

تحديد عزوم عطالة محرك احتراق داخلي وثوابت صلابة مسانده تجريبياً

م. يوسف حسون، د. مصطفى طالب

كلية الهندسة الميكانيكية، جامعة إدلب

الملخص:

يهدف البحث الى حساب عزوم العطالة لمحرك احتراق داخلي رباعي الأسطوانات رباعي الأشواط تجريبياً وسيكون محرك الاحتراق الداخلي المدروس مرتبطاً أيضاً بعلبة السرعة وسيتم تعليق المحرك بمحور مصمت واعتباره نواساً دورانياً (إذ يعامل المحرك كجملة اهتزازية بست درجات حرية وهكذا يتم التعامل معه في المراجع العلمية كافة). كما سيجري حساب ثوابت الصلابة لنقاط استناد المحرك (أرجله) الأربع باستخدام مكبس هيدروليكي تم تصميمه خصيصاً لهذا الغرض، وقد تمت الحسابات السابقة جميعها وفق المحاور الإحداثية الرئيسية الثلاثة X , Y , Z ويبين الجدولان (4-4) و (4-10) قيم كلٍ من عزوم العطالة ومقارنة قيم ثوابت الصلابة النظرية والتجريبية على التوالي.

الكلمات المفتاحية: اهتزازات المحرك، ثوابت الصلابة، عزوم العطالة

Experimental Determination of the Moments of Inertia of an Internal Combustion Engine and its Support Stiffness Constants

Eng. Yousef Hassoun, Dr. Mostafa Taleb

Faculty of Mechanical Engineering at Idleb University

Abstract:

The research aims to determinate the inertia moments for an internal combustion, four cylinder and four-stroke engine experimentally. The internal combustion engine studied will also be linked to the gearbox by suspending the engine on a solid axle and considering it as a rotating pendulum. The stiffness constants of the four pivot points of the engine (legs) will be determined using a hydraulic piston specially designed for this purpose. All previous calculations were done according to the three main coordinate axes **X, Y, Z**. The two tables (4-4) and (4-10) show the values of both the inertia moments and the comparison between the theory and practically values of the stiffness constants.

Key words: engine vibration, stiffness constants, inertia moments

1-المقدمة:

تعرف الاهتزازات الميكانيكية بأنها حركة ذبذبة الأجسام وقد تم الاصطلاح فيما سبق أيضا بأن الاهتزازات الميكانيكية هي عبارة عن حركات دورية تتكرر بشكل منتظم خلال فترة زمنية محددة. ولكن بعد تقدم العلوم وطرق التحليل الرياضية وكذلك تطور أجهزة قياس الحركات، أصبح التعريف السابق غير شامل لكل الحركات الاهتزازية. لذلك قبل البدء بدراسة علم الاهتزازات لا بد من دراسة علم الحركة فيما يخص السرعة والتسارع (النجار, 1981, ص21).

يعبر عن طاقة الجسم بأنها مقدار ما ينجزه الجسم من عمل إما بسبب حركته وإما بسبب خصائصه الأساسية. ويمكن ان تأخذ طاقة الجسم أحد الشكلين التاليين:

1-الطاقة الحركية: وترتبط بسرعة حركة الجسم وبشكله. فإذا كان الجسم عبارة عن كتلة مادية فإن الطاقة الحركية تتألف من مركبة واحدة:

$$C = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

أما بالنسبة إلى الجسم الصلب، في الحركة المركبة (انسحابيه ودورانية في آن واحد) فإن مقدار الطاقة الحركية:

$$C = \frac{1}{2} \vec{V}_G \cdot m \vec{V}_G + \frac{1}{2} \vec{\theta} \cdot \vec{H}_G$$

