مجلة الهندسة والتكنولوجيا، المجلد26 ، العدد3، 2008

تخمين ضغط اسطوانة محرك الاحتراق الداخلي الآني باستخدام تحليل الاهتزازات لعمود المرفق

أ.م.د. موفق علي توفيق* م.م إحسان عبد الحسين باقر*

الخلاصة :

يتلخص هذا البحث بدراسة امكانية تخمين قيمة وشكل الضغط (ضغط الاحتراق) داخل اسطوانة محرك الاحتراق الداخلي بواسطة قياس سعة الاهتزاز عند اغطية الركائز الرئيسية لعمود المرفق ولقد تم بناء نموذج رياضي باستخدام طريقة المصفوفات الانتقالية لتحليل اهتزاز عمود المرفق وكذلك نمذجة كراسي التحميل الى نوابض ومخمدات وباتجاه المحاور الرئيسية للنظام وباعتماد تحليل لكرسي التحميل المعرض الى حمل ديناميكي متغير الذي تم التوصل اليه من خلال نمذجة عمود المرفق الى عتبة متعددة الركائز وباستخدام نظرية (معادلة العزوم الثلاثة) تم ايجاد علاقة بين ردود الافعال عند الركائز الرئيسية والقوى المسلطة على عمود المرفق نتيجة ضغط الاحتراق وتأثير كلتا الحركتين الدورانية والترددية ، كما وقد تم بناء برنامج حاسوبي بلغة الفورتران لكل نموذج رياضي من النماذج التي مر ذكرها اعلاه .

وقد اعتمد البحث على النتائج العملية المقاسة لمحرك ديزل نوع زيتور رباعي الاشواط ذو اربعة اسطوانات وتحت ظروف انضغاطية وباستخدام البرنامج الحاسوبي وحساب الاستجابة الديناميكية لعمود المرفق ومقارنة سعة الاهتزاز الانية المستخرجة مع المقاسة عملياً وتصحيح قيم الضغط المحسوبة لحين التواصل الى التقارب المطلوب للسعات الاهتزازية النظرية والعملية يتم تخمين ضغط الاسطوانة الاني و تم اخذ عينتين من القراءات العملية لسعة الاهتزاز المقاسة على الركيزة الرئيسية الرابعة وعند سرعتين دورانيتين. لقد اظهرت النتائج تقارباً جيداً بين قيم الضغط المقاسة عملياً وقيم الضغط المستنتجة من هذه الدراسة ، وقد تم استنتاج السرعة الدورانية باستخدام القياس العملي لسعة الاهتزاز والضغط داخل الاسطوانة ولسرعتين دورانيتين باستخدام ذات البرنامج مع اجراء تغيير بسيط واظهرت النتائج تطابق جيد بين الدراسة العملية والنظرية .

Keyword : ضغط الاسطوانة ، عمود المرفق ، تحليل الاهتزازات ، محرك ديزل

Abstract

This research summarized the possibility of prediction of the cylinder pressure (combustion pressure) of internal combustion engine by measuring the vibration amplitude at the housing of the main bearing of crankshaft.

A mathematical model was developed using the Transfer Matrix Method to analyze the crankshaft vibration. The journal bearings were modeled as springs and dampers in the direction of main system coordinates. The bearings were under dynamic load conditions. This was achieved by sampling the crankshaft to multi-supported beam using the Equation of Three Moments Theory. A relation between the reactions were found at main bearings and the applied forces on the crankshaft as a result of pressure and the effect of both reciprocating and rotating motion .

A computer program in Fortran language was developed for each cited sample.

The study depends on experimental results previously measured on (Zetor M-Type), four stroke, 4-cylinders diesel engine under motoring condition using special prepared computer program. The resulting amplitude of vibration at local position were compared with the experimental amplitude also the cylinder pressure were corrected until a convergence criterion is reached between the theoretical and the experimental amplitudes. The instantaneous cylinder pressure will be predicted, two samples of data were taken for the amplitude of vibration at two rotational speeds.

https://doi.org/10.30684/ etj.26.3.10
University of Technology-Iraq, Baghdad, Iraq/2412-0758

The results show good agreement with those obtained experimentally. Also the rotational speed was deduced by the use of practical measurement of vibration amplitude and cylinder pressure for two rotational speeds using the same program with simple change and showed good agreement between practical and theoretical results.

قائمة الرموز:

الوحدة	المعنى	الرمز	الوحدة	المعنى	الرمز
m^4	عزم القصور الذاتي للمساحة باتجاه z ، x ، y على الترتيب	J_z, J_x, J_y	m/s^2	التعجيل الخطي لمكبس المحرك	A
degree	زاوية دوران عمود المرفق	θ	m	نصف قطر ذراع عمود المرفق	R
r.p.m	السرعة الدورانية	ω, Ω	m	طول ذراع التوصيل	l
degree	الزاوية بين خط المراكز واي نقطة على محيط كرسي التحميل	ϕ	m	طول المقطع	L_i
degree	زاوية السقوط	β	kg	كتلة المكبس	M_p
$N.s/m^2$	لزوجة الزيت	η	kg	كتلة المسمار الرسغي للمكبس	M_g
m	نسبة اللاتمركز	e	kg	كتلة التراكيب الساندة لكرسي التحميل الرئيسي	m_{px} , m_{py}
m	الخلوص النصف قطري لكرسي التحميل	c	kg	جزء الكتلة لذراع التوصيل المتصل بعمود المرفق	m_r
m	نسبة اللاتمركز $\varepsilon = e/c$	ε	kg	كتلة النقطة عند المحطة (i)	m_i
m	سمك طبقة الزيت	h	N/m	معاملات الجسائة لكرسي التحميل	K_{xx} , K_{yy}
m	نصف قطر كرسي التحميل	r	N/m	معاملات الجسائة لقاعدة كرسي التحميل	K_x , K_y
N/m^2	معامل المرونة	E	N.s/m	معاملات التخميد لكرسي التحميل	D_{xx} , D_{yy}
N/m^2	معامل القص	G	N.s/m	معاملات التخميد لقاعدة كرسي التحميل	D_x , D_y
N	قوى القص الخارجية	V_{az}, V_{ax}, V_{ay}		معاملات الجسائة اللابعدية $\overline{K} = \dfrac{Kc^3}{\eta\omega r^3 L}$	K_{xx} , K_{yy}
N.m	عزوم الانحناء الخارجية	M_{az}, M_{ax}, M_{ay}		معاملات التخميد اللابعدية $\overline{D} = \dfrac{Dc^3}{\eta\omega r^3 L}$	D_{xx} , D_{yy}
	مصفوفة تمثل حاصل الضرب النهائي لمصفوفات المجال والنقط	[U]	m	الانحرافات في الاتجاهات z ، x ، y على الترتيب	Z , X , Y
	مصفوفة الوحدة	[E]	degree	زوايا الميل حول z ، x ، y على الترتيب	ϕ_z, ϕ_x, ϕ_y
	مصفوفة المجال للمقطع (i)	$[F]_i$	N	مركبات قوى القص في الاتجاهات z ، x ، y على الترتيب	V_z, V_x, V_y
	مصفوفة النقطة للمحطة (i)	$[P]_i$	N.m	مركبات عزوم الانحناء في الاتجاهات z ، x ، y على الترتيب	M_z, M_x, M_y
m	قطر المكبس	D	$Kg.m^2$	عزم القصور الذاتي الكتلي باتجاه z ، x ، y على الترتيب	I_z, I_x, I_y

المقدمة

ان حساب او تخمين ضغط الاحتراق داخل اسطوانة محرك الاحتراق الداخلي بواسطة تحليل الاهتزاز الناتج عن تأثيرات قوى الضغط و القصور الذاتي والتأثيرات الجايروسكوبية ، يتطلب اجراء تحليل للمقادير الجانبية (الانحراف ، الميل ، القص , العزم) للاهتزاز على طول عمود المرفق، بالاضافة الى دراسة المتغيرات الديناميكية لمواصفات الركائز الرئيسية بأخذ ركيزة كعينة وتعريضها الى قوى ديناميكية متغيرة ودراسة تأثير تلك القوى على المعاملات الديناميكية للركيزة، (معاملات الجسائة والتخميد) ومدى تأثير هذه المعاملات على سعة الاهتزاز لعمود المرفق . ومن البحوث السابقة [4] الذي تناول اجراء دراسة لتحليل اهتزاز عمود المرفق باستخدام طريقة هولزر للاهتزاز القسري (Holzer – forced vibration method) وذلك ببناء نموذج رياضي يعتمد على تقسيم عمود المرفق الى سلسلة من الكتل المكافئة والنوابض مع الاخذ بنظر الاعتبار تأثيرات التخميد الناتجة عن الاحتكاك الحاصل بين المكبس وجدار الاسطوانة ، كذلك التخميد الداخلي للعمود واخيراً التخميد الناتج عن طبقة الزيت في الركائز الرئيسية ، كما وقد تم نمذجة نظام التفرع الى زوج من المسننات مع الاخذ بنظر الاعتبار نسبة التحويل للسرع والعزم وقد توصلت هذه الدراسة الى ان هذه الطريقة ملائمة للانظمة ذات التفرعات من خلال مقارنة النتائج مع نتائج البحوث السابقة .

اما فيما يخص حساب القوى الديناميكية المؤثرة على عمود المرفق وطريقة حساب ردود الافعال لهذه القوى على الركائز الرئيسية لعمود المرفق تناول البحث [5] دراسة مقارنة بين طريقتين هي الطريقة المحددة ستاتيكياً وتفترض هذه الطريقة ان عمود المرفق يمكن تمثيله بعتبة بسيطة الارتكاز عند كل ركيزة رئيسية لعمود المرفق الا ان هذا الافتراض يؤدي الى الغاء التأثير للقوى الديناميكية لباقي اسطوانات المحرك لذلك فان هذه الطريقة اثبتت عدم جدواها لاهمالها تأثير نسق الاشتعال (Firing Order) للمحرك ، اما الطريقة الثانية فهي الطريقة غير المحددة ستاتيكياً وتعتمد على تحليل عمود المرفق كنظام متكامل دون تجزئة عن طريق نمذجته بالعناصر المحددة مع الاخذ بنظر الاعتبار القوى المؤثرة الناتجة عن ضغط الاسطوانات بأجمعها للمحرك وكذلك التأثيرات الفيزيائية للركائز ومواصفات الزيت المستخدم فيها عن طريق حل معادلة رينولد للركيزة وعلى هذا تعتبر هذه الطريقة اكثر محاكاة للواقع العملي .

