

تأثير درجة الحرارة على كرسى تحميل غازي بوجود حمل ديناميكي وحيود محوري

د. موفق علي توفيق* و أمير طوفان شفيق*

تاريخ الاستلام: 2005/9/18

تاريخ القبول: 2006/7/6

الخلاصة

تبحث هذه الدراسة في تأثير درجة الحرارة على التزييت الهيدروديناميكي في كرسى تحميل غازي (هواء) في وضع حيود محوري وتحت تأثير تحميل ديناميكي و دراسة هذا التأثير على توزيع الضغط في غشاء الهواء , مركبتا عزم الحيود المحوري , أقصى قيمة للضغط في الغشاء و ادنى قيمة لسمك الغشاء عند درجات وتوزيعات مختلفة لدرجة الحرارة وعند قيم مختلفة من درجة الحيود وزاوية الحيود .

وتدل النتائج المستحصلة على ان سلوكية توزيع الضغط متشابهة عند درجات الحرارة المختلفة وان مركبتا عزم الحيود المحوري تتناقصان مع ارتفاع درجة الحرارة وان القيمة الاقصى للضغط تتناقص كلما ارتفعت درجة الحرارة ايضاً وان ادنى قيمة لسمك الغشاء تزداد مع ارتفاع درجة الحرارة .

Effect Of Temperature On Gas Misaligned Journal Bearing Under Dynamic Loads

Abstract

This study investigates the effect of a temperature on the hydrodynamic lubrication of misaligned gas (air) journal bearing under dynamic loads and study this effect on the distribution of the pressure in the film of the air , components of misalignment moment , maximum value of pressure and minimum value of film thickness at different value and distribution of temperature , degree of misalignment and angle of misalignment .

The results show that the form of the pressure distribution is a similar at different value of temperature and the components of misalignment moment decrease with the rise of the temperature . Also the maximum value of the pressure decrease and the minimum value of film thickness increase with the rise of the temperature .

1 . المقدمة

يحصل التزييت الهيدروديناميكي بوضع كمية كافية من مائع التزييت بين السطوح المنزلقة لضمان الانفصال التام بينها [1] . والغرض الرئيس من ذلك هو تقليل مقاومة الاحتكاك ومقدار البليان أو السيطرة عليهما بين

السطوح المنزلقة على بعضها [4] . وان كراسي التحميل هي من أبرز الامثلة المستخدمة في تطبيق نظرية التزييت الهيدروديناميكية في تصميم المكائن الحديثة [5] .

* هندسة المكائن والمعدات , الجامعة التكنولوجية/بغداد

ولكنثرة استخدام كراسي التحميل الهيدروديناميكية تولدت حاجة ماسة لتحسين ادائها لمواكبة تطور هذه التطبيقات مما دفع الباحثين والعلماء لاجراء بحوث نظرية وعملية لدراسة عوامل متعددة وفي ظروف تشغيلية مختلفة لمعرفة مدى تأثير هذه العوامل على كراسي التحميل المحورية .

اتسمت هذه البحوث بدراسة تأثير عامل واحد او اكثر على اداء كراسي التحميل المحورية الغازية ، فهناك من اهتم بدراسة استقرارية عمود الدوران في كرسى تحميل محوري غازي هيدروستاتيكي ذي مسامات صغيرة تتخلل الكرسى لتجهيزه بالتدفق اللازم من الغاز لتوليد ضغط كاف لفصل العمود عن الجلبة [6] ، وهناك دراسة تتضمن دراسة تأثير الضغط الخارجي على معاملي الصلابة والتخميد لكرسى تحميل محوري غازي هيدروستاتيكي [7] ، كذلك اهتمت بعض البحوث بدراسة اداء كرسى تحميل غازي هيدروستاتيكي بطريقة العناصر المحددة (FEM) باعتماد معادلة رينولدز الاساس لتكوين المصفوفات اللازمة للحل [8] ، كما اهتمت بعض البحوث بدراسة الاهتزاز الحاصل في كرسى تحميل هيدروستاتيكي بتأثير تذبذب ضغط التجهيز ، كذلك اهتم البعض بدراسة الاهتزاز في عمود الدوران بالاتجاهين القطري والزواوي والسلوكيات مختلفة لتذبذب الضغط المجهز وذلك بحل معادلة رينولدز حلا عدديا بطريقة الفروق المحددة مع اخذ بنظر الاعتبار علاقة الاهتزاز بتغير سمك الغشاء مع الزمن لاطهار تأثير تذبذب الضغط على محور الدوران [9] ، وقد قدم بحث في هذا المجال يتضمن دراسة نظرية لكرسى تحميل غازي هيدروديناميكي بوضع حيود محوري وحالة الاستقرار (Steady State) وذلك بتحليل معادلة رينولدز وحلها بطريقة الفروق المحددة

باستخدام الحاسوب الالكتروني . وتم حساب المتغيرات الاساسية لكرسى التحميل مثل سعة استيعاب الحمل واتجاهه ومحصلة عزم الحيود المحوري واتجاهه أقصى قيمة للضغط وذلك لعدة قيم لدرجة الحيود DM وزاوية الحيود α ونسبة اللاتمرکز ε_0 [10] ، ومن البحوث المقدمة في هذا المجال ايضا هي دراسة نظرية اهتمت بتوضيح المتغيرات المؤثرة على معاملي الصلابة والتخميد وسلوكية تغيرهما في كرسى تحميل غازي هيدروستاتيكي ذي مسامات وتأثير نموذج اهتزازي على محور الدوران [11] ، ومن البحوث التي اهتمت بدراسة التحميل الديناميكي على كراسي التحميل هو بحث اهتم بدراسة المحال الهندسي لمركز كرسى تحميل (Big-End Bearing) موجود داخل محرك احتراق داخلي من نوع (Ruston-Hornsby) ويتم الحصول على ضغط غشاء المائع بحل معادلات نيفير - ستوك (Navier- stokes) باستخدام طريقة العناصر المحددة وتطبيق تقنية (Galerkin) [12] ، وهناك بعض البحوث اهتمت باستخدام طريقة المحاكاة (Computer Simulation) لتحليل الستاتيكية والديناميكية لكرسى تحميل غازي (هواء) هيدروستاتيكي وذلك لعدة اشكال وابعاد لمنفذ تجهيز الضغط (Pocket-Orifice) والاخذ بنظر الاعتبار تأثيرات سرعة الدوران ، الاهتزاز الحاصل وتدفق الهواء المجهز وتم ذلك باستخدام طريقة العناصر المحددة لحل معادلة رينولدز المطورة التي تتضمن تغير الضغط مع الزمن [13] .

في هذا البحث تم اجراء تحليل نظري لكرسى تحميل غازي (هواء) هيدروديناميكي لدراسة تأثير درجة الحرارة مع وجود الحيود المحوري وتغير اللزوجة مع درجة الحرارة وتحت تأثير حمل ديناميكي متغير في القيمة والاتجاه .