في الحركة المستوية للجسم الصلب كما هي الحالة في اهتزازات الفتل يمكن تبسيط الطاقة الحركية بشكل سهل وواضح فتؤول معادلة الطاقة الحركية إلى الشكل المألوف:

$$C = \frac{1}{2} m V_G^2 + \frac{1}{2} I_G \omega^2$$

2- الطاقة الكامنة: تنشأ الطاقة الكامنة للجسم بسبب وجود التشوهات المرنة أثناء الحركة، أو بسبب تغير مكان الجسم في حقل الثقالة الأرضية. ففي حالة بذل عمل من أجل تغيير مكان الجسم تتزايد الطاقة الكامنة. أما إذا بذل الجسم أثناء حركته عملاً فإن الطاقة الكامنة تتناقص. ويطلق على الطاقة الكامنة أحياناً اسم طاقة المرونة أو طاقة الانفعال (Robert & Steidel, 1989, p43).

يقوم محرك الاحتراق الداخلي العامل بالديزل بتحويل الطاقة الكيميائية الكامنة في وقود الديزل إلى طاقة حركية وقد اخترعت محركات الديزل من أجل الحصول على كفاءة أعلى من كفاءة محرك البنزين وذلك من خلال ارتفاع نسبة الضغط (Compression Ratio) في محركات الديزل حيث تتراوح ما بين 1:14 إلى 1:25 وكما هو معروف فإن كفاءة المحرك تتناسب طردياً مع نسبة الضغط (العمر, 1987, ص187).

ولعل النقطة الأهم عند دراسة محركات الاحتراق الداخلي هي تقليل أو تخفيض اهتزازاتها، فقد تم دراسة فعالية وجود دعائم (مخمدات) المحرك وتأثيرها على اهتزازها ووجد بأن الإقلال من الاهتزازات لجسم المحرك يعتبر أمراً صعباً، لذلك تم التركيز على صلابتها كبرامتر أساسي في الدراسة (Bhosle, et al., 2018).

تعد دراسة الاهتزازات من أهم الدراسات الديناميكية لأنها ترتبط بكتلة وصلابة النظام المدروس، وإجمالاً كل نظام متحرك ذي كتلة وصلابة فهو نظام مهتز، وهذه حالة جميع الأنظمة الميكانيكية (الفارس, 1989, ص13).

ومن المؤلفون وجود نوع من الاهتزازات الميكانيكية التي تحتوي على أكثر من تردد أثناء حركتها الاهتزازية، كذلك فإن معظم الأنظمة متعددة درجات الحرية عندما تهتز فإن حركتها تحتوي على جميع الترددات الطبيعية للنظام (الفارس, 1988, ص142).

تم تصميم جهاز اختبار لقياس عزوم العطالة على مبدأ النواس الفيزيائي وتم تحليل النتائج وتم حساب دور الحركة (PETR HEJTMÁNEK, et al., 2013, p16).

تؤدي الأجزاء المتحركة في المحركات إلى نشوء اهتزازات تنتقل إلى نقاط استناد المحرك عبر جسم المحرك، لذاك يجب معرفة عزوم العطالة لاستخدامها في المحاكاة العددية وقد

تم استخدام طريقة (pendulum and modal methods) لإيجاد قيم عزوم العطالة لكنها تتوافق مع مشاكل وصعوبات كبيرة، نظراً لصعوبة تطبيقها على السيارة بشكل كامل، لذلك تم اقتراح طريقة جديدة لإيجاد عزوم العطالة لمجموعة نقل الحركة فقط (Barillon, et al., 2014, p2395).

2- قانون العزوم في الحركة الدورانية:

في الحركة الدورانية المستوية للجسم الصلب يأخذ قانون نيوتن الشكل التالي:

$$\sum \vec{M}_0 = I_0 \cdot \vec{\theta} \quad (2 - 1)$$

وهي المعادلة المطابقة لقانون نيوتن الثاني وهي:

$$I \cdot \vec{\alpha} = \sum \vec{T} \quad (2 - 2)$$

I : عزم العطالة الكتلي للجسم حول محور الدوران.

$\sum T$: المجموع الجبري لعزوم الفتل والمزدوجات المؤثرة على الجسم.

α : التسارع الزاوي للجسم.

