ$

يكون التغير المفاجئ في التسارع ΔA كبيراً، كما أن قيمة كبيرة لـ r_0 تتجاوز 1000 mm تعطي أيضاً قيمة كبيرة نسبياً لتغير التسارع ΔA ، أما المجال:

$$100 \text{ mm} \leq r_0 \leq 1000 \text{ mm}$$

يعطي أقل تغير ثابت تقريباً لـ ΔA . بالطبع يفضل اختيار القيمة الأقل $r_0 = 100$ من هذا المجال لأسباب تصميمية تتعلق بتصنيع نهاية التابع.

من جهة أخرى بينت الحسابات حسب الشكل (21)، أنه نتيجة زيادة r مع تناقص d أعطى نتائج سلبية أي تزايد لـ ΔA_{\max} وتزايد طفيف لـ A_0 ما يعني قوة



الشكل (20) تغير تسارع التابع بدلالة البعد r_0

$R=25 \text{ mm}$, $r=2.5 \text{ mm}$, $d=32.5 \text{ mm}$,
 $\rho=69 \text{ mm}$, $\psi=25^\circ$, $\alpha=60^\circ$

6- الاستنتاجات الأساسية من البحث:

- تم استخراج العلاقات من (1) إلى (12) تحليلياً لحالة الكامنة مكونة من أقواس دائرية مع تابع دحروجي ترددي قطري وبالتالي للتابع ذو القطاع الكروي المستخدم في محركات الاحتراق الداخلي.
- تصلح العلاقات المستخرجة من (1) إلى (12) للتابع المدبب وللتابع المسطح دون الحاجة دون الحاجة للاستخراج من جديد.
- يجب تجنب القيم الصغيرة لـ $r_0 < 50 \text{ mmm}$ لأنها تعطي فروقاً كبيرة في التغير المفاجئ للتسارع وكذلك القيم الكبيرة القريبة من ∞ (تابع مسطح) التي تعطي أيضاً قيم كبيرة نسبياً لـ ΔA .
- إن قيم نصف قطر القطاع الكروي المثلى r_0 تكون محصورة في المجال

$$100 \text{ mm} \leq r_0 \leq 250 \text{ mm}$$

- عند استخدام هذه الكامنة في تطبيقات أخرى مثل آلات الغزل والنسيج وأنظمة التحكم الهوائية والهيدروليكية وغيرها حيث تدور الكامنة بسرعات دوران منخفضة، يمكن للنتائج المستخلصة من هذا البحث أن تتغير ويسمح عندها باستخدام تابع دحروجي بأصناف أقطار صغيرة.

د. أيمن الخباز الملقب بالتاجر... تحليل إجهادات الانحناء لريش العنفة البخارية بسبب القوى الأيروديناميكية.

الجدول (1) قيم التسارع والتباطؤ والتغير المفاجئ في التسارع ΔA مع زيادة r_0 عند: $R = 25 \text{ mm}$, $r = 2.5 \text{ mm}$, $d = 32.5 \text{ mm}$, $\rho = 69 \text{ mm}$, $\psi = 25^\circ$, $\alpha = 60^\circ$							
r_0	Ψ	β	التسارع بداية الجانب	التسارع نهاية الجانب	التباطؤ بداية الأنف	التباطؤ نهاية الأنف	ΔA تغير التسارع
mm	deg	deg	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²
6.5	25	52.63	805.255	1377.8	-8591.6	-6573.64	9969.4
10	25	50.49	855.088	1345.5	-6190.7	-5132.19	7536.2
20	25	45.80	975.871	1302.8	-3616.3	-3484.82	4919.1
30	25	42.52	1072.253	1296.3	-2719.6	-2851.22	4015.9
40	25	40.12	1150.951	1304.9	-2280.9	-2515.78	3585.7
50	25	38.28	1216.422	1319.7	-2026.1	-2308.13	3345.8
60	25	36.84	1271.742	1336.9	-1861.7	-2166.93	3198.6
70	25	35.68	1319.103	1354.6	-1747.8	-2064.68	3102.4
80	25	34.72	1360.107	1372.0	-1664.7	-1987.21	3036.6
90	25	33.92	1395.952	1388.6	-1601.6	-1926.50	2990.1
100	25	33.25	1427.556	1404.3	-1552.2	-1877.63	2956.4
200	25	29.69	1614.359	1513.8	-1344.4	-1654.41	2858.2
300	25	28.28	1699.914	1572.1	-1281.6	-1578.77	2853.7
400	25	27.52	1748.985	1607.5	-1251.6	-1540.72	2859.1
500	25	27.06	1780.807	1631.2	-1234.1	-1517.81	2865.3
600	25	26.74	1803.117	1648.0	-1222.7	-1502.51	2870.7
700	25	26.50	1819.624	1660.7	-1214.6	-1491.56	2875.3
800	25	26.33	1832.332	1670.5	-1208.7	-1483.34	2879.2
900	25	26.19	1842.417	1678.4	-1204.1	-1476.95	2882.5
1000	25	26.08	1850.615	1684.8	-1200.4	-1471.83	2885.2
5000	25	25.25	1913.303	1735.0	-1174.6	-1434.87	2909.6
10000	25	25.15	1921.622	1741.8	-1171.5	-1430.24	2913.2
25000	25	25.08	1926.668	1745.9	-1169.6	-1427.46	2915.5