2. التحليل النظري

تعد معادلة رينولدز واحدة من الاسس الرئيسية لدراسة التزييت الغازي في المساند الهيدروديناميكية لأيجاد توزيع ضغط في سمك غشاء الهواء ولحالة الاستقرار (Steady State) [10] ، اما في حالة التحميل الديناميكي فيتم اعتماد معادلة رينولدز المطورة التي تأخذ بنظر الاعتبار حالة اللا استقرار (سمك غشاء المائع متغير مع الزمن) و للتزييت الغازي مع الاخذ بنظر الاعتبار تغير اللزوجة مع درجة الحرارة ، وهي كالآتي :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6R\omega \frac{\partial}{\partial x} (\rho h) + 12 \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) L \quad (1)$$

بتطبيق الإحداثيات الاسطوانية (r , θ and z) وتعويض الصيغ اللابعدية للمتغيرات نحصل على معادلة رينولدز اللابعدية بالشكل الآتي :

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\Gamma H^3}{\lambda} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \left(\frac{r}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\Gamma H^3}{\lambda} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 12\pi \frac{\partial (\Gamma H)}{\partial \theta} + 24\pi \frac{\partial (\Gamma H)}{\partial t} L \quad (2)$$

$$\Gamma = \frac{\Lambda}{12\pi} \frac{P}{K} L \quad (3)$$

اما معادلة كثافة الهواء فنحصل عليها باستخدام المعادلة العامة للغازات [2] وهي كالآتي :

$$\lambda = \frac{408.4}{110.4 + 298} \frac{(K)^{1.5}}{K} L \quad (4)$$

وتغير اللزوجة مع درجة الحرارة نحصل عليه من المصدر [3] بالشكل الآتي :

وبما ان الشبكة العقدية تمثل سطح اسطوانة منبسطة فان

$$p(\theta, z) = p(\theta + 2\pi, z)$$

$$k(\theta, z) = k(\theta + 2\pi, z)$$

وكما مبين في الشبكة العقدية في الشكل (1)

3. تحليل الشكل الهندسي لكرسي التحميل

يحصل الحيود المحوري ضمن خلوص صغير (5) $\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{z}{L} \cos \theta_0 \sin \theta_0$ بسبب تعرض المحور الى حمل خارجي كما مبين في الشكل (2) .
وان المعادلة التي تصف سمك الغشاء بالصيغة اللابعدية هي كالآتي

و (6) $e = e_{\max} \left[1 - \alpha \left(\frac{z}{L} \right)^2 \right]$ $\alpha = \frac{e_{\max}}{L^2}$ e_{\max} α (α) (e_0) وذلك باستخدام المعادلة الانية

ان العوامل الرئيسية التي تعرف الحيود المحوري هي (7) $(\frac{e}{L})$ ويتم DM e_{\max} DM (DM) (DM) كالآتي

4. التحليل العددي

بتطبيق الصياغة العددية لمعادلة رينولدز باستخدام طريقة الفروق المحددة (finite difference) لحساب توزيع الضغط في غشاء الهواء المتمثل بالشبكة العقدية المبينة في الشكل (1) .

وباستخدام (central difference) وبتعويض الصيغ العددية في معادلة رينولدز ثم

اما الظروف الحدية فيتطلب قيمتي الضغط ودرجة الحرارة عند نهايتي الجلبة وهما كالآتي:

$$\text{At } z = -L/2 \quad p = p_a \quad Kp_a \quad k = 25^\circ C$$

$$\text{At } z = L/2 \quad p = p_a \quad Kp_a \quad k = 25^\circ C$$

المعقد لاي زاوية دوران ولاي سرعة ولاي توزيع لدرجة الحرارة .

3 - حساب الضغط والكثافة لكل عقدة في شبكة المائع نسبة الى موقع العقدة في الشبكة ثنائية البعد وكذلك نسبة الى الاحداثيين (θ, Z) الثابتين لحالة كرسي تحميل في وضع اللاحيود والحيود المحوري وكذلك لحالة دوران الموقع الثابت والتحميل الديناميكي ولأي توزيع لدرجة الحرارة.

4 - حساب سعة استيعاب الحمل وزاوية المتجه او الوضع مع المركبات القطرية والمماسية والمركبات في الاتجاهين (x,y) .

5 - حساب عزوم الحيوود المحوري قيمة واتجاهها وللمركبات الاربعة ايضاً .

6 - يستطيع البرنامج ان يحسب خواص كرسي التحميل لاي نسبة لـ (L/D) .

7 - حساب اللاتمركزيات وزوايا السقوط وسرع الانضغاط القطري والتدويم لكل المستويات على طول كرسي التحميل في وضع الحيوود المحوري .

8- مقارنة سعة استيعاب الحمل المستحصل مع الحمل الخارجي لأي زاوية دوران لعمود الدوران وبدقة عالية .

6 . حساب المتغيرات الأساسية لكرسي تحميل في وضع حيود محوري

6 . 1 . سعة استيعاب الحمل

(load - carrying capacity)

لقد تم حساب الحمل بمركبتين الأولى قطرية (WR) والثانية مماسية (WT) ، اذ ان [8]

$$F_R = -\frac{1}{2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{Z=-1/2}^{1/2} P \cos \theta dZ d\theta \quad (8)$$

$$F_T = \frac{1}{2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{Z=-1/2}^{1/2} P \sin \theta dZ d\theta \quad (9)$$

$$F = \sqrt{F_T^2 + F_R^2} = \frac{6\pi W}{\Lambda p_a R L} L \quad (10)$$

اعادة ترتيب حدود المعادلة ليتم الحصول على الصيغة العددية لتوزيع الضغط بالشكل الاتي :

$$P_{i,j} = C_0 + C_1 P_{i+1,j} + C_2 P_{i-1,j} + C_3 P_{i,j+1} + C_4 P_{i,j-1}$$

اذ ان (i = 1,2, 3,...,m & j = 1,2,3,...,n-1) والتي تشير الى مواقع العقد في شبكة الفروق المحددة والمقابلة للاحداثيات (θ, Z) ، والمعاملات C_{0,1,2,...,4} تمثل بقية حدود معادلة رينولز بالصيغة العددية اللابعدية .

اما الظروف الحدية وبالصيغة اللابعدية المطلوبة لايجاد توزيع الضغط المبين في الصيغة العددية اعلاه ستكون

$$\text{at } Z = -1/2 \quad P = 12 \pi / \Lambda \quad k = 1$$

$$t \quad Z = 1/2 \quad P = 12 \pi / \Lambda \quad k = 1$$

كذلك فان

$$P(\theta, 1/2) = P(\theta + 2\pi, 1/2)$$

$$K(\theta, -1/2) = K(\theta + 2\pi, -1/2)$$

أي ان

$$P_{i,1} = P_{i,n} = 12 \pi / \Lambda, \quad P_{1,j} = P_{m,j}$$

5 . برنامج الحاسوب

تم تكوين برنامج فاعل يعتمد على التحليل النظري المقدم أعلاه يقوم بحساب كافة المتغيرات المتعلقة بكرسي التحميل ، وعليه يقوم البرنامج بالاتي :

1 - حل معادلة رينولز بالاتجاهين المحيطي والمحوري لكرسي التحميل في وضع حيود ولا حيود محوري باستخدام تقنية الفروق المحددة ذات المسافات البينية المتساوية الطول .