اما في البحث الحالي فقد استخدمت طريقة المصفوفات الانتقالية لتحليل اهتزاز عمود المرفق بنمذجته الى كتل مجمعة (Lumped Masses) مرتبطة بعتبات مرنة مهملة الوزن مع الاخذ بنظر الاعتبار القوى الديناميكية المؤثرة على عمود المرفق و القصور الذاتي والتاثيرات الجايروسكوبية على عمود المرفق ، ولايجاد ردود الافعال عند الركائز الرئيسية استخدمت نظرية (معادلة العزوم الثلاثة) وبالتالي ايجاد علاقة بين القوى الناتجة عن ضغط الاسطوانة والاستجابة الديناميكية لعمود المرفق وعند سرع مختلفة ولمواقع دورانية مختلفة .

التحليل النظري

ان الدراسات الديناميكية لانظمة (الاعمدة الدوارة – كرسي تحميل) ذات المرونة تأخذ بنظر الاعتبار الاهتزازات الدورانية والمستعرضة وتأثير اهتزازات الانحناء المسبب لتدويم العمود الدوار .
في البحث الحالي تم دراسة امكانية ايجاد ضغط الاسطوانة لمحرك الاحتراق الداخلي من خلال اجراء التحليل الديناميكي لعمود المرفق لمحرك ديزل رباعي الاشواط ذو اربعة اسطوانات يعمل بنسق اشتعال (1342) ولاستكمال التحليل الديناميكي لعمود المرفق فقد تم عرض التحليل بحسب الخطوات التالية :-

- **حساب القوى المؤثرة على عمود المرفق وردود الافعال للركائز الرئيسية**

أ- حساب القوى على النهاية الكبرى لذراع التوصيل

ان الشكل (1) يمثل مخطط مبسط لميكانيكية عمود مرفق وذراع توصيل ومكبس لماكنة

الترددية ، التعجيل (A) للمكبس يمكن حسابه من خلال المعادلة [2] :

$$A = R\omega^2\left\{\cos\theta + \left[\left(q^2-1\right)\cos 2\theta + \cos^4\theta\right]/\left(q^2-\sin^2\theta\right)^{3/2}\right\} \quad ---(1)$$

$$q = 1/R$$

اما قوى القصور للكتل الترددية (f_I) (مكبس ، المسمار الرسغي ، النهاية الصغرى لذراع التوصيل) تحسب من المعادلة :-

$$f_I = \left(M_1 + M_P + M_g\right) * A \quad ---(2)$$

M_1 : الكتلة المكافئة للنهاية الصغرى لذراع التوصيل وغالباً ما تؤخذ الثلث من كتلة ذراع التوصيل.

اما ضغط الغاز في الاسطوانة P_G فيولد قوة F_G مطبقة على المكبس والتي تحسب بالمعادلة :-

$$F_G = \left(\pi D^2/4\right) * P_G \quad ---(3)$$

وبالامكان ايجاد القوة (F_1) بالمعادلة التالية:-

$$F_1 = \left(F_G - f_I\right) * \sec\phi \quad ---(4)$$

والقوة (F_2) التي تمثل قوة الطرد المركزي لكتلة النهاية الكبرى لذراع التوصيل (M_2) (التي غالباً ما تؤخذ ثلثين من كتلة ذراع التوصيل) وتحسب بالمعادلة التالية :-

$$F_2 = M_2 R\omega^2 \quad ---(5)$$

وكمحصلة للقوى المبينة اعلاه المؤثرة على نهاية ذراع المرفق (F_1&F_2) وباتجاهي (X&Y) نحصل عليها من :-

$$\left.\begin{aligned} F_X &= F_2\sin\theta + F_1\sin\phi \\ F_Y &= F_1\cos\phi - F_2\cos\theta \end{aligned}\right\} \quad ---(6)$$

ب- حساب ردود الافعال عند الركائز الرئيسية

ان حساب ردود الافعال يتطلب نمذجة عمود المرفق كعتبة مرنة ذات ارتكاز متعدد مفترضاً ثبوت المسافة ما بين ركيزة واخرى وكذلك ثبوت المواصفات والشكل الهندسي لكل مقطع من مقاطع العتبة بين كل ركيزتين متجاورتين ، مع هذا النموذج تم اعتماد نظرية معادلة العزوم الثلاثة [3] كطريقة مستخدمة لايجاد ردود الافعال للعتبات الغير محددة ستاتيكياً ، الشكل (2) يبين مخططاً مبسطاً لعتبة معرضة الى القوى التي تم حسابها في الفقرة السابقة ، ومن رسم مخطط عزم الانحناء للعتبة ومخطط المنحني المرن [3] تنتج ثلاثة معادلات للعزوم بدلالة القوى المسلطة على العتبة (F_{Yi}) وبحلها آنياً ومن ثم اجراء موازنة لكل مقطع من العتبة يتم احتساب ردود الافعال عند كراسي التحميل الرئيسية لعمود المرفق. لقد تم بناء برنامج حاسوبي لحساب ردود الافعال عند كراسي التحميل الرئيسية لعمود المرفق من نوع (Line Type) ولأي عدد من الاسطوانات للمحرك وباتجاه X و Y .

- **حساب معاملات الجسائة والتخميد للركائز**

ان ركائز عمود المرفق تتعرض الى حمل ديناميكي متغير في القيمة والاتجاه عند أي فترة زمنية حيث ان الضغط المتولد في كرسي التحميل ناتج عن تأثير انحصار المائع في مجال متقارب و تأثير الانضغاط القطري و تأثير التدويم لهذا فأن الحمل الخارجي على كرسي التحميل لعمود المرفق تتم موازنته مع القوى الهايدروديناميكية الداخلية المتولدة في طبقة الزيت داخل الركيزة حيث يتم التعبير عنها بمعاملي جسائة باتجاهي (X&Y) (K_{xx} & K_{YY}) ومعاملي تخميد (D_{XX} & D_{YY}) .

تبدأ عملية التحليل [7] بحل معادلة رينولد حلاً عددياً للحصول على معادلة توزيع الضغط للزيت داخل كرسي التحميل

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[h^3\cdot\frac{\partial P}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[h^3\cdot\frac{\partial P}{\partial z}\right] = 6\eta\left(\frac{U_B+U_J}{2}\right)\frac{\partial h}{\partial x} + 12\eta\frac{\partial h}{\partial t}$$

ومن ثم ايجـاد قيمـة مركبتـي القـوتين الهايدروديناميكيتين باتجاهين الاولى قطريـة (W_R) وهـي مجمـوع مركبـات الحمـل الموازية لخط المراكز والثانية (W_T) وهـي مجموع مركبات الحمل العمودية على خـط المراكز من خلال العلاقة التالية :-

$$\overline{W}_R = 2\pi \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^1 -\overline{P}\cos\phi \, dx dz \qquad ---(7)$$

$$\overline{W}_T = 2\pi \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^1 \overline{P}\sin\phi \, dx dz \qquad ---(8)$$

وبالتالي فأن الاتـزان مـابين القـوى الديناميكية المسلطة والقوى الهيدروديناميكية المعاكسة لها يقود الى ان :

$$\left.\begin{aligned} \overline{F}_R &= -\overline{W}_R \\ \overline{F}_T &= \overline{W}_T \end{aligned}\right\} \qquad ---(9)$$

وبكتابة معادلتي القوى القطرية والمماسـية وبالاتجاهين X و Y ينتج ما يلي :-

$$\left.\begin{aligned} \overline{F}_X &= \overline{F}_R \sin\beta + \overline{F}_T \cos\beta \\ \overline{F}_Y &= \overline{F}_R \cos\beta - \overline{F}_T \sin\beta \end{aligned}\right\} \qquad ---(10)$$

وبالعودة الى الشكل (3) فأنه يمكـن كتابـة مايلي :-

$$\left.\begin{aligned} x &= c\varepsilon\sin\beta \\ y &= c\varepsilon\cos\beta \end{aligned}\right\} \qquad ---(11)$$

وبتفاضل المعـادلات (10) و (11) يمكـن التوصل الى قيم معاملات الجسائة والتخميـد بعد حساب قيم السرع الانضغاطية والقطرية والتدويميـة باسـتخدام طريقـة (Euler – Cauchy Time Marching Scheme) [7] وللاطلاع على الصيغة النهائية لمعادلات حساب معاملات الجسائة والتخميد الرجـوع الى الملحق (B) وقد تم تطوير برنامج بلغة الفـورتران يقـوم بحسـاب المعـاملات الهيدروديناميكية لكرسي التحميل بالاضـافة الى السرع الانضغاطية والقطرية والتدويمية وقيم اللاتمركز عند زوايا تـدوير مختلفـة ولقوى ديناميكية وركائز مختلفة .

- **ايجاد الاسـتجابة الديناميكيـة لعمـود المرفق**

تم بناء انموذج لعمود المرفق بابعـاده الثلاثـة وباسـتخدام طريقـة المصـفوفات الانتقالية [1] (كما المبين في الشـكل (4)) المعتمدة في هذا التحليل والتي تقـوم علـى اساس تقسيم النظام الى كتل منتظمة والتـي تمتلك خواص عزم القصور الذاتي للمقـاطع المكافئة لها في عمـود المرفـق ، متصـلة بعتبات مهملة الوزن وذات مسـاحة مقطـع متساوية للعتبة الواحدة وسلوك تلك العتبـات تبنى وفق صيغة انحناء اويلر وقوى قـص تيموشنكو (Timoshenko) حيث تعبر عن مقاطع النظام من خلال مصـفوفة المجـال (Field Matrix) [F] التـي لهـا علاقـة بمتجهـات الحالـة (State Vector) عنـد نهايات أي مقطع من النظام ، كـل محطـة بالمنظومة تمتلك مصـفوفة نقطـة (Point Matrix) [P] والتي لها علاقـة بمتجهـات الحالة عند يمين ويسار أي محطـة وكمـا موضح في الشكل (5) .