الجدول (2) القيم المثلى ل r_0 عند قيم مختلفة للتغير المفاجئ في التسارع لحالات مختلفة لكامة تحكم بصمام السحب لمحرك رباعي الشوط

R	r	d	ρ	S	α	Ψ	n	ΔA	$r_{0(min)}$	رقم الحالة
mm	mm	mm	mm	mm	deg	deg	r.p.m	m/s ²	mm	
25	2.5	32.5	69	10	60	25	2000	2853.2	100-250	الحالة 1
26	10	30	65	14	75	31.7	2000	2375	100-250	الحالة 2
16	3.2	25	52.43	12.2	75	29.4	600	187.6	> 90	الحالة 3
30	5	45	82.4	20	75	34.2	600	305	> 150	الحالة 4
25	12	21	79.4	8	60	15.6	500	149.3	60-250	الحالة 5
15	9.6	11.4	35.6	6	75	25	1250	408	> 90	الحالة 6

MECHANISMS AND MACHINES,
Worcester Politechnic Institute, MC Graw
Hill, Second Edition, 1999

- 9- John J. Dicker, Jr., Gordon R. Pennock., Joseph E. Shigley, THEORY OF MACHINES AND MECHANISMS, Third Edition, OXFORD UNIVERSITY PRESS 2003.
- 10- Lanni., Carbone G., Ceccarelli M., Ottaviano., Numerical and experimental analyses of radial cams with circular-arc profiles, Journal of Mechanical Engineering Science, 2006.
- 11- Harold A Rothbart., Cam Design Handbook, Mc GRAW-HILL, Indiana, 2004.
- 12- Ashok G. Ambekar., Mechanism and Machine Theory, New Delhi, 2009

Received	2020/10/4	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2020/11/26	قبول البحث للنشر

References

المراجع

- عبيدس، عمجة ا، الخباز أ، نظرية الآلات مطبوعات جامعة دمشق، 2017 - 2018
- 2- Mallikarjuna V., Jashuva N., Nagaraju G., Rama Bhupal Reddy B. Design Manufacturing and Cost Estimation of Camshaft Used In Two Wheeler, (IOSR-JMCE), India, 2014.
- 3- Chang W. T., Wu L. M., Computerized tolerance analysis of disk cam mechanisms with a roller follower, Springer-Verlag, 2009.
- 4- Flores P., A Computational Approach for Cam Size Optimization of Disc Cam-Follower Mechanisms With Translating Roller Followers, Transactions of the ASME, 2013.
- 5- Alshamma F. A., Mustafa F., An Optimum Design of Cam Mechanisms with Roller Follower for Combined Effect of Impact and High Contact Loads ResearchGate, Baghdad, 2010.
- 6- Lima G., Holbert N., Owens J., Musa S., Cam Mechanisms, PDF Presentation
- 7- Khurmi R.S. Gupta J. K., Theory Of Machine, 14th ed.; S. Chand & Co. Ltd., New Dehli 2005.
- 8- Robert L. Norton, DESIGN OF MACHINERY, AN INTRODUCTION TO THE SYNTHESIS AND ANALYSIS OF

مسرد المصطلحات:

الرموز اللاتينية:

[mm]	R - نصف قطر دائرة الأساس،
[mm]	r - نصف قطر دائرة الأنف،
[mm]	r_o - نصف قطر دائرة الدحرج،
[mm]	أو نصف قطر دائرة القطاع الكروي
[mm]	d - البعد بين مركزي دائرة الأساس والأنف،
[mm]	ρ - نصف قطر دائرة الجانب للكامة،
[mm]	S - طول شوط الرفع أو الخفض،
[mm]	x - الإزاحة الخطية للتابع
[mm/s]	V - السرعة الخطية للتابع
[m/s ²]	A - التسارع أو التباطؤ الخطي للتابع
[m/s ²]	ΔA - التغير المفاجئ في التسارع
[kg]	m - كتلة التابع
[kg]	W - وزن التابع
[N]	F^{in} - قوة عطالة التابع
[N]	F_k - قوة مرونة النابض
[N/m]	K - ثابت مرونة النابض
	n^* ، n' ، n - ثوابت لابعدية

I.C.E : Internal Combustion Engine

الرموز الإغريقية

[deg]	α - زاوية الرفع أو الخفض،
[deg]	Ψ - زاوية قوس جانب الكامة،
[deg]	β - زاوية الحركة على الجانب الدائري للكامة
[deg]	θ - زاوية دوران الكامة
[deg]	γ - زاوية الضغط