2 - امكانية تحليل اداء كرسي التحميل لحالة موقع الدوران الثابت ولحالة التحميل الديناميكي

6 . 3 . حساب السرعة الانضغاطية القطرية والتدويمية

تم موازنة القوى الخارجية بالقوى المتولدة في الغشاء الغازي ، لذلك نحصل من موازنة القوى بالاتجاهين القطري (R) والمماسي (T) على معادلتين الموازنة بالشكل الاتي [12]

$$S_1 + S_2 + S_3 + F_R = 0L \quad (22)$$

$$S_4 + S_5 + S_6 - F_T = 0L \quad (23)$$

بإعادة كتابة المعادلتين (22) و (23) نحصل على الاتي

$$F_R = -S_1 - S_2 - S_3 \quad (24)$$

$$F_T = S_4 + S_5 + S_6 \quad (25)$$

بتربيع وجمع المعادلتين (24) و (25) نحصل على الاتي

$$F^2 = (-S_1 - S_2 - S_3)^2 + (S_4 + S_5 + S_6)^2 \quad (26)$$

من المعادلة (26) يمكن الحصول على معادلة سرعة الانضغاط التدويمية بالشكل الاتي

$$\beta = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (27)$$

اذ ان

$$a = S_3^2 + S_6^2$$

$$b = 2(S_1S_3 + S_4S_6 + (S_2S_3 + S_5S_6))$$

$$c = S_1^2 + S_4^2 + (S_2^2 + S_5^2) + 2(S_1S_2 + S_4S_5) - F_{ex}^2$$

يتم من الخطوات الاتية استخراج قيم ، اللاتمرکز ، زاوية السقوط ، السرعة

كذلك فان زاوية الوضع او المتجه (Attitude) تكون [8]

ومن المركبتين (F_T) و (F_R) يمكن إيجاد المركبتين بالاتجاهين (x) و (y) [14]

$$F_x = F_R \sin \beta_o + F_T \cos \beta_o \dots (12)$$

$$F_y = F_R \cos \beta_o - F_T \sin \beta_o \dots (13)$$

وبذلك تكون زاوية الحمل المقاسة من متجه الحمل الى الاحداثي (y) هي

$$\varphi_L = \tan^{-1} \frac{F_y}{F_x} \quad (14)$$

6 . 2 . عزم الحيود المحوري (Misalignment moment)

كما في الحمل فان هناك مركبتان للعزم ومحصلتهما [10] هي

$$M_R = -\frac{1}{2} \int_{\theta=0}^{2\pi} d\theta \int_{Z=-1/2}^{1/2} PZ \cos \theta dZ \quad (15)$$

$$M_T = \frac{1}{2} \int_{\theta=0}^{2\pi} d\theta \int_{Z=-1/2}^{1/2} PZ \sin \theta dZ \quad (16)$$

$$M = \sqrt{M_T^2 + M_R^2} = \frac{6\pi M^*}{\Delta p_a R L} \quad (17)$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{M_T}{M_R} \quad (18)$$

ان الزاوية بين محصلة عزم الحيود وخط المراكز هي

اما المركبتين بالاتجاهين (x) و (y) فهما

$$M_x = M_R \sin \beta_o + M_T \cos \beta_o \dots (19)$$

$$M_y = M_R \cos \beta_o - M_T \sin \beta_o \dots (20)$$

وان الزاوية بين محصلة عزم الحيود المحوري والاحداثي (y) هي

$$\psi_M = \tan^{-1} \frac{M_y}{M_x} \quad (21)$$

الانضغاطية والسرعة التدويمية للمستوي
الوسطي [15] .

الخطوة (1) :

للبدء بعملية الحساب سوف تكون القيم
الابتدائية لـ (ϵ_o, β_o) هي [15] :

$$\epsilon_{o1} = \epsilon_{os} + \delta\epsilon \dots (28)$$

$$\beta_{o1} = \beta_{os} + \delta\beta \dots (29)$$

اذ ان $(\epsilon_{os}, \beta_{os})$ هما نسبة اللاتمرکز
وزاوية السقوط للمستوي الوسطي وحالة
دوران الموقع الثابت وان $\delta\epsilon$ و $\delta\beta$ هما قيم
صغيرة مضافة للمعادلتين اعلاه ، يتم استخدام
 (ϵ_{o1}) و (β_{o1}) لحل معادلات الفروق المحددة
لحساب توزيع الضغط والكثافة ، يتم تعويض
السرع الانضغاطية القطرية والتدويمية
للمستوي الوسطي (ϵ_o, β_o) بصفر ، وبذلك
يمكن حساب قيمتي (S_1, S_4) بعد تعويض
قيمتي (F_T, F_R) المستحصلة من هذه الخطوة
في المعادلتين (22) ، (23) .

الخطوة (2)

حل معادلات الفروق المحددة باستخدام
 $(\epsilon_{o1}, \beta_{o1}, \epsilon_{o1}=0, \beta_{o1})$ وقيمة (ϵ_o, β_o)
الناتجة من المعادلتين الاتيتين :

$$\epsilon_{o1} = \frac{\epsilon_{o1} - \epsilon_{os}}{\Delta t} L \quad (30)$$

$$\beta_o = \frac{\Gamma_1 - \Gamma_s}{\Delta t} L \quad (31)$$

وبتعويض قيمتي (ϵ_o, β_o) لهذه الخطوة
و قيمتي (F_T, F_R) المستحصلة من هذه
الخطوة مع قيمتي (S_1, S_4) المحسوبة من
الخطوة (1) مع قيمتي $(S_6=S_3=0)$ في
المعادلتين (22) ، (23) نحصل على قيمتي
 (S_5, S_2) .

الخطوة (3) :

حل معادلات الفروق المحددة باستخدام
 $(\epsilon_{o1}, \beta_{o1}, \epsilon_{o1}=0, \beta_{o1})$ وقيمة (ϵ_o, β_o)
الناتجة من المعادلة الاتية :

وبتعويض قيمتي $(\epsilon_{o1}, \beta_{o1})$ لهذه
الخطوة و قيمتي (F_T, F_R) المستحصلة من
هذه الخطوة مع قيمتي (S_1, S_4) المحسوبة من
الخطوة (1) مع قيمتي (S_2, S_5) المحسوبة من
الخطوة (2) في المعادلتين (22) ، (23) نحصل
على قيمتي (S_3, S_6) .

الخطوة (4) :

تعويض قيم $(\epsilon_{o1}, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6)$
(
وقيمة (F) للحمل الخارجي في المعادلة (27) ،
لحساب قيمة (ϵ_{o1}) .

الخطوة (5) :

حل معادلات الفروق المحددة بتعويض
 $(\epsilon_{o1}, \beta_{o1}, \epsilon_{o1}, \beta_{o1})$ المستحصلة من
الخطوة (4) ومقارنة سعة استيعاب الحمل
الناتج مع قيمة الحمل الخارجي . و يتم زيادة
او تقليل (ϵ_{o1}) بقيمة صغيرة بعد ذلك يتم
اعادة كل الخطوات حتى تحقيق الدقة الاتية :

الخطوة (6) :

يتم الحصول على قيمة (β_{o1}) عند زاوية
متجه الحمل الخارجي (ξ) من اجراء الاتي :

حل المعادلتين (12) و (13) بشكل آني
 $\cos \beta = \frac{F_T F_{xex} - F_R F_{yex}}{F_{ex}^2}$ (32) تمثل
المجهول الثاني (فيتم الحصول على الاتي :

$$\cos \beta = \frac{F_T F_{xex} + F_R F_{yex}}{F_{ex}^2} L \quad (34)$$

$$F_{xex} = F_{ex} \sin \xi L \quad (35)$$

$$F_{yex} = F_{ex} \cos \xi L \quad (36)$$

لغرض تحقيق الدقة تعاد الخطوات من (1) الى (5) باستخدام القيم المصححة $(\beta_{o2}^C, \varepsilon_{o2}^C)$ لأيجاد $(\beta_{o2}, \varepsilon_{o2})$.