ينقل الطرف الأيسر للمعادلة الى الطرف الأيمن نحصل على:

$$\sum \vec{T} + (-I \cdot \vec{\alpha}) = 0 \quad (2 - 3)$$

$I \cdot \alpha$: المزدوجة المسارعة.

$-I \cdot \alpha$: مزدوجة العطالة أو مزدوجة دالمبير.

يمثل الشكل (2-1) محرك الاحتراق الداخلي موضوع الدراسة وهو معلق بواسطة محور صلب ليمائل النواس الدوراني، ويتألف من المحرك ذي عزم العطالة (I) والمحور ذي عامل الصلابة على الفتل.

م. حسون، د. طالب

(K). أثناء الحركة الاهتزازية لهذا المحرك فإنه يتحرك حركة توافقية دورانية بتردد يساوي التردد الطبيعي للنظام.

فأثناء تدوير المحرك بزاوية (θ) عكس اتجاه دوران عقارب الساعة فإنه سيخضع إلى عزم متسارع مقداره ($I \cdot \ddot{\theta}$) باتجاه عقارب الساعة. وبتطبيق العلاقة (2-2) يمكن أن نكتب:

$$I \cdot \ddot{\theta} = \sum T = -K \cdot \theta \quad (2 - 4)$$



شكل (2-1) محرك الاحتراق الداخلي وهو معلق بالمحور الصلب

ولكون الاهتزاز حراً أي $\sum T = 0$ فإن:

$$I \cdot \ddot{\theta} + K \cdot \theta = 0 \quad (2 - 5)$$

وبذلك نكون قد حصلنا على معادلة تفاضلية متجانسة من المرتبة الثانية ويكون الحل العام لحركة المحرك الدورانية على النحو التالي:

$$\theta = \theta_1 \cdot \sin \omega_n t + \theta_2 \cdot \cos \omega_n t \quad (2 - 6)$$

ويكون التردد الطبيعي لهذه الحركة:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{I}} \quad (2 - 7)$$

وتمثل (θ_1, θ_2) المطال الزاوي للحركة الدورانية للمحرك باعتباره نواساً دورانياً ويمكن تحديدها من الشروط البدائية للحركة: $\theta(0)$, $\dot{\theta}(0)$ ومن ناحية ثانية فإن:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{\tau} \quad (2 - 8)$$

τ (sec): دور الاهتزاز الحر

ومنه نجد:

$$\frac{2\pi}{\tau} = \sqrt{\frac{K}{I}} \quad (2 - 9)$$

أو:

$$\frac{2\pi n}{T} = \sqrt{\frac{K}{I}} \quad (2 - 10)$$

حيث: T : الزمن اللازم لإنجاز عدد محدد من الهزات

n : عدد الهزات المحدد

$$K = \frac{G \cdot I_p}{l} \quad (2 - 11)$$

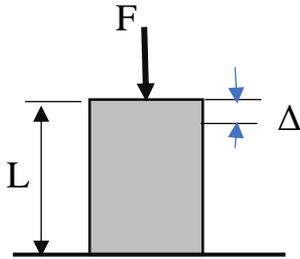
G: عامل المرونة على القص لمحور التعليق الفولاذي.

$$I_p = \frac{\pi \cdot d^4}{32} : \text{عزم العطالة القطبي للمقطع العرضاني لعمود الفتل (قضيبي التعليق).}$$

l: طول المحور (ذراع التعليق) حيث يمكن ان يؤثر تغير هذا الطول على قيمة K على الفتل وفق العلاقة 2-11 .

3-الدراسة النظرية لثابت الصلابة:

يتم حساب ثوابت الصلابة للمساند الامامية والخلفية للمحرك وفقاً لما يلي:



$$\frac{\Delta}{L} = \varepsilon \quad (3 - 1)$$

حيث Δ : مقدار الانضغاط.

ε : الانفعال الناتج عن تطبيق حمولة الضغط.