مصفوفة النقطة (مصفوفة عنصر الكتلـة) (Point Matrix)

بصورة عامة توجد خمسة حالات مـن مصفوفة النقطة المأخوذة بنظر الاعتبار في البحث الحالي ، ان هذه الحالات تغطي جميع الامكانيات المترتبة عند أي محطـة علـى طول عمود المرفق [6] وهذه الحالات :-

- كتلة مجمعة (Lumped Masses)
- مواقع كراسي التحميل الرئيسية (Main Bearing)
- مواقع كراسي التحميل للنهايـة الكبـرى لذراع التوصيل (Big-end Bearing)
- الدولاب الطيار والبكرة (Flywheel & Pulley)
- مواقع التفرع لكتل الاتـزان (Counter Weight)

وفيما يلي استعراض مختصر لكل حالة من الحالات المذكورة اعلاه :-

- الحالة الاولى (عنصر كتلة مجمعة) عند المحطة (i)

يمثل الشكل (5) مخطط لكتلة نقطية مبيناً عليها العزوم والقوى المؤثرة على يمينها ويسارها عند المحطة (i) ومن الشكل نجد ان معادلات الاتزان للكتلة (m_i) في المستويين (xz) و (yz) على فرض ان الحدود تكون موجبة يمين المحطة (i) وسالبة يسار المحطة (i) تنتج مصفوفة النقطة المبينة في الشكل (6).

- الحالة الثانية (موقع كرسي تحميل رئيسي) عند المحطة (i)

في هذه الحالة نفترض خلال التحليل تركيب ساند لكرسي تحميل ذو انثنائية وتضمنت الحالة تأثير كل من العزم الجايروسكوبي ، حمل النقطة ، الحمل الخارجي (الحمل الديناميكي) وتاثير قوى عدم الموازنة ، وكما موضح في الشكل (7) معاملات المرونة والتخميد لكل من كرسي التحميل والتركيب الساند باتجاه المحاور (X&Y) ومن هذا الشكل وبتبني معادلات الاتزان للكتلة (m_i) في الاتجاهين (X&Y) يمكن التوصل الى مصفوفة النقطة المبينة في الشكل (8) .

في حالة كون كرسي التحميل رئيسي تكون قيم (F_X & F_Y) تساوي صفراً وقيم (a_1 & a_2) كما يلي :

$$a_1 = \frac{\left[\left(m_{Px}\Omega^2 - K_X\right) - j\Omega D_X\right]\left[K_{XX} + j\Omega D_{XX}\right]}{\left(m_{Px}\Omega^2 - K_{XX} - K_X\right) - j\Omega\left(D_{XX} + D_X\right)}$$

$$a_2 = \frac{\left[\left(m_{Py}\Omega^2 - K_Y\right) - j\Omega D_Y\right]\left[K_{YY} + j\Omega D_{YY}\right]}{\left(m_{Py}\Omega^2 - K_{YY} - K_Y\right) - j\Omega\left(D_{YY} + D_Y\right)}$$

- الحالة الثالثة (موقع كرسي تحميل للنهاية الكبرى لذراع التوصيل) عند المحطة (i)

في هذه الحالة تم الاخذ بنظر الاعتبار العوامل الديناميكية لطبقة الزيت وحمل النقطة والحمل الخارجي وكذلك تأثير قوى عدم الاتزان كما مبين في الشكل (9) وباجراء الموازنة للكتلة (m_i) في الاتجاهين (X & Y) تنتج مصفوفة النقطة ذاتها في الحالة السابقة سوى ان قيمة (F_X & F_Y) تساوي الحمل الديناميكي وقيم (a_1 & a_2) كما يلي :

$$a_1 = \frac{\left[K_{XX} + j\Omega D_{XX}\right]}{\left(m_r\Omega^2 - K_{XX}\right) - j\Omega D_{XX}}$$

$$a_2 = \frac{\left[K_{YY} + j\Omega D_{YY}\right]}{\left(m_r\Omega^2 - K_{YY}\right) - j\Omega D_{YY}}$$

- الحالة الرابعة (الدولاب الطيار والبكرة) عند المحطة (i)

لا تختلف كثيراً هذه الحالة في التحليل عن الحالة الاولى من حيث اعتماد الازاحة والميل وقوى القص والعزم على يمين ويسار الدولاب الطيار او البكرة اضافة الى ان التأثير الجايروسكوبي يجعل من عزم الانحناء ليسار ويمين المحطة (i) يكون غير مستمراً وكما موضح في مصفوفة النقطة الموضحة في الشكل (6) .

- الحالة الخامسة (موقع التفرع لكتل الاتزان) عند المحطة (i)

في هذه الحالة يتم اختزال عناصر مصفوفة الفرع الى مصفوفة فردية تأخذ بنظر الاعتبار تأثير العزم الجايروسكوبي بالاضافة الى تأثير العزوم وقوى القص الداخلية على مصفوفة النقطة في النظام الرئيسي .

يتم الحصول على مصفوفة النقطة لنظام الفرع فقط باجراء عملية الضرب المستمر لمصفوفات النقطة والمجال لنظام الفرع وتمثل المصفوفة الناتجة من عملية الضرب العلاقة بين النهاية الحرة للفرع والنهاية المثبتة بالنظام الرئيسي وكما موضح في الشكل (10) .

$$\begin{bmatrix} Q \\ \cdots \\ R \\ \cdots \\ 1 \end{bmatrix}^K = \begin{bmatrix} U_{VV} & U_{VP} & U_V \\ U_{PV} & U_{PP} & U_P \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^O \begin{bmatrix} Q \\ \cdots \\ R \\ \cdots \\ 1 \end{bmatrix}^O$$

$$Q = \{Z, X, Y, \phi_Z, \phi_X, \phi_Y\}$$

$$R = \{V_Z, V_X, V_Y, M_Z, M_X, M_Y\}$$

وبعد تعويض الشرط الحدي (R=0) (أي قيم قوى القص و العزوم تساوي صفراً

عند النهايتين الحرة للذراع) في المصـفوفة المبينة أعلاه وبإجراء التحويل من محـاور نظام الفرع الى محـاور النظـام الرئيسـي نحصل على المصفوفة المبينة فـي الشـكل (11) .

مصفوفة المجال (Field Matrix)

ان الصـياغة الرياضـية لبنـاء هـذه المصفوفة تتم بأخذ عنصر من النظـام فـي الفراغ ومعاملته على انه عتبة مهملة الوزن ذات جسائة انثنائية (Flexural Rigidity) مساوية لجسائة المقطع الحقيقية وذات مساحة مقطع ثابتة ويحلل في المسـتويات (xz) و (yz) والموضـــحة فـــي الاشـــكال (13)،(14)،(15) وبعـد اجـراء التـوازن للمقادير الجانبية وعند ادخال تـأثير القـص واعتماد معادلات نظرية العتبات للانحـراف والميل لعتبة مثبتة من جهة وحرة من الجهة الاخرى [8] نحصل على مصفوفة المجـال المبينة في الشكل (12) .

* من الملاحظ ان مصـفوفات النقطـة للحالات الخمس المذكورة سابقاً ومصـفوفة المجال ان عناصرها مركبة (تحتوي اجزاء حقيقية واجزاء خيالية) لـذلك اصـبح مـن الضروري لملائمـة الحسـابات باسـتخدام برنامج حاسوبي يعمل على اجـراء فصـل المصفوفة (النقطة و المجـال) الـى جـزء حقيقـي (Real) وخيــالي (Imaginary) ولايجاد متجه الحالة عند المحطة (n) بدلالة متجه الحالة عند الحد $\{Z\}_1^L$ بالصيغة التالية -:

$$\{Z\}_n^R = [P]_n [F]_{n-1} [P]_{n-1} [F]_{n-2} [P]_{n-2} \ldots [F]_2 [P]_2 [F]_1 [P]_1 \{Z\}_1^L$$

وقد تم بناء برنامج حاسوبي يغطـي هـذا التحليل الرياضي لنموذج عمـود المرفـق لايجاد قيم المقـادير الجانبيـة (الانحـراف والميل وقوى القص والعـزم) بالاتجاهـات الثلاث X , Y , Z وعنـد كـل المحطـات للنظام الرئيسي وللانظمة الفرعية المتصـلة به .

ايجاد ضغط الاحتراق

بعد اجراء التحليل الرياضـي الكامـل لعمود المرفق الـذي يمكننـا مـن ايجـاد الاستجابة الديناميكية للعمود وعند كـل نقطـة على طول العمود تتضح العلاقة بين الضغط (ضـغط الاحتـراق) واسـتجابة العمـود الديناميكية من حيث كون الضغط مصدر من مصادر الاثارة الرئيسـية للنظـام اخـذين بالحسبان التأثيرات الهيدروديناميكية لطبقـة الزيت في كراسي التحميـل وقـوى عـدم الاتزان والقوى الخارجية المسلطة على ايـة نقطة من نقاط النظام (عمود المرفق).

ولاسباب عملية فان قياس سعة الاهتزاز تتم على نقاط كراسي التحميل وذلـك بوضـع متحسس التعجيل (Accelerometer) على غطاء كرسي التحميل الرئيسي وكذلك لايجاد قيمة الضغط الفعلية داخل الاسـطوانة فقـد اسـتخدم متحسـس الضـغط (Pressure Transducer) [6] وقد تم استحصال النتائج العملية للضـغط ولسـعة الاهتـزاز عنـد سرعتين دورانيتـين (900 & 700 r.p.m r.p.m) وكما مبين في الشكل (16) و (17) [6] وباستخدام البرنامج الحاسوبي يتم اختيار قيمة اولية للضغط وبافتراض شكل توزيـع الضغط (Pressure Profile) ومن ثم ايجاد سعة الاهتزاز عند كرسي التحميـل الرابـع ومقارنتها مع القيمة العملية المبين قياسـها اعلاه ومن ثم اجراء التصحيح علـى قيمـة الضغط الاولية حتى نحصل على نسبة خطأ بين سعة الاهتزاز العملية والنظرية لا تزيد عن (2%) ونسبة الخطأ بين قيمة الضـغط العملية والقيمة المسـتنتجة مـن الاهتـزاز العملي ان لاتزيد عن (5%) ، وقد اخـذت زوايا دورانيـة معينـة لاجـراء العمليـة المذكورة اعلاه علما بان الضـغط المقـاس عملياً لم يتم قياسه تحت ظروف الاشتعال اذ ان المحرك كان يزود بالقدرة عـن طريـق محرك ثاني تـم ربطهمـا باحزمـة ناقلـة وبالرغم من ذلك فان البرنامج المعد يمتلـك القابلية للتعامل مع ظروف تشغيلية مختلفـة للمحرك ولأي عدد من الاسطوانات .