الخطوة (8) :

عند وصول خطوات الـ (Marching) الى نهاية النقطة الثانية ، يمكن تخمين النقطة الثالثة باستخدام صيغة (Modified Euler - Cauchy Prediction) وكما يأتي :

$$\varepsilon_{o3}^P = \varepsilon_{o1} + 2\Delta t \varepsilon_{o2}^L \quad (43)$$

$$\beta_{o3}^P = \beta_{o1} + 2\Delta t \beta_{o2}^L \quad (44)$$

$$\varepsilon_{o3}^P = \varepsilon_{o1} + 2\Delta t \varepsilon_{o2}^L \quad (45)$$

$$\beta_{o3}^P = \beta_{o1} + 2\Delta t \beta_{o2}^L \quad (46)$$

تحل معادلات النظام باستخدام قيم (0) وتعاد كل الخطوات وكما تم مناقشته في الخطوة (6) ومن الجدير بالذكر ان قيم $(\beta_{o2}, \varepsilon_{o2})$ في اي مستوي على طول كرسي التحميل تحسب بدلالة قيم المستوي الوسطي .

7 . النتائج والمناقشة

بهدف دراسة وتحليل تأثير درجة الحرارة على الخواص الترابولوجية ، فقد تم تبني قيم مختلفة لدرجة حرارة الهواء وكذلك توزيعات مختلفة لدرجة الحرارة بدلالة المحوران الطولي والمحيطي .

كما تم دراسة تأثير درجة الحرارة بوجود التحميل الديناميكي على كرسي التحميل ولموقع زاوية محددة لعمود الدوران . وقد تم تبني قيمة الحمل الديناميكي واتجاهه بحيث يتوافق مع مواصفات كرسي التحميل ، وقد تم استخدام كرسي تحميل في وضع حيود محوري بالمواصفات المبينة في الجدول (1) .

لذلك يمكن حساب قيمة (β) من المعادلة (33) او (34) عند قيمتي (F_T, F_R) المحسوبة من الخطوة (5) وقيمتي (ε, F_{ex}) للحمل الخارجي .

الخطوة (7) :

يتم استخدام خطوات Euler-Cauchy time marching (scheme) للحصول على قيم السرعة الانضغاطية القطرية والتدويمية وذلك للنقطة الاولى ، اما النقطة الثانية فيتم تخمين القيم $(\beta_{o2}, \varepsilon_{o2})$ عند نهاية الوقت المعني ، اذ يمكن توضيحها بصيغة اويلر (Euler's Formula) كما يأتي :

$$\varepsilon_{o2}^P = \varepsilon_{o1} + \Delta t \varepsilon_{o1}^L \quad (37)$$

$$\beta_{o2}^P = \beta_{o1} + \Delta t \beta_{o1}^L \quad (38)$$

ان القيم المتوقعة للنقطة التالية () تستخدم لحل معادلات الفروق المحددة كما في الخطوة (1) . وتعاد نفس الخطوات من (2) الى نهاية الخطوة (4) ، وعند نهاية الخطوة (4) يتم حساب قيمتي $(\beta_{o2}, \varepsilon_{o2})$ ، وكذلك فان قيم التعجيل يمكن حسابها باستخدام نفس الصيغة السابقة وكالاتي :

$$\varepsilon_{o2} = \frac{\varepsilon_{o2}^P - \varepsilon_{o1}^L}{\Delta t} \quad (39)$$

$$\beta_{o2} = \frac{\beta_{o2}^P - \beta_{o1}^L}{\Delta t} \quad (40)$$

وبعدها يتم تصحيح قيم $(\beta_{o2}^P, \varepsilon_{o2}^P)$ باستخدام صيغة (Euler-Cauchy's modified corrector) وكما يأتي :

$$\varepsilon_{o2}^C = \varepsilon_{o1} + \frac{1}{2} \Delta t (\varepsilon_{o2}^P + \varepsilon_{o1}^L) \quad (41)$$

$$\varepsilon_{o2}^C = \varepsilon_{o1} + \frac{1}{2} \Delta t (\varepsilon_{o2}^P + \varepsilon_{o1}^L) \quad (42)$$

7 . 1 . تأثير درجة الحرارة ودرجة الحيود المحوري على الخصائص الترابيولوجية

تم دراسة تأثير درجة الحرارة بوجود التحميل الديناميكي ($F_{ex}=80$) وزاوية حيود محوري ($\alpha=60^\circ$) يمثل الشكلان (3) و (4) علاقة مركبتي عزم الحيود المحوري (M_x) و (M_y) مع درجة الحرارة ولعدة قيم من درجة الحيود المحوري .

اما الشكل (5) فيمثل علاقة قيم الضغط الاقصى مع درجة حرارة غشاء الهواء ولقيم مختلفة لدرجة الحيود المحوري والملاحظ من هذه العلاقة انه في درجات الحيود العالية فان قيم الضغط تتناقص كلما تزداد درجة الحرارة ولنفس السبب المذكور اعلاه في علاقة مركبتي عزم الحيود المحوري مع درجة الحيود المحوري وعند درجات الحيود الواطئة وجود تباين بسيط في قيم الضغط الاقصى .

اما الشكل (6) يبين علاقة (H_{min}) مع درجة الحرارة وعند قيم مختلفة لدرجة الحيود المحوري ونجد ان زيادة درجة الحرارة تؤدي الى زيادة سمك الغشاء وبتدرج قليلاً وذلك لان زيادة درجة الحرارة تؤدي الى تناقص قيم الضغط كما ذكرنا اعلاه وتناقص قيم الضغط تعني ان هناك زيادة في سمك الغشاء .

الشكل (7) يمثل علاقة بين زاوية السقوط ودرجة حرارة الغشاء ونلاحظ ان الزاوية تتناقص كلما ارتفعت درجة الحرارة وهذا يعني ان موقع الضغط الاقصى يتغير مع تغير درجة الحرارة مما يؤدي الى تغير اتجاه سعة استيعاب الحمل وبالتالي تغير قيمة زاوية السقوط ، اما الشكل (8) يمثل علاقة بين السرعة الانضغاطية الترددية ودرجة الحرارة ولدرجات مختلفة من درجة الحيود المحوري ونجد تناقص السرعة كلما زادت درجة الحرارة وقد يعود السبب في ذلك الى تأثير هذه السرعة بقيم الضغط .

يوضح الجدول (2) النتائج المستحصلة لسعة استيعاب الحمل ومركباته وزاويته الوضع والحمل وعزم الحيود المحوري ومركباته لقيم مختلفة من درجات الحيود ودرجات الحرارة لحالة التحميل الديناميكي ($F_{ex}=80$) وزاوية حيود محوري ($\alpha=60^\circ$) .