وحسب قانون هوك فإن:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{A \cdot E} \quad (3 - 2)$$

$$\Rightarrow \Delta = \frac{F \cdot l}{A \cdot E} \quad (3 - 3)$$

من ناحية ثانية:

$$K \cdot \Delta = F \quad (3 - 4)$$

ومنه نجد:

$$K = \frac{F}{\Delta} = \frac{F}{\frac{F.L}{A.E}} = \frac{A.E}{L} \quad (3-5)$$

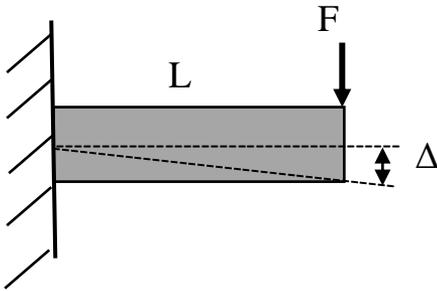
K: ثابت صلابة رجل المحرك (مسنده).

E: معامل يونغ للمطاط (مادة رجل المحرك) $= 4 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$

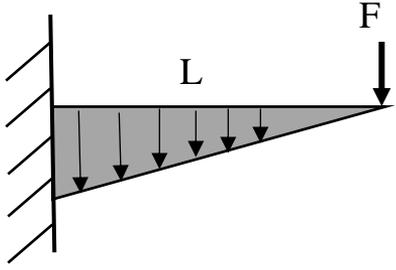
A: مساحة المقطع الخاضع للحمولة.

L: طول الجائز.

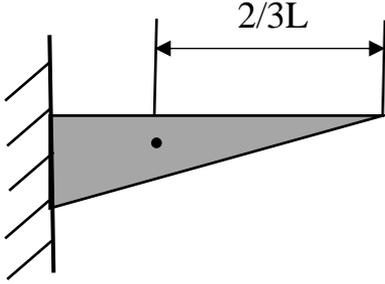
يتم تحديد الإزاحة الأعظمية لمسند المحرك باعتباره كثيفة معلقة مع طرف حر خاضع لقوة مركزة **F** بطريقة مور (تقوم هذه الفرضية على تحديد الصلابة من خلال الإزاحة الأعظمية كما في العلاقة 3-4 و العلاقة 3-6).



$$\Delta = \frac{F.L^3}{3E.I} \quad (3-6)$$



مخطط عزم الانعطاف:



بعد مركز ثقل مخطط عزم الانعطاف عن نقطة تطبيق القوة F $X_c = 2/3 L$

ومنه تكون مساحة مخطط عزم الانعطاف:

$$A = \frac{F.L^2}{2} \quad (3-7)$$

نأخذ عزم مساحة مخطط عزم الانعطاف بالنسبة لنقطة تطبيق الحمل الخارجية مقسوماً

على عامل الصلابة على الانعطاف $E.I$

$$S = A.X_0 = \frac{FL^2}{2} \cdot \frac{2L}{3} = \frac{FL^3}{3} \quad (3-8)$$

$$y = \frac{S}{E.I} = \frac{FL^3}{3E.I} \quad (3 - 9)$$

ومن المعلوم أن:

$$K.y = F \Rightarrow K = \frac{F}{y} \quad (3 - 10)$$

$$\Rightarrow k = \frac{F}{\frac{F.L^3}{3E.I}} \Rightarrow K = \frac{3E.I}{L^3} \quad (3 - 11)$$

4-الدراسة التجريبية:

4-1-قياس عزوم العطالة:

4-1-1-تجهيز التجربة:

من أجل تحويل المحرك (موضوع التجربة) إلى نواس دوراني قمنا بتصميم قفص معدني يحيط بالمحرك ويسهل عملية حمله وتعليقه وذلك باستخدام زوايا معدنية قياس $4 \times 2 \text{mm}$ وتم وصلها مع بعضها البعض عن طريق اللحام. كما قمنا بتجهيز آلية على كل محور من المحاور الثلاثة X,Y,Z مهمة هذه الآلية تسهيل عملية تعليق المحرك بالقضيب الفولاذي المثبت بالسقف، كما أنها تسهل عملية زلق المحرك في المستوي الأفقي من أجل تأمين التوازن المطلوب للمحرك أثناء التعليق قبل البدء بعملية الاختبار، وقمنا بتثبيت القضيب بالسقف تثبيتاً صلباً عن طريق لحامه بصفيحة معدنية مثبتة بواسطة أربعة براغ إلى السقف، أما الطرف الآخر للقضيب من جهة المحرك فقد كان متصلاً بواسطة اللحام بصفيحة معدنية تؤمن عملية الانزلاق المذكورة سابقاً كما هو مبين في الشكل (4-1).

4-1-2- إجراء التجربة:

خطوات العمل:

- 1- تم تثبيت محور التعليق في السقف بواسطة صفيحة التثبيت الملحوم بها عن طريق أربعة براغ.
- 2- رفع المحرك بواسطة الرافعة وتعليقه بصفيحة الانزلاق المثبتة بمحور التعليق.



الشكل (4-1): آلية تعليق المحرك لقياس عزوم عطالته

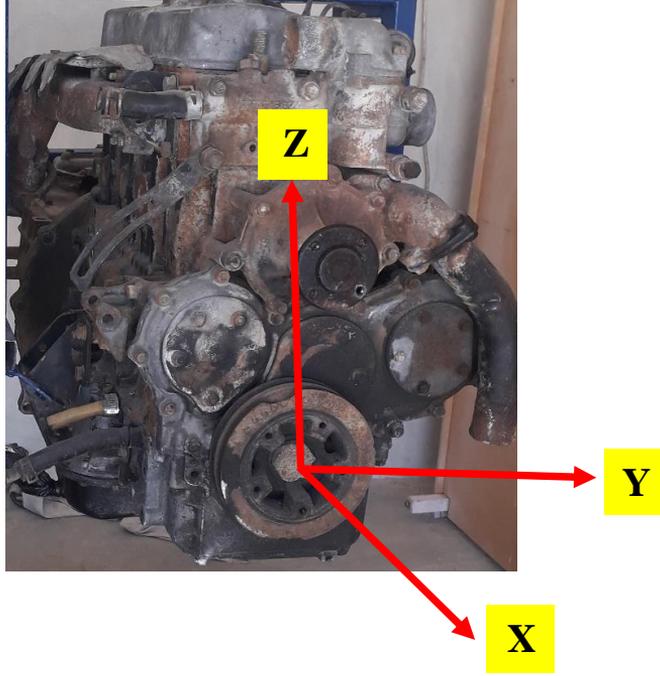
3- يتم وضع ميزان زئبقي على سطح المحرك لضمان أفقيته قبل البدء بعملية التدوير كما هو موضح بالشكل (2-4).



الشكل (2-4): يوضح الميزان الزئبقي المستخدم لضمان أفقية المحرك.

4- بعد ضمان أفقية المحرك نقوم بتدويره بزاوية ما مع تشغيل الميقاتية لحظة البدء وقياس زمن عشر هزات للمحرك (علماً أن عدد الهزات لا يرتبط بزاوية الفتل وفق العلاقات من 2-7 حتى 2-10).

5- يتم تكرار الخطوات الأربع السابقة على كل محور من المحاور الثلاثة للمحرك X, Y, Z المحددة بالشكل (4-3).



الشكل (4-3) توضع المحاور الإحداثية على المحرك

وقد تم تسجيل القراءات التالية:

الجدول (4-1) زمن عشر هزات حول المحور Z

المحصلة	القراءة الرابعة	القراءة الثالثة	القراءة الثانية	القراءة الأولى	
22.047	22.22	22.12	21.57	22.28	الزمن [Sec]
	10	10	10	10	عدد الهزات

الجدول (2-4) زمن عشر هزات حول المحور y

المحصلة	القراءة الرابعة	القراءة الثالثة	القراءة الثانية	القراءة الأولى	
22.482	22.5	22.5	22.21	22.72	الزمن [Sec]
	10	10	10	10	عدد الهزات