النتائج والمناقشة

لغرض اجراء اختبار للتحليل النظري والبرنامج الحاسوبي المعد لاستنتاج ضـغط الاحتراق داخل اسطوانة المحرك تم اختيار مخطط توزيع ضغط لمحرك ديزل من نوع

مـــع ذات النمــوذج (Recardo-E6) [6] لعمود المرفق التابع لمحرك الديزل من نوع (Zetor M-Type) ، في البداية تم استخدام الضغط كمدخل (بيانات داخلة) الى البرنامج الحاسوبي وتم استخراج قيمة سعة الاهتزاز عند السرعة الدورانية (700 r.p.m) ولمدى معين من زوايا التدوير ومن ثم تم اسـتخدام سعة الاهتزاز كبيانات داخلة الى البرنـامج لايجاد الضغط في الاسطوانة الاولـى وقـد كانت النتائج بالنسبة الى سعة الاهتزاز نسبة الخطأ لاتزيد على (1.932%) وبالنسبة الى ضغط الاحتراق كانت نسبة الخطأ لا تزيـد على (3.3%) وكما مبين في الشـكل (18) وتعود هذه النسبة من الخطأ الـى اخطـاء التكـرار والتـدوير فـي تنفيـذ البرنـامج الحاسوبي . وبعد هذا الاختبار للبرنامج تـم اختبار البرنامج عند النتائج العملية التي تـم قياسها على محرك ديزل رباعي الاشـواط ذو اربعة اسطوانات تحت ظـروف اطفـاء الاسطوانات وتزويد قدرة خارجية للمحرك ، كانت النتائج العملية كما مبين فـي الشـكل (16) و (17) للضغط في الاسطوانة الثالثة وسعة الاهتزاز عند كرسي التحميل الرئيسي الرابع وعند سـرعتين دورانيتـين (700 r.p.m & 900 r.p.m) فقد اخذت زوايـا دورانية معينة وتـم تعـويض قـيم سـعة الاهتزاز العملي في البرنـامج لاستحصـال قيمة الضغط عند الاسطوانة الاولـى وكمـا مبين في الشكل (19) وكان معـدل نسـبة الخطـأ لسـعة الاهتـزاز لا يزيـد عـن (1.444%) ومعدل نسبة الخطأ للضـغط لا يزيد عن (9.14%) هذه النتائج عند سرعة دورانية مقدارها (700 r.p.m) امـا عنـد سـرعة دورانيـة مقـدارها (900 r.p.m) فمعدل نسبة الخطأ لسعة الاهتزاز لا يزيـد عن (1.43%) ومعدل نسبة الخطأ للضـغط لا يزيد عن (13.4%).

ولاختبار امكانية استخدام ذات التحليـل والبرنامج لايجاد السرعة الدورانية من قـيم سعة الاهتزاز والضغط المقاسة عملياً كانت نسبة الخطأ لا تزيد عـن (4.64%) عنـد السـرعة (700 r.p.m) ولا تزيـد عـن (2.713%) عند السرعة (900 r.p.m) .

ومن الملاحظ ان معدل نسبة الخطأ لسعة الاهتزاز يقع ضمن المدى الذي حـدد فـي بداية البحـث الا ان معـدل نسـبة الخطـأ للضغط هو اكبر من المدى المحدد ويعـود ذلك الى التقريب الحاصل في نمذجة عمـود المرفق بالاضافة الى تحديد نسـبة الخطـأ المسموح بها لسعة الاهتزاز مسـبقاً كقيمـة منخفضة نوعاً ما جعل الخطأ اكبر في قـيم الضغط .

ان النتائج النظرية لتحليل كرسي التحميل واستخراج المعاملات الديناميكيـة لكرسـي التحميل تحت تأثير قوى ديناميكية متغيـرة في القيمة و الاتجاه المبينـة فـي الشـكل (20)،(21) اظهرت صعوبة بالاسـتخراج باستخدام البرنامج لذلك تم استخدام الية بديلة وهي افتراض قيمة اولية لمعامل الجسـائة (الحمل الاني الخارجي مقسوم علـى سـعة الاهتزاز الانية) والتخميد (الحمـل الانـي الخارجي مقسوم على السرعة الاهتزازيـة الانية) ومن ثم اجراء التصحيح عليها فـي البرنامج المعد لاستخراج الضغط باسـتخدام تحليل الاهتزاز لعمود المرفق .

الاستنتاجات والتوصيات

- الاستنتاجات

1. ان النتائج النظريـة لاختبـار البرنـامج والتحليل الرياضي عند افتـراض شـكل توزيع الضغط للمحرك واجراء عمليـة التحليل العكسي كما مبينة فـي الفقـرة السابقة ، اظهرت نسـبة خطـأ بسـيطة بالنسبة الى سعة الاهتزاز لعمود المرفق وضغط الاحتراق مما يدل على ان الالية المستخدمة في البرنامج هي الية ناجحـة للتوصل الى ضغط الاحتـراق الـداخلي للمحرك وبكفائة عالية واقل نسبة خطأ .
2. من الملاحظ عند اجراء الاختبار العملي للبرنامج (اسـتخدام البيانـات العمليـة كمدخلات للبرنامج) ان معدل نسبة الخطأ مابين الضغط المقاس (العملي) والضغط المستنتج عن طريق الاهتـزاز المقـاس (العملي) ، قد ارتفعت عـن المسـتوى المحدد (5%) ويعود ذلك الى ان التحليل النظري قد اعتمد على النمذجة والتقريب لمقاطع واجزاء عمود المرفق من اجـل تبسيط حساب المقادير الهندسـية لتلـك المقاطع مما ادى الى وجود فارق ما بين استجابة النظـام الديناميكيـة النظريـة والاستجابة الديناميكية المقاسـة عمليـاً بالاضافة الى وجود مـؤثرات خارجيـة

تؤثر على قيمة الاهتزاز العملي لعمـود المرفق منه الاهتزاز الكلي لكتلة المحرك وغيرها من المؤثرات التي لم تدخل فـي التحليل النظري لعمود المرفق وبـالرغم من ذلك فـان نسـبة الخطـأ للضـغط المستخرج تعد جيدة بالامكـان تفاديهـا باستخدام اليات رياضية لتحليل البيانـات والتوصل الى افضل تقارب ممكن .

3. اظهرت النتـائج ان احتسـاب سـرعة المحرك من خلال قياس الاهتزاز هـي طريقة فعالة وجيدة .

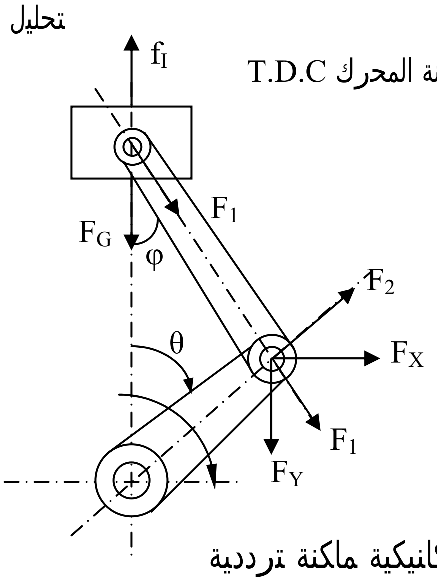
- التوصيات

1. استخدام قياسات عملية لسعة الاهتـزاز بالاتجاهين (X&Y) لتلافـي الصـعوبة الحاصلة في ايجاد المعاملات الديناميكية لكراسي التحميل .
2. قياس زاوية الطـور (Phase Angle) بالاضافة الى سعة الاهتزاز لتسهيل عمل البرنامج الحاسوبي في التوصل الى قيمة الضغط دون علم مسبق بقيمـة الضـغط العملي .
3. دراسة امكانية استنتاج الضـغط داخـل اسطوانات المحـرك بواسـطة تحليـل الاهتزاز المقـاس عمليـاً علـى بـدن المحرك.

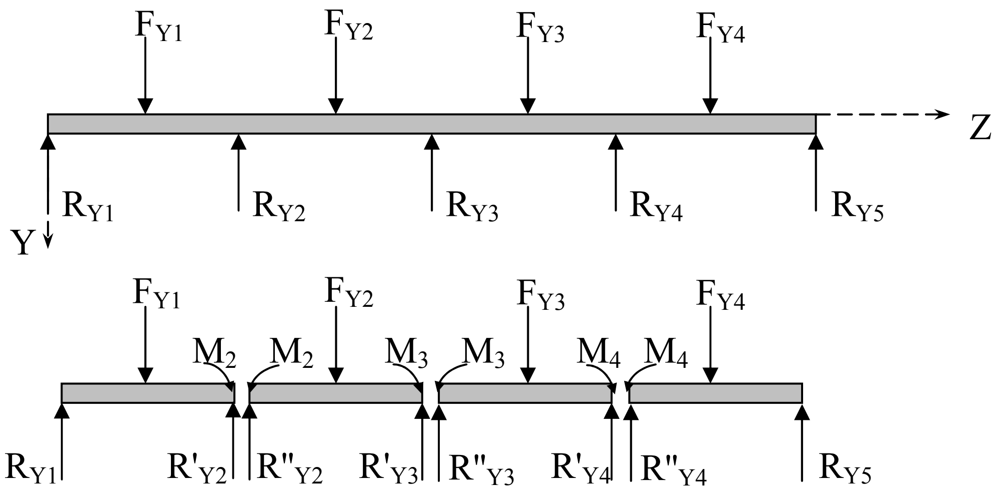
المصادر

1. (Matrix Method In Elasto Mechanics) , E.L.Pestel & F.A.Leckie , Mc Grow Hill , New York , 1963 .
2. (Motor Vehicle Engines), M.Khovakh , third edition , Mir Publishers , 1979 , pp(367-368) .
3. (Elements of Mechanics of Materials) , Garner A.Olsen , Prentice-Hall , 1982 , pp(367-368) .
4. Simon K.Chen & Thomas Chang (Crankshaft tortional and Damping simulation – an update and correlation with the test result), SAE , vol.95 , sec.4 , 1987 , pp(964-985) .
5. Elena Galindo *etal* (Advanced Design for Crankshaft and Sliding Bearings in Reciprocating Engines) , (Web Site) , 1992 .
6. M.A.Tawfik (The effect of misalignment on the dynamic performance of crankshaft-bearing system in diesel engine) , Ph.D Thesis , University of Technology , 1996 .
7. باسم عاجل سـدخان (تـأثير معـاملات المرونة والتخميد لكراسي التحميل علـى الاستجابة الديناميكية لعمود دوار لتـوربين بخاري معـين) ، رسـالة ماجسـتير ، الجامعة التكنولوجية ، 2002 ، الصفحة (26-38) .
8. (Strength of Materials) , Stephen Timoshenko , part 1 , third edition , CBS publishers & distributors , 2004 .