7 . 2 . تأثير درجة الحرارة ودرجة الحيود المحوري على توزيع الضغط

يوضح الشكلان (9) و (10) ان في حالة التحميل الديناميكي نقصان شدة التحذب كلما ارتفعت درجة الحرارة وهذا واضح من ملاحظة انخفاض قيمة الضغط الاقصى (الذي يمثل قمة التحذب) وكذلك انخفاض قيم الضغط للعقد الشبكية المجاورة القريبة من عقدة الضغط الاقصى ، وكلما زاد الابتعاد عن عقدة الضغط الاقصى يلاحظ زيادة قليلة نسبياً لقيمة الضغط كلما ارتفعت درجة الحرارة ، وسبب هذه الظاهرة هو استخدام قيمة محددة لقيمة الحمل الخارجي عند لحظة معينة وزاوية دوران محددة لذلك فان النقصان الحاصل لقيمة الضغط الاقصى وقيم ضغط العقد المجاورة له يقابله زيادة لقيم ضغط العقد الشبكية الابدع عن عقدة الضغط الاقصى ، اما تأثير درجة الحيود المحوري فنلاحظ زيادة شدة التحذب كلما ارتفعت درجة الحيود المحوري وهذا واضح من ملاحظة ارتفاع قيمة الضغط الاقصى وكذلك ارتفاع قيم الضغط للعقد الشبكية المجاورة القريبة من عقدة الضغط الاقصى ، وكلما زاد الابتعاد عن عقدة الضغط الاقصى نلاحظ انخفاضاً قليلاً نسبياً لقيمة الضغط كلما ارتفعت درجة الحيود المحوري وسبب هذه الظاهرة هو نفس السبب المذكور اعلاه ، نلاحظ ان سلوكية توزيع الضغط بتغير درجة الحيود عكس ما هو عليه بتغير درجة الحرارة .

9 . الاستنتاجات

في ضوء البيانات المستخدمة والنتائج المستحصلة يستنتج ما يأتي :

1. ان الضغط الاقصى ينخفض بزيادة درجة الحرارة ويرتفع بزيادة درجة الحيود المحوري .
2. تزداد قيم الضغط بزيادة درجة الحيود المحوري .
3. ان عزم الحيود المحوري يقل بزيادة درجة الحرارة ويزداد بزيادة درجة الحيود المحوري.
4. ان قيمة زاوية السقوط تقل كلما ارتفعت درجة الحرارة , وان زيادة درجة الحيود المحوري تؤدي الى زيادة زاوية السقوط .
5. ان لتوزيع درجة الحرارة وبثبوت الحمل الخارجي تأثيراً واضحاً على شكل توزيع الضغط وعلى قيم الضغط الاقصى لان ارتفاع درجة الحرارة في عقد شبكية معينة يرافقه انخفاض في قيم الضغط عند تلك العقد وترتفع قيم الضغط عند انخفاض درجة الحرارة في عقد اخرى .
6. ان السمك الادنى لغشاء الهواء يزداد كلما ارتفعت درجة الحرارة ويتناقص بزيادة درجة الحيود المحوري .

المصادر

1. ترجمة د. سلوم احمد داوود د. محسن جبر جويج " مبادئ علم التريابولوجيا " , الكلية الهندسية العسكرية , بغداد 1985 , تأليف جون هولنك .
2. Thomas T.H. & Hunt R. " Applied Heat " , Heinemann Education Books Ltd , London 1970 .
3. Robert W.Fox & Alan T.Mcdonald "Introduction to Fluid Mechanics" , 5th Edition, Purdue University 1998 .
4. Paul Dvorak & Todd Zalud & Kathleen Franzinger " Basics of

7 . 3 . ديناميكية عمود الدوران خلال لحظات متعاقبة

لغرض ملاحظة حركة عمود الدوران في لحظات متعاقبة وبفترات زمنية متساوية اثناء فترة زمنية محددة فقد تم تبني اول سلسلة القيم المتعاقبة لقيمة واتجاه الحمل الخارجي المبينة في جدول (3) من اجل الحصول على زاوية السقوط (β_0) واللاتمركز المحوري (ϵ_0) اللذان يحددان موقع مركز العمود اثناء الدوران كما مبين في الجدول (5) .

الشكل (11) يبين كيفية حركة مركز العمود في المستوي الوسطي مع تغير قيمة واتجاه الحمل ، يلاحظ اثناء اللحظتين الاولى والثانية ان العمود منحرف عن المركز باتجاه معاكس لاتجاه الحمل الخارجي تقريباً واثناء اللحظات المتبقية نلاحظ اتجاه الانحراف يأخذ بالاقتراب من اتجاه الحمل الخارجي في اللحظتين الثالثة والرابعة ثم يبتعد في اللحظتين الخامسة والسادسة وسبب هذه الظاهرة يعود الى الحالة الديناميكية للحمل الخارجي ، ففي حالة التحميل الديناميكي لاي منظومة ميكانيكية تتولد فيها قوى داخلية متغيرة من جراء الحمل الخارجي المتغير يلاحظ اتجاه الحمل الخارجي يكون متقارباً مع اتجاه محصلة القوى الداخلية للمنظومة اثناء لحظات معينة وعكس ذلك يحصل في لحظات أخرى .

8 . مقارنة مع بحث آخر

يتضمن المصدر [10] دراسة تحليلية لكرسي تحميل غازي بوضع حيود محوري ولحالة دوران الموقع الثابت (Static Load) ولدرجة حرارة ثابتة لمائع التزييت (هواء) ، وبما ان البحث يشمل حالة التحميل الديناميكي ودرجة حرارة متغيرة تم تشبيتهما هنا لغرض مقارنة النتائج المستحصلة مع نتائج المصدر [10] ، والجدول (4) يبين ذلك .

- Bearing) , Wear ,Vol 40 (1976) , pp (141-153) .
7. Roa N.S. & Majumdar B.C (Dynamic Characteristics of Gas-Lubrication Gxternally Pressurized Porous Bearing with Journal Rotation : I) , Wear , vol 50 (1978) , pp (59-70) .
8. Wadhwa S.S. (Analysis of Externally Pressurized Gas
13. Tojiro Aoyama & Ichiro Inasaki (A Computer Simulation Method for Dynamic & Stability Analysis of Air Bearings) , Wear , vol 126 (1988) , pp (307-319) .
14. Vijayrghavan D. & Misaligned T.G. Journal Bearing Considering Cavitation & Starvation Effect) , Trans ASME . of Tribology , Vol. 112 (1990) , pp (60-67) .
15. Tawfik M.A (The Effect of Misalignment on The Dynamic Performance of Crankshaft Bearing System In a Diesel Engine) , Ph.D Thesis , University of Technology – Baghdad 1996 .
- Design Engineering “ , Penton Media,Inc , U.S.A 2000 .
5. Michael M. Khonsari & E. Richard Booser “Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication “ , U.S.A 2001 .
6. Majumdar B.C (Whirl Instability of Externally Pressurized Gas Lubricated Porous Journal Bearings by an Incremental Finite Element Method) , Wear , vol 69 (1981) , pp (133-141) .
9. Branch H.D (Vibration of Hydrostatic Gas Bearing due to Supply Pressure Oscillation) , Wear , vol 95 (1984) , pp (199-212) .
- Approach) , Wear , vol 114 (1987) , pp (275-293) . 10 Czyzewski.T. & Titus P. (Analysis of an Arbitrarily Misaligned Self-acting Gas Film Journal Bearing of Finite Length) , Wear , vol 114 (1987) , pp (367-379) .
11. Pal D.K & Majumdar B.C (Analysis of Stiffness & Damping Characteristics of Externally Pressurized Gas-lubricated Porous Bearing Under Conical Mode of Vibration) , Wear , vol 118 (1987) , pp (199-216).
12. Sinhasan R.Pal E. & V.singh (Analysis of Big-End bearing a Finite Element