الجدول (3-4) زمن عشر هزات حول المحور X

المحصلة	القراءة الرابعة	القراءة الثالثة	القراءة الثانية	القراءة الأولى	
11.565	11.47	11.5	11.79	11.5	الزمن [Sec]
	10	10	10	10	عدد الهزات

4-1-3- الحسابات العملية لعزوم العطالة:

- أبعاد وخواص محور التعليق الفولاذي:

* قطر المحور

$$d=16[\text{mm}]$$

* طول المحور

$$l=2690 [\text{mm}]$$

$$I=6433.981 [\text{mm}^4]$$

* عزم العطالة القطبي للمحور

$$G=82 \times 10^3 [\text{N/mm}^2]$$

* عامل المرونة على القص للمحور

$$K=196129.368 \text{ [N.mm]}$$

* ثابت صلابة المحور

- عزوم عطالة المحرك حول المحاور الإحداثية الثلاثة X,Y,Z:

بالاستفادة من العلاقة الرياضية (2-10) نجد أن قيم عزوم العطالة حول المحاور الإحداثية الثلاثة هي كما هو مبين بالجدول (4-4):

الجدول (4-4) قيم عزوم عطالة المحرك حول المحاور الإحداثية الثلاثة

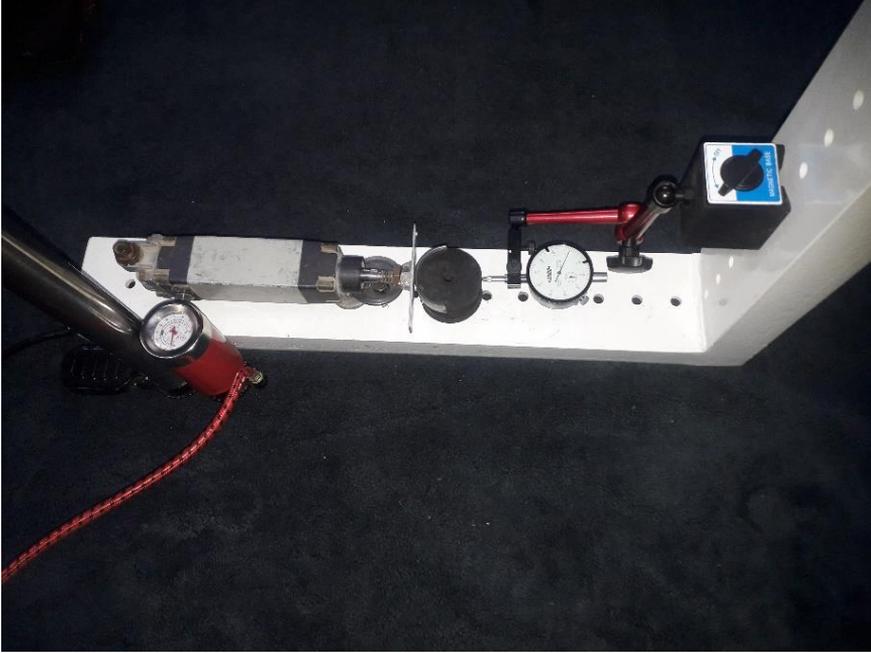
$I_z \text{ [Kg.m}^2\text{]}$	$I_y \text{ [Kg.m}^2\text{]}$	$I_x \text{ [Kg.m}^2\text{]}$
24.142	25.11	6.644

4-2-الدراسة التجريبية لقياس ثوابت الصلابة لأرجل المحرك (نقاط استناده):

4-2-1-تجهيز التجربة:

تم تصميم آلية اختبار خاصة لقياس مقدار انتقال رجل المحرك تحت تأثير حمولة معينة وتتألف هذه الآلية من الأجزاء التالية:

- قاعدة معدنية مثقبة وهي عبارة عن مجرة فولاذية على شكل حرف U بعرض 10 Cm مشكلة زاوية قائمة طول أضلاعها 40x50 cm تحتوي على ثقب لتثبيت الضاغط والعينة عليها.
- ضاغط 10 bar بقطر مكبس D=41 mm و قطر لمحور المكبس d=14 mm
- ساعة قياس مقدار الانتقال بدقة 0.01 mm
- ذراع حامل الساعة مثبت على القاعدة المعدنية.
- براغي تثبيت الضاغط على القاعدة 8 mm



الشكل (4-4) آلية الاختبار لقياس ثابت الصلابة

4-2-2-4- إجراء تجربة قياس ثوابت الصلابة:

خطوات العمل:

- 1- يتم تثبيت رجل المحرك حسب شكلها سواءً كانت أسطوانية أو متوازية سطوح في المكان المخصص لها ضمن القاعدة.
- 2- يتم تطبيق الحمولة على الرجل بواسطة الضاغط على شكل حمولة ستاتيكية موزعة على سطح الرجل.
- 3- يتم قراءة قيمة الضغط من مقياس الضغط وكذلك قراءة مقدار الانتقال للرجل على مقياس الانتقال.
- 4- يتم أخذ ثلاث قراءات لكل رجل ثم حساب المتوسط لها واعتماده في الحسابات الرياضية.
- 5- يتم إجراء الخطوات الأربع السابقة لكل رجل من أرجل المحرك.

6- يتم حساب القوة المسببة للانتقال من العلاقة التالية:

$$F = \frac{\pi \cdot P \cdot D^2}{4} \quad (4 - 1)$$

F: القوة المسببة للانتقال [N]

P: مقدار الضغط المطبق [N/m²]

D: قطر المكبس [m]

ثم يتم حساب ثابت الصلابة من العلاقة:

$$K = \frac{F}{\Delta} \quad (4 - 2)$$

Δ : مقدار الانتقال الناتج عن الضغط المطبق.

7- بنتيجة تطبيق الخطوات السابقة حصلنا على القراءات والقيم الموضحة في الجداول التالية:

الجدول (4-5) نتائج اختبار المسند الأمامي متوازي المستطيلات على الضغط باتجاه المحور Z

4	3.35	2	الضغط P[bar]
1.6	1.4	1	الانتقال Δ [mm]
528.1	442.3	264.05	القوة F[N]
330062.5	315928.5	264050	ثابت الصلابة K[N/m]
303347			القيمة المتوسطة لثابت الصلابة K[N/m]

الجدول (4-6) نتائج اختبار المسند الخلفي الأسطواني الشكل على الضغط باتجاه المحور Z

4	3.35	2	الضغط P[bar]
2.6	1.75	1.2	الانتقال Δ [mm]
528.1	442.3	264.05	القوة F[N]
203115.4	252737	220041.6	ثابت الصلابة K[N/m]
225298			القيمة المتوسطة لثابت الصلابة K[N/m]

الجدول (4-7) نتائج اختبار المسند الأمامي متوازي المستطيلات على الانحناء باتجاه المحور X

4	3	2	الضغط P[bar]
3.6	2.8	1.8	الانتقال Δ [mm]
528.1	396.08	264.05	القوة F[N]
146694.4	141457	146695	ثابت الصلابة K[N/m]
144948.84			القيمة المتوسطة لثابت الصلابة K[N/m]

الجدول (4-8) نتائج اختبار المسند الأمامي متوازي المستطيلات على الانحناء باتجاه المحور Y

3	2	1	الضغط P[bar]
3.4	2.7	1.6	الانتقال Δ [mm]
396.08	264.05	132.03	القوة F[N]
116494	97796	82518.7	ثابت الصلابة K[N/m]
98936.3			القيمة المتوسطة لثابت الصلابة K[N/m]

الجدول (4-9) نتائج اختبار المسند الخلفي الأسطواني على الانحناء باتجاه المحورين X,Y

3	2	1	الضغط P[bar]
5	3.9	2.7	الانتقال Δ [mm]
396.08	264.05	132.03	القوة F[N]
79216	67705	48900	ثابت الصلابة K[N/m]
65273.66			القيمة المتوسطة لثابت الصلابة K[N/m]