الملحق (A)



الشكل (1) مخطط اساسي لميكانيكية ماكنة ترددية

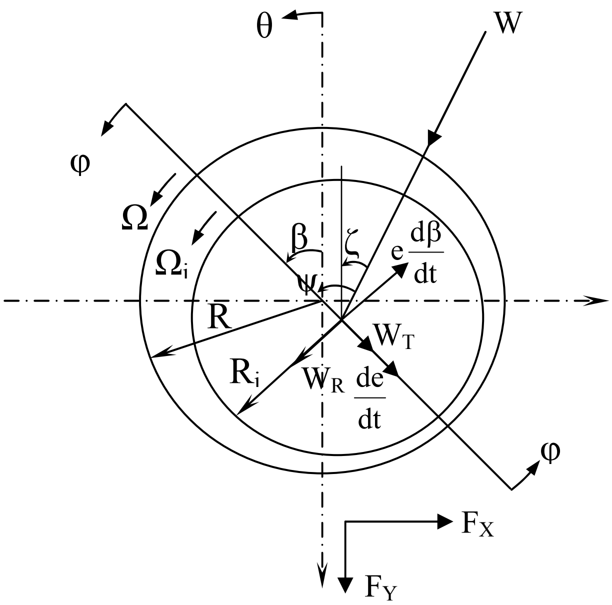


الشكل (2) يمثل المراحل التحليلية لعتبة معرضة الى قوى مستعرضة

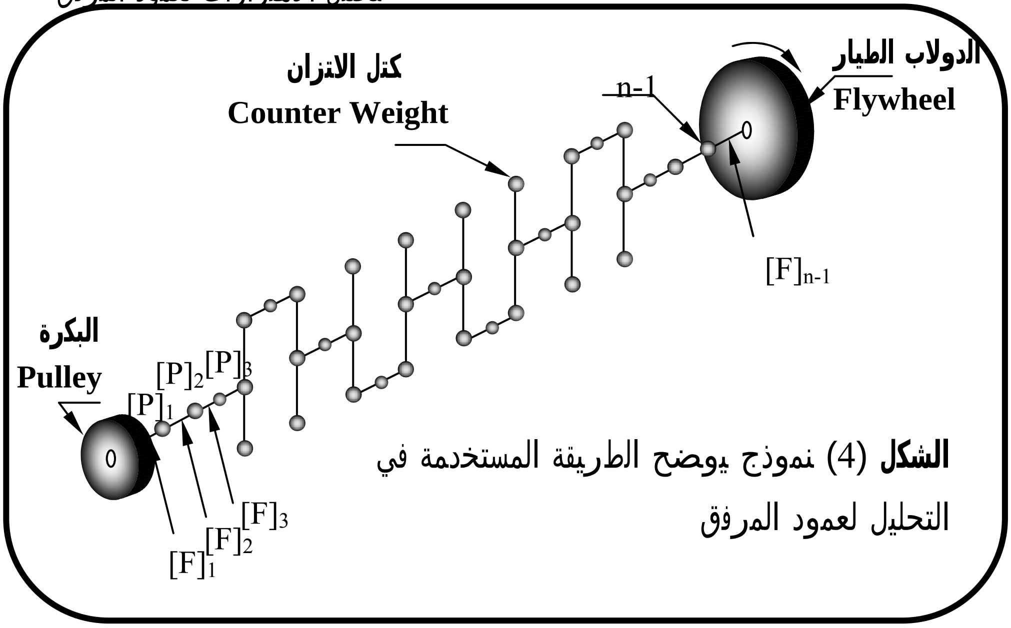
$F_{Y1,2,...}$ = محصلات القوى المؤثرة على عمود المرفق باتجاه المحورY .

$R_{Y1,2,..}$= ردود الافعال للقوى المؤثرة على عمود المرفق عند الركائز الرئيسية لعمود المرفق باتجاه المحور Y .

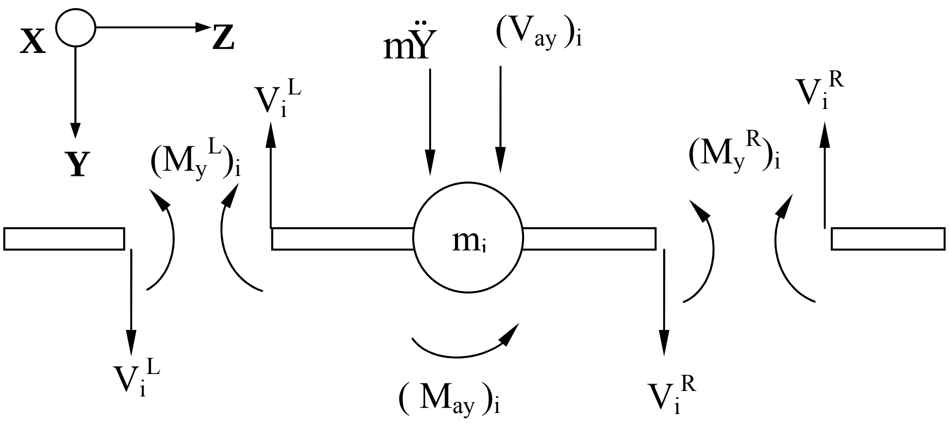
$M_{1,2,..}$= عـزوم الانحـنـاء الداخلية .



الشكل (3) مقطع عرضي لركيزة هايدروديناميكية



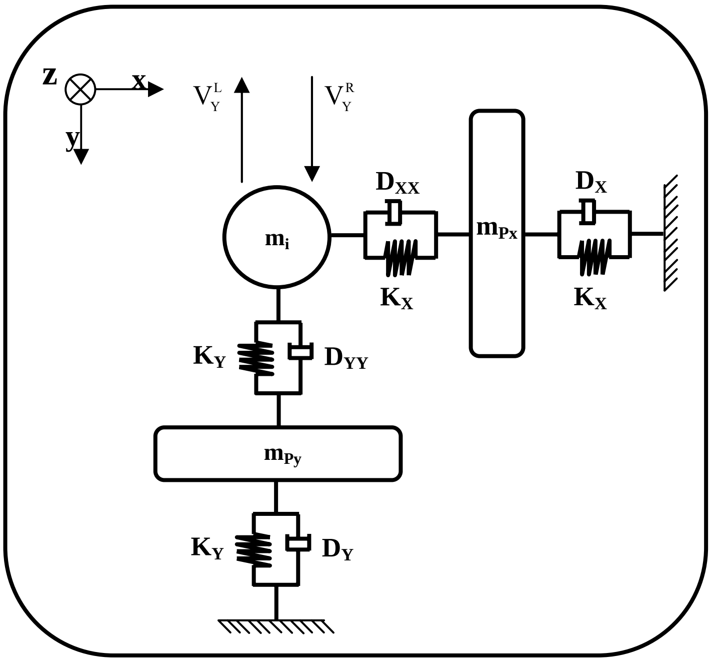
الشكل (4) نموذج يوضح الطريقة المستخدمة في التحليل لعمود المرفق



الشكل (5) مخطط الجسم الحر لكتلة (m_i) في اتجاه المحور Y

$$\begin{bmatrix} \bar{Z} \\ \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{\phi}_z \\ \bar{\phi}_x \\ \bar{\phi}_y \\ \bar{V}_z \\ \bar{V}_x \\ \bar{V}_y \\ \bar{M}_z \\ \bar{M}_x \\ \bar{M}_y \\ 1 \end{bmatrix}_i^R = \left[\begin{array}{ccc|ccc|c|c|c} & & & & & & & & 0 \\ & [E] & & & [0] & & [0] & [0] & 0 \\ & & & & & & & & 0 \\ \hline & & & & & & & & 0 \\ & [0] & & & [E] & & [0] & [0] & 0 \\ & & & & & & & & 0 \\ \hline -m\Omega^2 & 0 & 0 & & & & & & -V_{az} \\ 0 & -m\Omega^2 & 0 & & [0] & & [E] & [0] & -V_{ax} \\ 0 & 0 & -m\Omega^2 & & & & & & -V_{ay} \\ \hline & & & -\Omega^2 I_z & 0 & 0 & & & -M_{az} \\ & [0] & & 0 & -\Omega^2 I_x & j\Omega^2\Delta I & [0] & [E] & -M_{ax} \\ & & & 0 & -j\Omega^2\Delta I & -\Omega^2 I_y & & & -M_{ay} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\;0\;0 & 0\;0\;0 & 1 \end{array}\right] \begin{bmatrix} \bar{Z} \\ \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{\phi}_Z \\ \bar{\phi}_X \\ \bar{\phi}_Y \\ \bar{V}_Z \\ \bar{V}_X \\ \bar{V}_Y \\ \bar{M}_Z \\ \bar{M}_X \\ \bar{M}_Y \\ 1 \end{bmatrix}_i^L$$

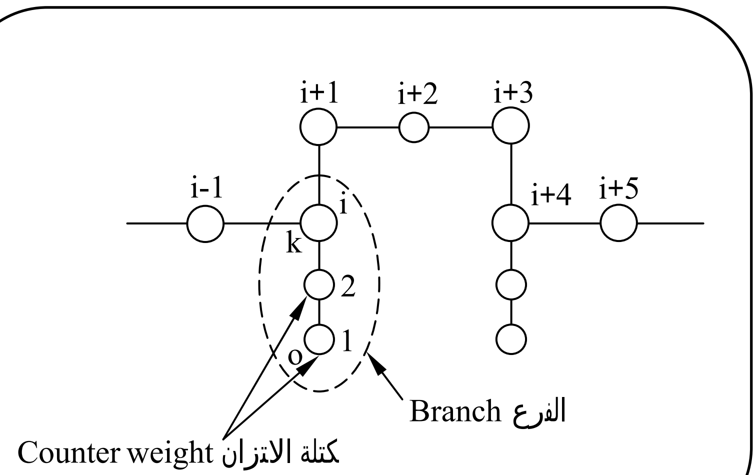
الشكل (6) مصفوفة النقطة (i).