الرموز

الرموز العلوية	الرموز السفلية
p القيمة المتوقعة	i, j مواقع العقد
C(القيمة المصححة	o المستوي الوسطي
	x الاتجاه (x)
	y الاتجاه (y)
	R الاتجاه القطري
	T الاتجاه المماسي
	a الظرف الجوي

الرمز	المصطلح	الوحدة
W	سعة استيعاب الحمل	N
F	سعة استيعاب الحمل اللابعدي $M=6\pi W/\Delta p_a R L$	
y	الاحداثي بالاتجاه العمودي	
Y	الاحداثي اللابعدي بالاتجاه العمودي $Y=y/c$	
z	الاحداثي بالاتجاه المحوري	
Z	الاحداثي اللابعدي بالاتجاه المحوري $Z=z/L$	
x	الاحداثي بالاتجاه المحيطي	
v	الاحداثي الزاوي لكرسي التحميل $v=x/r$	Rad
α	زاوية الحيود الحوري	Rad
ρ	كثافة الهواء	kg/m ³
Γ	كثافة الهواء اللابعدي $\Gamma=\rho/\rho_a$	
μ	لزوجة الهواء	N.s/m ²
λ	لزوجة الهواء اللابعدي $\lambda=\mu/\mu_a$	
β	زاوية السقوط	Rad
$\dot{\beta}$	السرعة التدويمية	Rad/s
ε	نسبة اللاتمرکز $e = \frac{e}{c}$	
$\dot{\varepsilon}$	السرعة الانضغاطية القطرية	1/s
ε_9	نسبة اللاتمرکز لمسقط المراكز $e^i = \frac{e^i}{c}$	
ε_{9max}	أقصى قيمة لـ (ε_9)	
ϕ	زاوية سعة استيعاب الحمل المقاسة من	Rad
ψ	الزاوية بين عزم الحيود وخط المراكز	Rad
ϕ_L	زاوية سعة استيعاب الحمل	Rad
ψ_M	الزاوية بين عزم الحيود والاحداثي (y)	Rad
ξ	الزاوية بين متجه الحمل الخارجي والاحداثي (y)	Degree
Λ	Bearing number $(6\mu\omega/p_a)(r/c)^2$	
ω	السرعة الزاوية لعمود الدوران	rad/s

الرمز	المصطلح	الوحدة
c	الخلوص النصف قطري	mm
D	قطر كرسي التحميل	m
DM	درجة الحيود المحوري	
e	لاتمرکز المحور $e = c-h$	mm
e9	طول مسقط المراكز	mm
h	سمك غشاء الهواء	mm
H	سمك الغشاء اللابعدي $H=h/c$	
k	درجة حرارة غشاء الهواء	K
K	درجة حرارة غشاء الهواء اللابعدي $K=k/k_a$	
L	طول كرسي التحميل	mm
M*	عزم الحيود المحوري	N.m
M	عزم الحيود المحوري اللابعدي $M=6\pi M^*/\Delta p_a R L^2$	
m,n	عدد قطع المسافات البينية	
p	ضغط الهواء	N/m ²
P	ضغط الهواء اللابعدي $P=12\pi p/\Delta p_a$	
R	نصف قطر العمود	mm
t	الزمن	s
T	الزمن اللابعدي $T = \omega t$	

جدول رقم (1) مواصفات كرتسي التحميل

2825rpm	السرعة الدورانية	0.07m	طول كرتسي التحميل
		0.07m	قطر كرتسي التحميل
		20μm	الخلوص
	(37*37)	(m*n)	
	0.0000184 Pa.sec	لزوجة الهواء عند الظرف القياسي الجوي	

جدول رقم (2) يبين نتائج مركبات سعة استيعاب الحمل وعزم الحيود المحوري واتجاهاتهما

k °C	DM	F _T &F _R	φ	M _x &M _y	M _T &M _R	ψ&ψ _M	M
25	0.4	-61.396 51.288	-50.125	0.695 2.577	-2.508 0.911	-70.026 15.099	2.669
	0.8	-62.262 50.233	-51.103	1.618 5.653	-5.530 1.999	-70.125 15.977	5.880
75	0.4	-61.135 51.599	-49.835	0.657 2.553	-2.483 0.884	-70.396 14.438	2.636
	0.8	-62.059 50.484	50.484	1.522 5.556	-5.432 1.918	-70.551 15.321	5.761
125	0.4	-60.925 51.847	-49.602	0.629 2.527	-2.456 0.864	-70.612 13.989	2.604
	0.8	-61.960 50.605	-50.760	1.453 5.463	-5.341 1.853	-70.864 14.895	5.653
175	0.4	-60.807 51.984	-49.472	0.604 2.502	-2.432 0.843	-70.881 13.590	2.574
	0.8	-61.912 50.663	-50.706	1.408 5.372	-5.252 1.806	-71.018 14.687	5.554

جدول رقم (3) سلسلة قيم متتالية من الحمل الديناميكي واتجاهه [13]

T	External load (F)	E.L.angle (ξ°)
0	17.919	201.635
0.1745	11.961	227.615
0.349	10.916	271.26
0.5236	14.815	301.946
0.6981	19.836	316.747
0.8727	24.263	325.182

جدول رقم (4) مقارنة مع نتائج المصدر [8]