الجدول (10-4) قيم ثوابت الصلابة التجريبية والنظرية

المسند	الاختبار	المحور	نظرياً [N/m]	تجريبياً [N/m]
أمامي متوازي مستطيلات	ضغط	Z	331914.89	303347
أمامي متوازي مستطيلات	انحناء	Y	103637.68	98936.3
أمامي متوازي مستطيلات	انحناء	X	159531.99	144948.8
خلفي أسطواني	ضغط	Z	244255.3	225298
خلفي أسطواني	انحناء	X, Y	71073.6	65273.66

5-الاستنتاجات:

- نلاحظ أن قيمة عزم العطالة على المحور X صغيرة مقارنة بقيمتي عزمي العطالة على المحورين الآخرين Y، Z
- نلاحظ أن القيم التجريبية لثوابت الصلابة للمساند الأمامية والخلفية متقاربة من القيم النظرية وبنسبة خطأ تتراوح بين (4 - 9) %.
- المسند الخلفي الأسطواني يمتلك ثابت صلابة متساوياً على المحورين X, Y على الانحناء.
- المسند الأمامي متوازي المستطيلات لا يمتلك ثابت صلابة متساوياً على المحورين X, Y على الانحناء.

6-المناقشة:

- يعود السبب في الفرق الكبير بين قيم عزوم العطالة على المحور X وعلى المحورين Z, Y إلى قرب مركز ثقل المحرك من جميع حوافه على المحور X وبعد مركز

الثقل عن أطرافه على المحورين Z, Y مما ينعكس على التردد ω وبالتالي على عدد الهزات المنجزة خلال فترة زمنية محددة.

- نسبة الخطأ بين القيم النظرية والتجريبية ناتجة عن أخطاء التجربة لأن الجهاز الذي تمت به الاختبارات مصنعاً محلياً وقد يحتوي بعض التسامحات التصنيعية البسيطة علماً أن نسبة الخطأ لم تتعد 9% وهي نسبة مقبولة هندسياً.
- تساوي قيم ثوابت الصلابة للمسند الخلفي باتجاه المحورين X, Y على الانحناء ناتج عن كون شكل المسند أسطوانياً وبالتالي يمتلك الأبعاد نفسها من محوره في الاتجاهين X, Y مما يعني تساوي قيم خواصه على المحورين المذكورين، وهذا الأمر منفي على المسند الأمامي نتيجة اختلاف أبعاده.

المراجع العربية:

- 1- العمر، أحمد فيصل. (1987). محركات الاحتراق الداخلي. مطبوعات جامعة حلب.
- 2- الفارس، علي. (1988). الاهتزازات الميكانيكية وديناميك الآلات. مطبوعات جامعة حلب.
- 3- الفارس، علي. (1989). الاهتزازات الميكانيكية. مطبوعات جامعة حلب.
- 4- النجار، رشدي. (1981). الاهتزازات الميكانيكية. مطبوعات جامعة حلب.

المراجع الأجنبية:

- 5- F. Barillon¹, L. Polac², C. Thevenard. (2014). "A method to estimate automotive powertrain inertia properties using operational vibrations". PROCEEDINGS OF ISMA2014 INCLUDING USD.
- 6- N.S.Ahirrao a,*, Dr.S.P.Bhosle b, Dr.D.V.Nehete. (2018). "Dynamics and Vibration Measurements in Engines". 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering.
- 7- PETR HEJTMÁNEK, ONDŘEJ BLAŽÁK, PAVEL KUČERA, PETR PORTEŠ, JAN VANČURA. (2013). "MEASURING THE YAW MOMENT OF INERTIA OF A VEHICLE". Institute of Automotive Engineering, Brno University of Technology, Technická 2, CZ 616 69 Brno, Czech Republic.
- 8- Robert F. Steidel Jr. (1989). An Introduction to Mechanical Vibration. John Wiley and Sons.