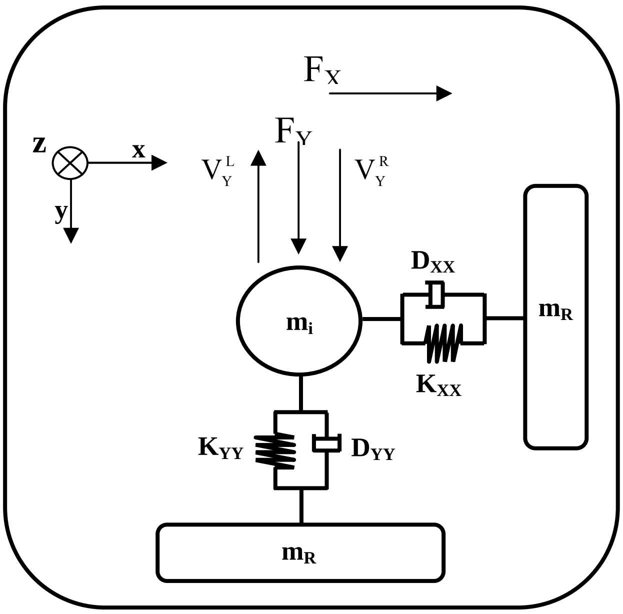
الشكل (7) الانموذج الرياضي لكرسي التحميل

$$
\begin{bmatrix} \bar{Z} \\ \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{\phi}_z \\ \bar{\phi}_x \\ \bar{\phi}_y \\ \bar{V}_z \\ \bar{V}_x \\ \bar{V}_y \\ \bar{M}_z \\ \bar{M}_x \\ \bar{M}_y \\ 1 \end{bmatrix}_i^R
=
\left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc|ccc|c}
 & & & & & & & & & & & & 0 \\
 & [E] & & & [0] & & & [0] & & & [0] & & 0 \\
 & & & & & & & & & & & & 0 \\
\hline
 & & & & & & & & & & & & 0 \\
 & [0] & & & [E] & & & [0] & & & [0] & & 0 \\
 & & & & & & & & & & & & 0 \\
\hline
-m\Omega^2 & 0 & 0 & & & & & & & & & & \bar{V}_{az} \\
0 & a_1 - m\Omega^2 & 0 & & [0] & & & [E] & & & [0] & & -F_X + J\Omega^2\bar{U} - \bar{V}_{ax} \\
0 & 0 & a_2 - m\Omega^2 & & & & & & & & & & -F_Y - \Omega^2\bar{U} - \bar{V}_{ay} \\
\hline
 & & & -\Omega^2 I_Z & 0 & 0 & & & & & & & -\bar{M}_{az} \\
 & [0] & & 0 & -\Omega^2 I_X & j\Omega^2\Delta I & & [0] & & & [E] & & -\bar{M}_{ax} \\
 & & & 0 & -j\Omega^2\Delta I & -\Omega^2 I_y & & & & & & & -\bar{M}_{ay} \\
\hline
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{array}\right]
\begin{bmatrix} \bar{Z} \\ \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{\phi}_Z \\ \bar{\phi}_X \\ \bar{\phi}_Y \\ \bar{V}_Z \\ \bar{V}_X \\ \bar{V}_Y \\ \bar{M}_Z \\ \bar{M}_X \\ \bar{M}_Y \\ 1 \end{bmatrix}_i^L
$$

الشكل (8) المصفوفة الخاصة بكرسي التحميل



الشكل (10) نموذج يوضح بناء التفرع



الشكل (9) الانموذج الرياضي لكرسي التحميل للنهاية الكبرى لذراع التوصيل

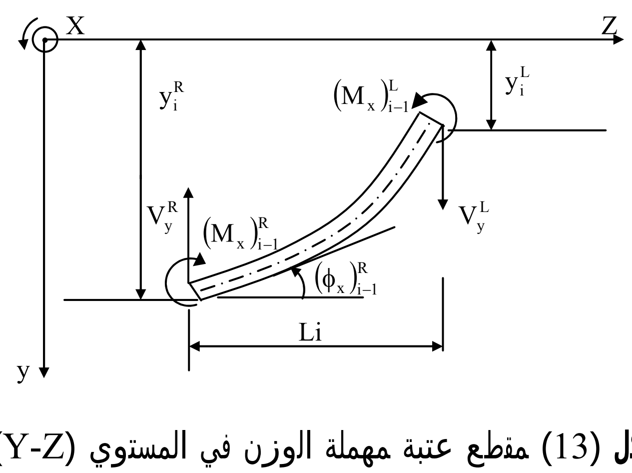
$$[P]_i=\left[\begin{array}{c:c:c:c:c}
[E] & [0] & [0] & [0] & \begin{matrix}0\\0\\0\end{matrix}\\ \hdashline
[0] & [E] & [0] & [0] & \begin{matrix}0\\0\\0\end{matrix}\\ \hdashline
\multicolumn{2}{c:}{U_{PV}U_{VV}^{-1}} & \begin{matrix}[E]\\ [0]\end{matrix} & \multicolumn{2}{c}{U_P-U_{PV}U_{VV}^{-1}U_V}\\ \hdashline
0\ 0\ 0 & 0\ 0\ 0 & 0\ 0\ 0 & 0\ 0\ 0 & 1
\end{array}\right]$$

الشكل (11) مصفوفة النقطة للمحطة المرتبطة بالتفرع

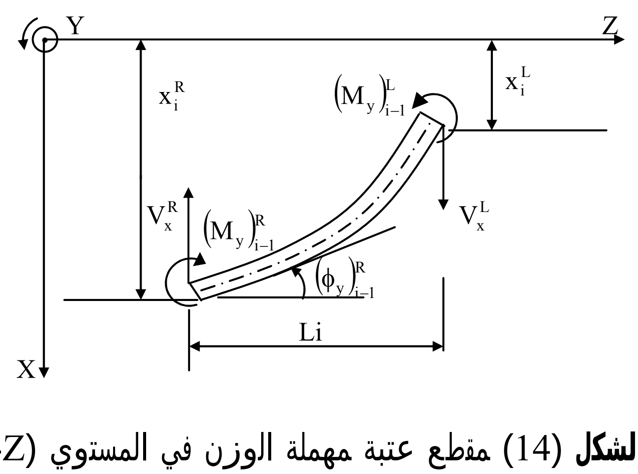
$$\begin{bmatrix} Z\\X\\Y\\ \phi_Z\\ \phi_X\\ \phi_Y\\ V_Z\\ V_X\\ V_Y\\ M_Z\\ M_X\\ M_Y\\ 1\end{bmatrix}^{l}_{I}=\left[\begin{array}{ccc:ccc:ccc:ccc:c}
\multicolumn{3}{c:}{} & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{EA} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
\multicolumn{3}{c:}{[E]} & 0 & 0 & L & 0 & f_1 & 0 & 0 & 0 & \frac{L^2}{2EJ_X} & 0\\
\multicolumn{3}{c:}{} & 0 & -L & 0 & 0 & 0 & f_2 & 0 & -\frac{L^2}{2EJ_Y} & 0 & 0\\ \hdashline
\multicolumn{3}{c:}{} & \multicolumn{3}{c:}{} & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{GJ_Z} & 0 & 0 & 0\\
\multicolumn{3}{c:}{[0]} & \multicolumn{3}{c:}{[E]} & 0 & 0 & \frac{L^2}{2EJ_Y} & 0 & \frac{L}{EJ_X} & 0 & 0\\
\multicolumn{3}{c:}{} & \multicolumn{3}{c:}{} & 0 & -\frac{L^2}{2EJ_X} & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{EJ_Y} & 0\\ \hdashline
\multicolumn{3}{c:}{} & \multicolumn{3}{c:}{} & \multicolumn{3}{c:}{} & \multicolumn{3}{c:}{} & 0\\
\multicolumn{3}{c:}{[0]} & \multicolumn{3}{c:}{[0]} & \multicolumn{3}{c:}{[E]} & \multicolumn{3}{c:}{[0]} & 0\\
\multicolumn{3}{c:}{} & \multicolumn{3}{c:}{} & \multicolumn{3}{c:}{} & \multicolumn{3}{c:}{} & 0\\ \hdashline
\multicolumn{3}{c:}{} & \multicolumn{3}{c:}{} & 0 & 0 & 0 & \multicolumn{3}{c:}{} & 0\\
\multicolumn{3}{c:}{[0]} & \multicolumn{3}{c:}{[0]} & 0 & 0 & L & \multicolumn{3}{c:}{[E]} & 0\\
\multicolumn{3}{c:}{} & \multicolumn{3}{c:}{} & 0 & -L & 0 & \multicolumn{3}{c:}{} & 0\\ \hdashline
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{array}\right]\begin{bmatrix} Z\\X\\Y\\ \phi_Z\\ \phi_X\\ \phi_Y\\ V_Z\\ V_X\\ V_Y\\ M_Z\\ M_X\\ M_Y\\ 1\end{bmatrix}^{R}_{I-1}$$