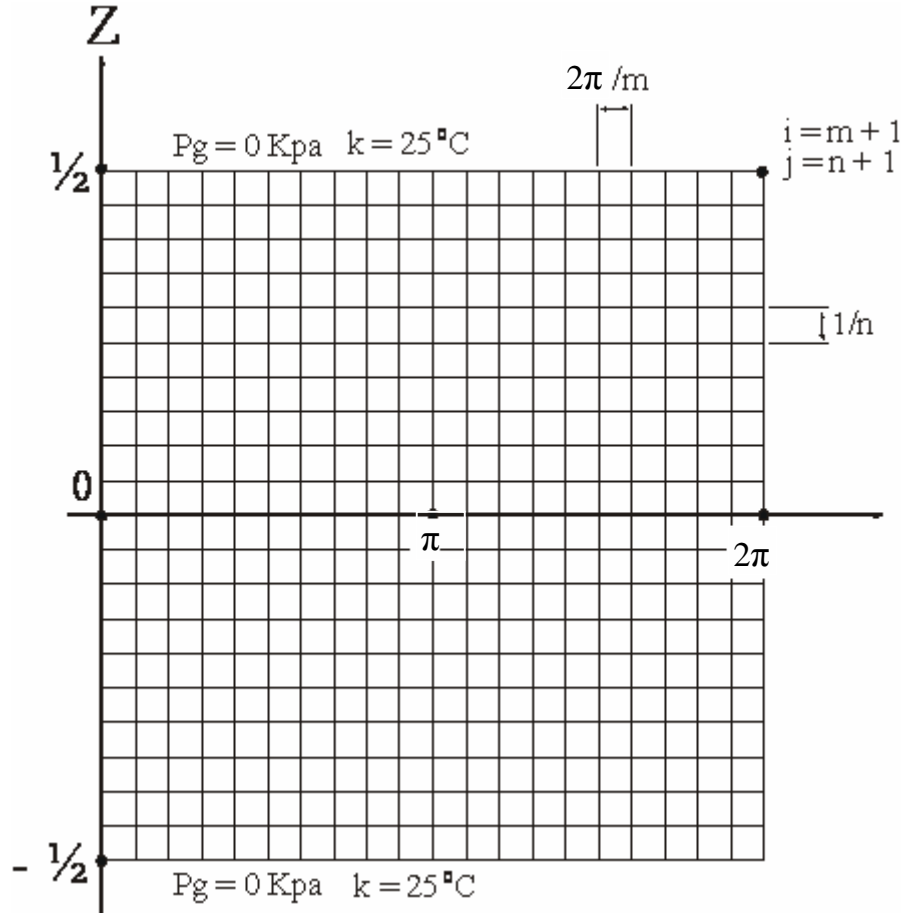
ϵ_0 a -	DM = 0	$\Lambda = 1$	L/D = 1	
	F [8]	F	β	β [8]
0.2	2.66	2.79	72	72.6
0.4	6	6.14	66	65.5
0.6	11.33	11.4	52	51.4
0.8	25.33	25.7	32	29.7

$$b - \alpha = 45^\circ \quad \epsilon_0 = 0.8 \quad \Lambda = 1 \quad L/D = 1$$

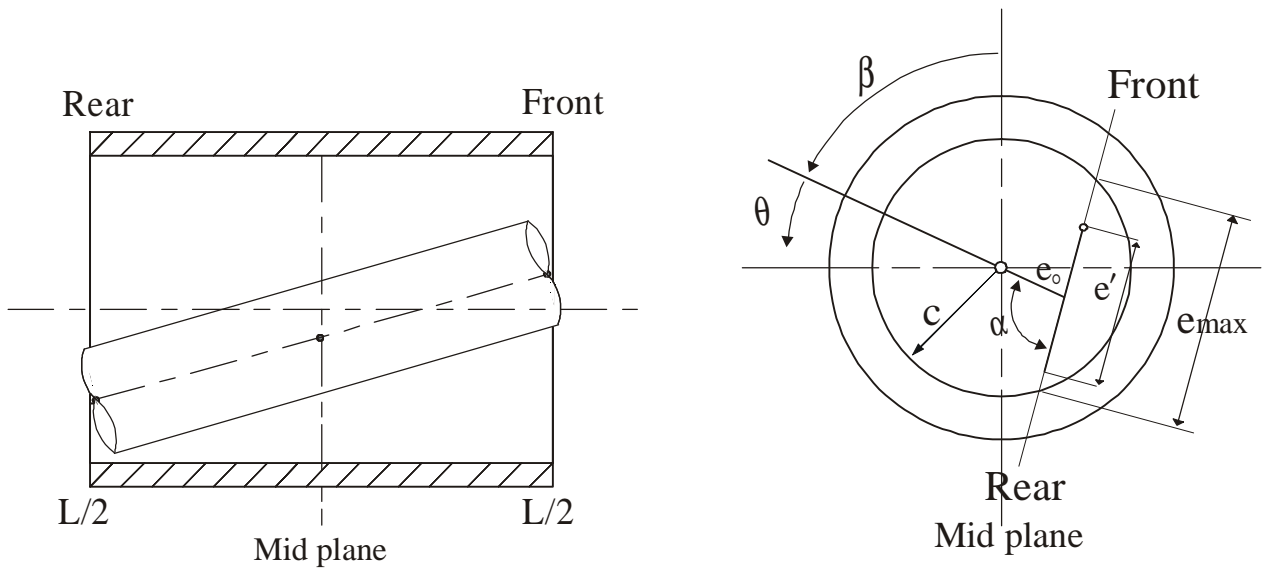
جدول رقم (5) السرعة الانضغاطية والتدويمية عند لحظات متتابعة من الحمل
الديناميكي

DM	P_{\max} [8]	P_{\max}	F [8]	F	β [8]	β
0.2	165	171	25	25.6	31	29.4
0.4	190	191	26	26.54	29	28.3
0.6	240	238.2	27	27.74	27	26.4

No:	T	F	ξ°	β_0°	e μm	α	β
1	0	17.919	201.635	16.845	5.691	0.4357	1.068
2	0.1745	11.961	227.615	18.643	3.956	0.3649	0.697
3	0.3490	10.916	271.26	64.792	3.323	0.3510	0.604
4	0.5236	14.815	301.946	87.501	5.016	0.4004	0.894
5	0.6981	19.836	316.747	96.428	5.989	0.4559	1.165
6	0.8727	24.263	325.182	101.798	6.498	0.4986	1.370



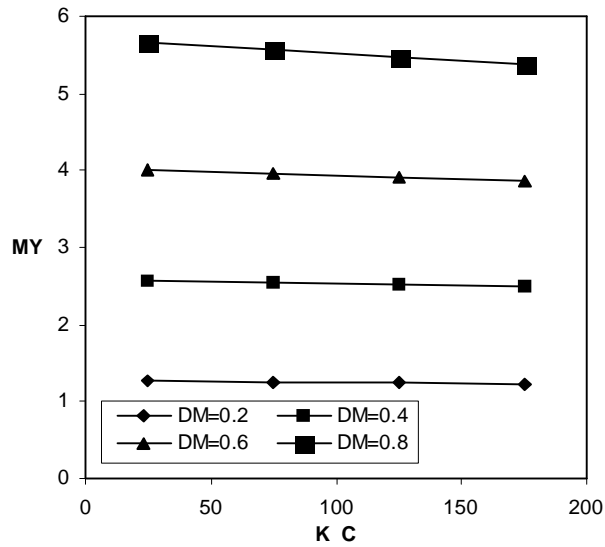
شكل رقم (1) الشبكة العقدية لغشاء الهواء



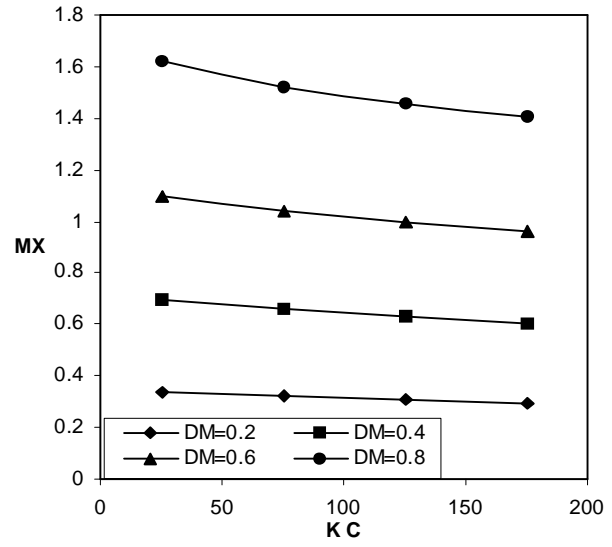
a - قطع على طول الكرسي يبين الحيود المحوري