الشكل (12) الصيغة الرياضية لمصفوفة المجال

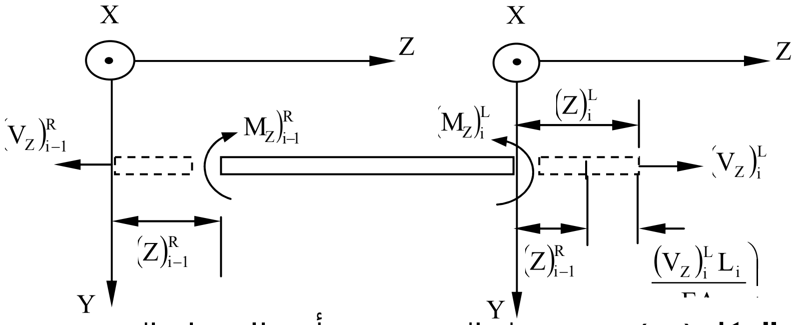
$$f_2=\frac{-L^3}{6EJ_X}+\frac{\chi_Y.L}{GA}\qquad f_1=\frac{-L^3}{6EJ_Y}+\frac{\chi_\chi.L}{GA}$$



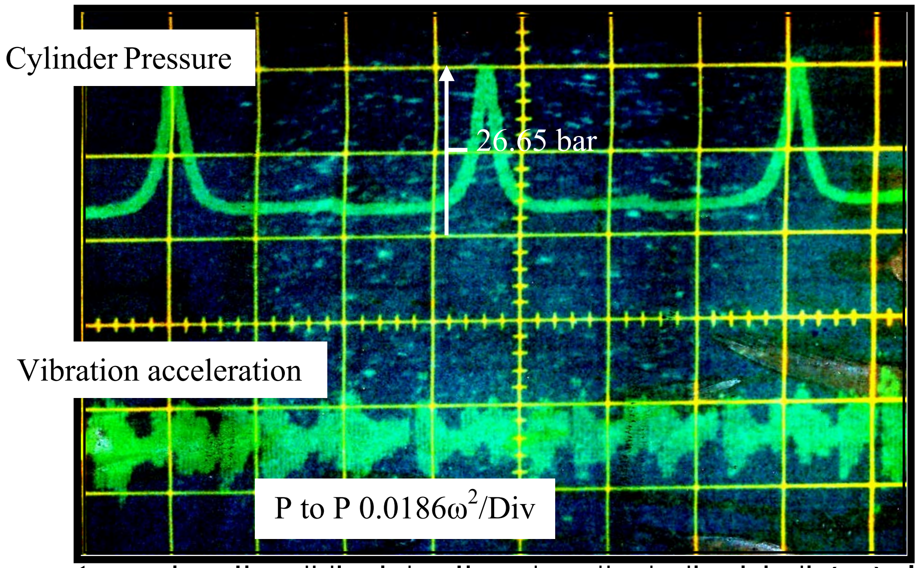
الشكل (13) مقطع عتبة مهملة الوزن في المستوي (Y-Z)



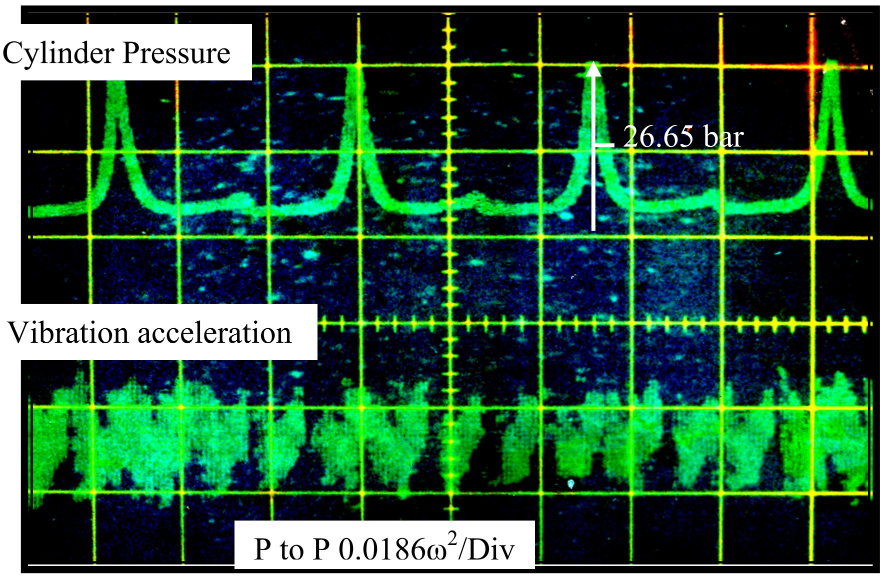
الشكل (14) مقطع عتبة مهملة الوزن في المستوي (-Z



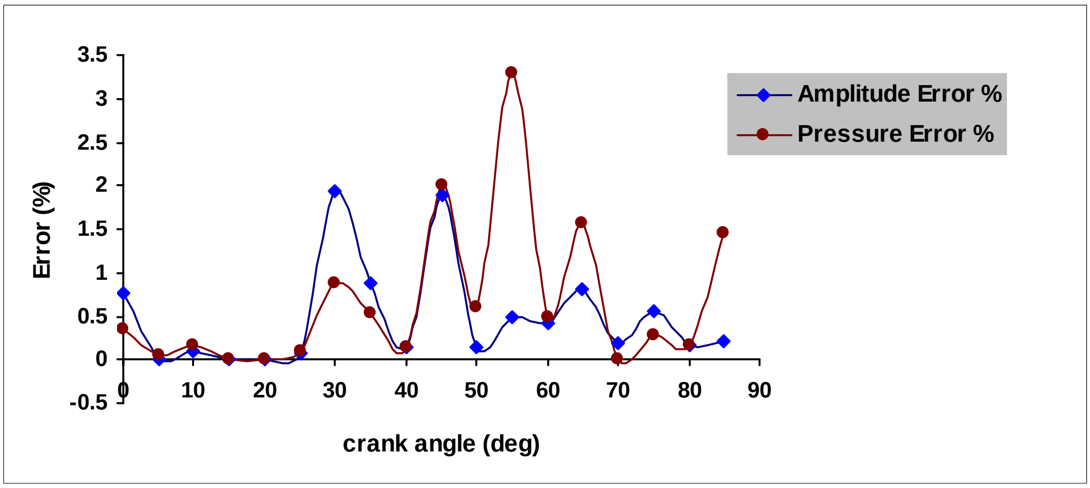
الشكل (15) عتبة مهملة الوزن تحت تأثير الاهتزاز المحوري



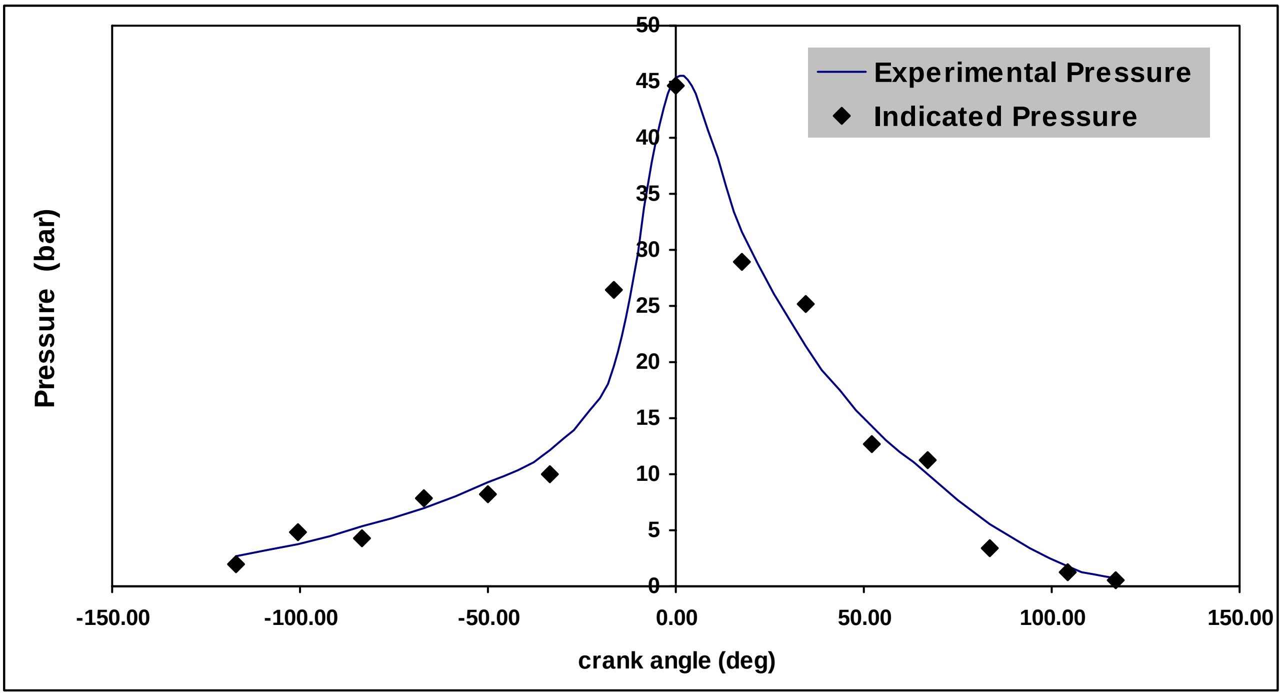
الشكل (16) القراءات العملية للضغط في الاسطوانة الثالثة والاهتزاز عند كرسي التحميل الرئيسي الرابع عند سرعة دورانية (700 r.p.m) (motoring pressure)



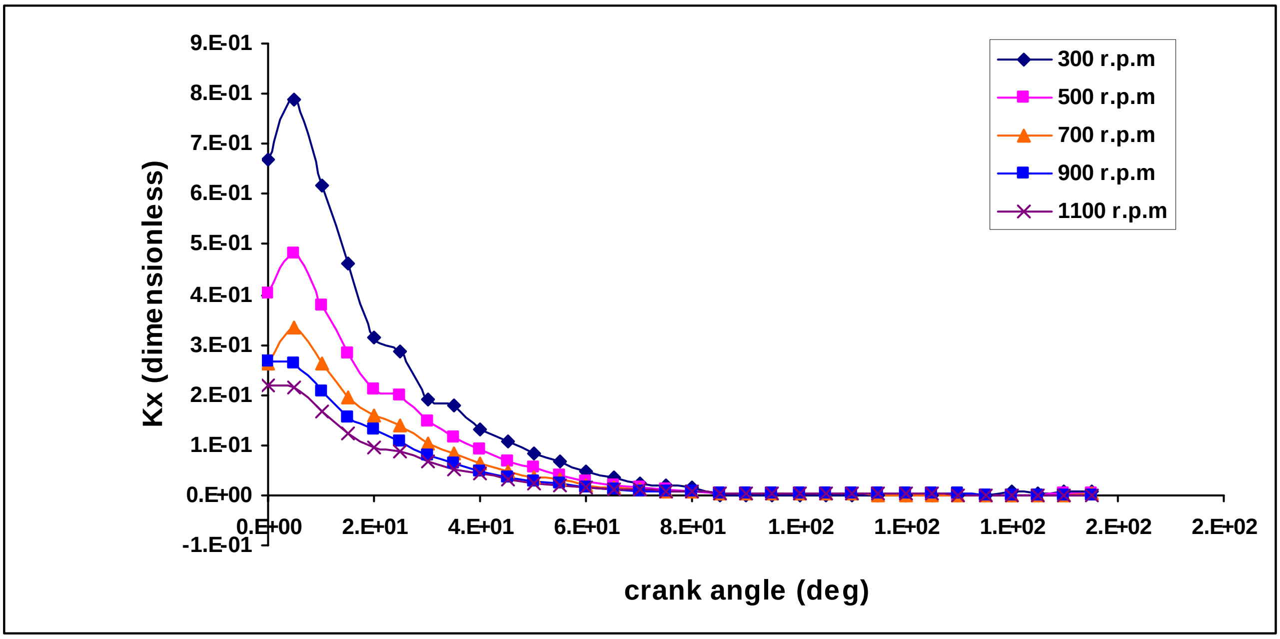
الشكل (17) القراءات العملية للضغط في الاسطوانة الثالثة والاهتزاز عند كرسي التحميل الرئيسي الرابع عند سرعة دورانية (900 r.p.m) (motoring pressure)



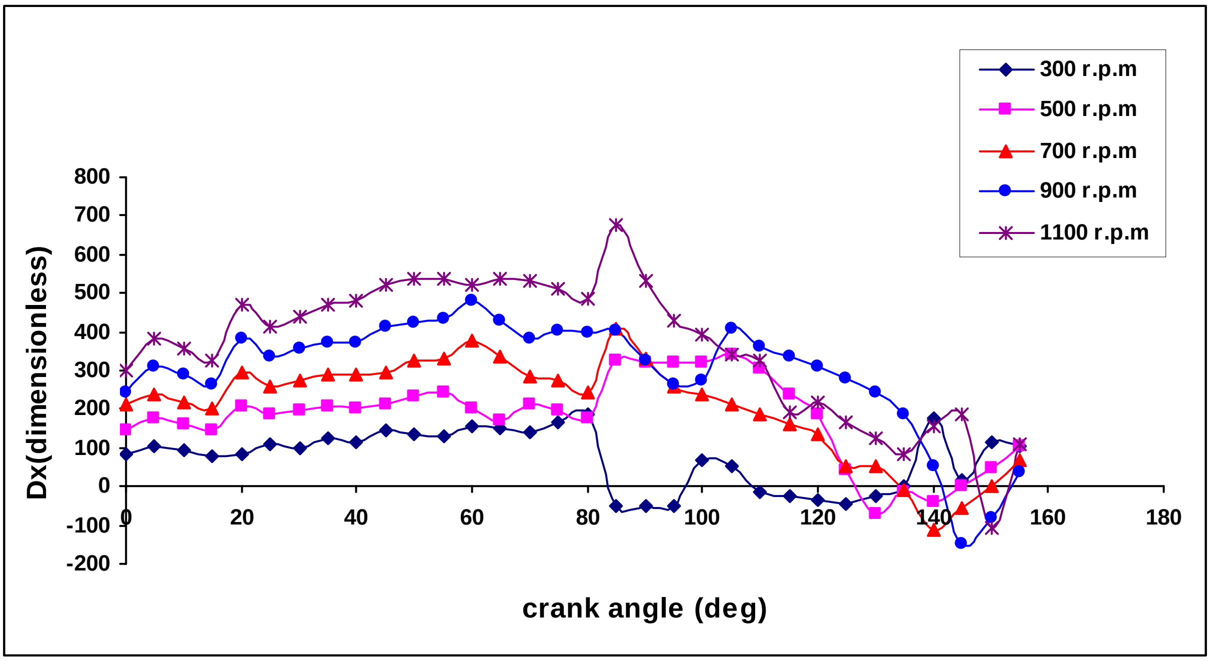
الشكل (18) نسبة الخطأ للضغط وسعة الاهتزاز عند الاختبار الاول



الشكل (19) شكل توزيع الضغط (المقاس والمخمن) داخل الاسطوانة الاولى

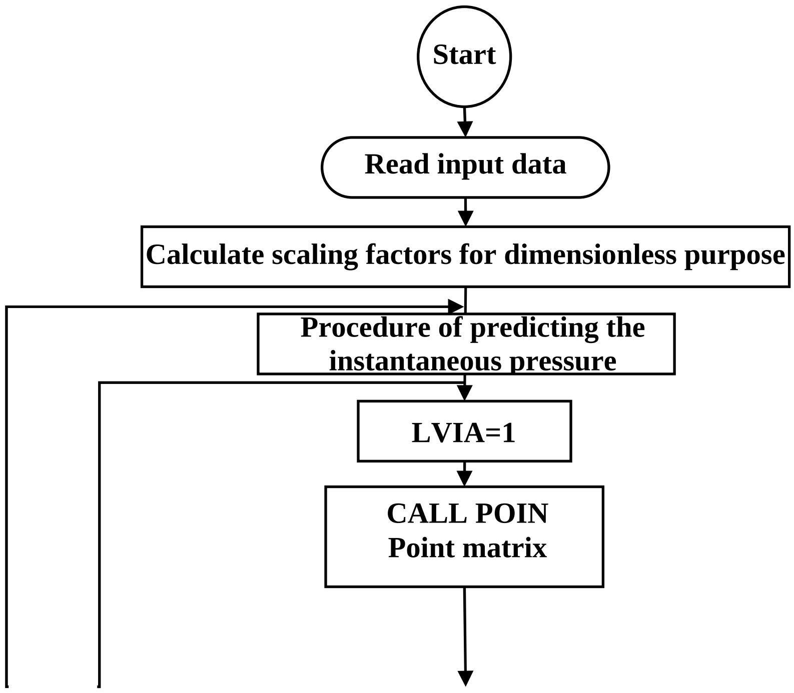


الشكل (20) معامل الجسائة اللابعدي باتجاه (X) لكرسي التحميل الرئيسي الاول عند سرع دورانية مختلفة



الشكل (21) معامل التخميد اللابعدي باتجاه (X) لكرسي التحميل الرئيسي الاول وعند سرع دورانية مختلفة

المخطط الانسيابي لبرنامج حساب ضغط الغاز .



الملحق (B)

$$\overline{F}_R = -\left[g_R(\varepsilon,\beta) + f_R\left(\dot{\overline{\varepsilon}},\dot{\overline{\beta}}\right)\right]$$

$$\overline{F}_T = \left[g_T(\varepsilon,\beta) + f_T\left(\dot{\overline{\varepsilon}},\dot{\overline{\beta}}\right)\right]$$

$$\overline{K}_{XX}=-\left[\frac{\partial g_R}{\partial \varepsilon}\sin^2\beta+\left(g_R+f_R-\frac{\partial g_T}{\partial \beta}\right)\frac{1}{\varepsilon}\cos^2\beta+\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial g_R}{\partial \beta}+\frac{(g_T+f_T)}{\varepsilon}-\frac{\partial g_T}{\partial \varepsilon}\right)\sin\beta\cos\beta\right]$$

$$\overline{K}_{YY}=-\left[\left(-\frac{\partial g_T}{\partial \beta}+g_R+f_R\right)\frac{1}{\varepsilon}\sin^2\beta-\frac{\partial g_R}{\partial \varepsilon}\cos^2\beta+\left(-\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial g_R}{\partial \beta}-\frac{(g_T+f_T)}{\varepsilon}+\frac{\partial g_T}{\partial \varepsilon}\right)\sin\beta\cos\beta\right]$$

$$\overline{D}_{XX}=-\left[\frac{\partial f_R}{\partial \dot{\varepsilon}}\sin^2\beta-\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial f_T}{\partial \dot{\beta}}\cos^2\beta+\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial f_R}{\partial \dot{\beta}}-\frac{\partial f_T}{\partial \dot{\varepsilon}}\right)\sin\beta\cos\beta\right]$$

$$\overline{D}_{YY}=-\left[-\frac{\partial f_T}{\partial \dot{\beta}}\frac{1}{\varepsilon}\sin^2\beta+\frac{\partial f_R}{\partial \dot{\varepsilon}}\cos^2\beta+\left(\frac{\partial f_T}{\partial \dot{\varepsilon}}-\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial f_R}{\partial \dot{\beta}}\right)\sin\beta\cos\beta\right]$$

الملحق (C) : يبين المواصفات الهندسية لمحرك الديزل (Zetor M-type) :

(1) Bearing length (total) :	
First main bearing	40 mm
Second , third and fourth main bearing	32 mm
Fifth main bearing	34 mm
First to fourth big-end bearing	32 mm
(2) Bearing diameter :	
Main bearing diameter	70 mm
Big-end bearing diameter	60 mm
(3) Radial clearance :	19 µm
(4) Length of connecting rod :	220 mm
(5) Crank radius :	55 mm
(6) Bearing grooving , central and circumferential :	8 mm
(7) Bearing length of one land :	
First main bearing	16 mm
Second , third and fourth main bearing	12 mm
Fifth main bearing	13 mm
First to fourth big-end bearing	12 mm
(8) Weight of pistons and gudgeon pin :	1562.8 gm
(9) Weight of connecting rod :	985.6 gm
(10) Engine speed	300 – 1100 r.p.m

تخمين ضغط اسطوانة محرك
الاحتراق الداخلي الآني باستخدام
تحليل الاهتزازات لعمود المرفق