b - مسقط للمستوي الوسطي يبين الحيود المحوري
المحوري

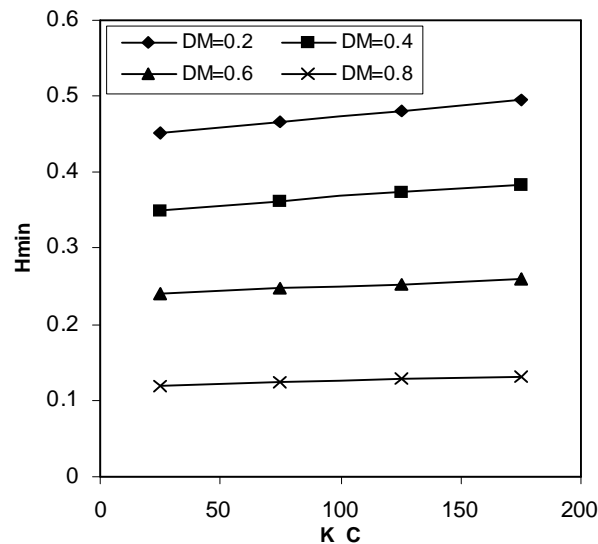
شكل رقم (2) كرسي تحميل محوري في وضع حيود محوري



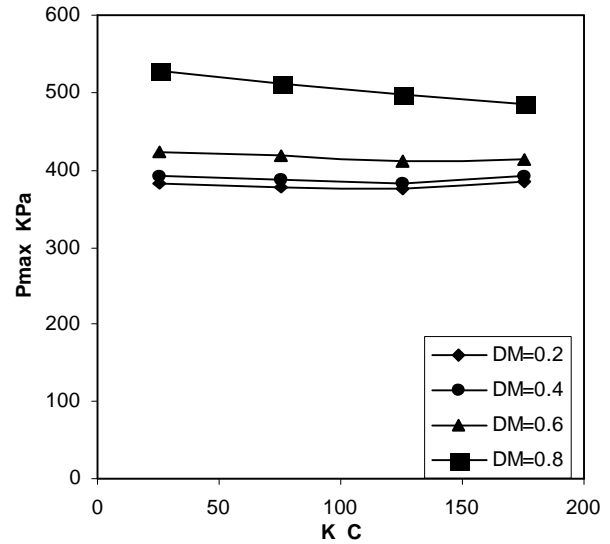
شكل رقم (4)



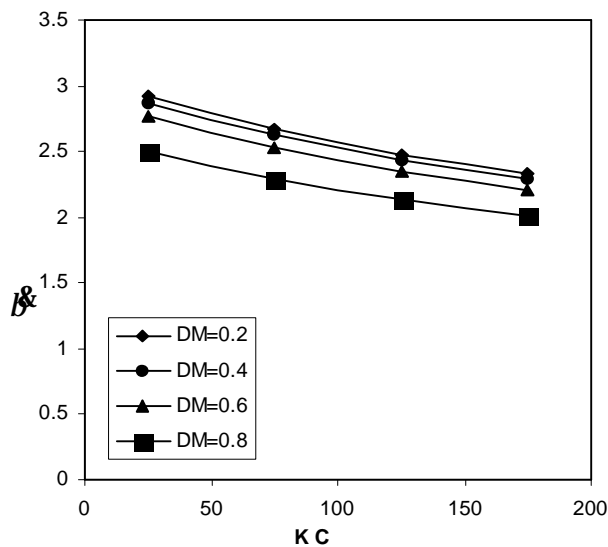
شكل رقم (3)



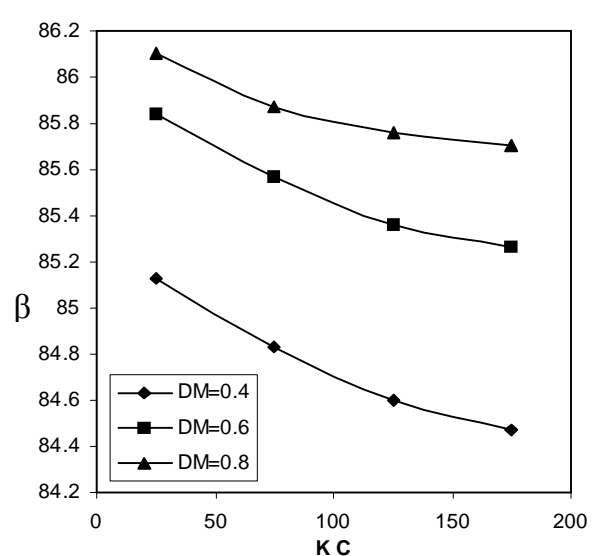
شكل رقم (6)



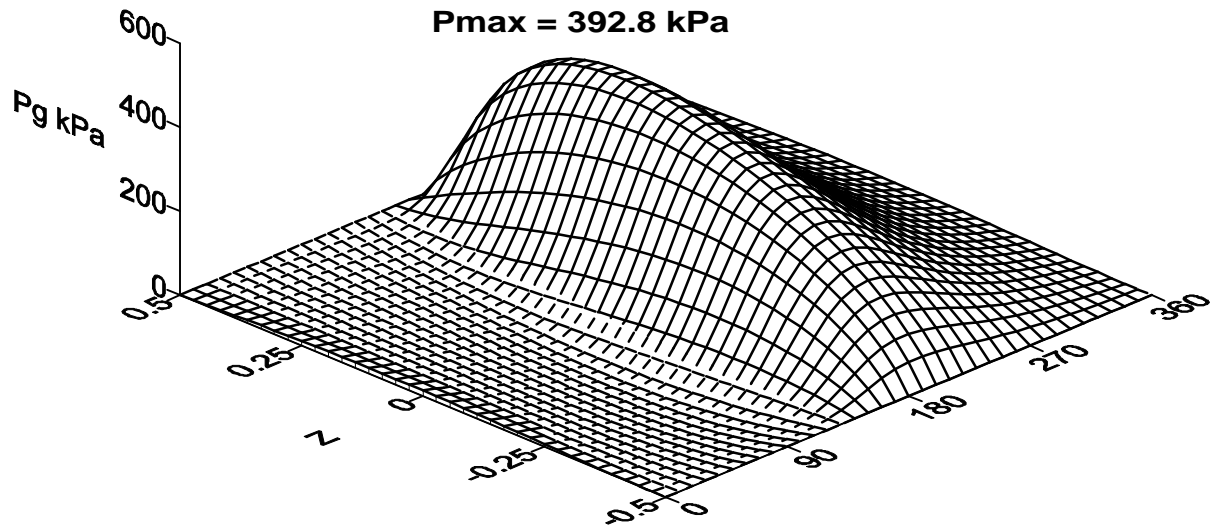
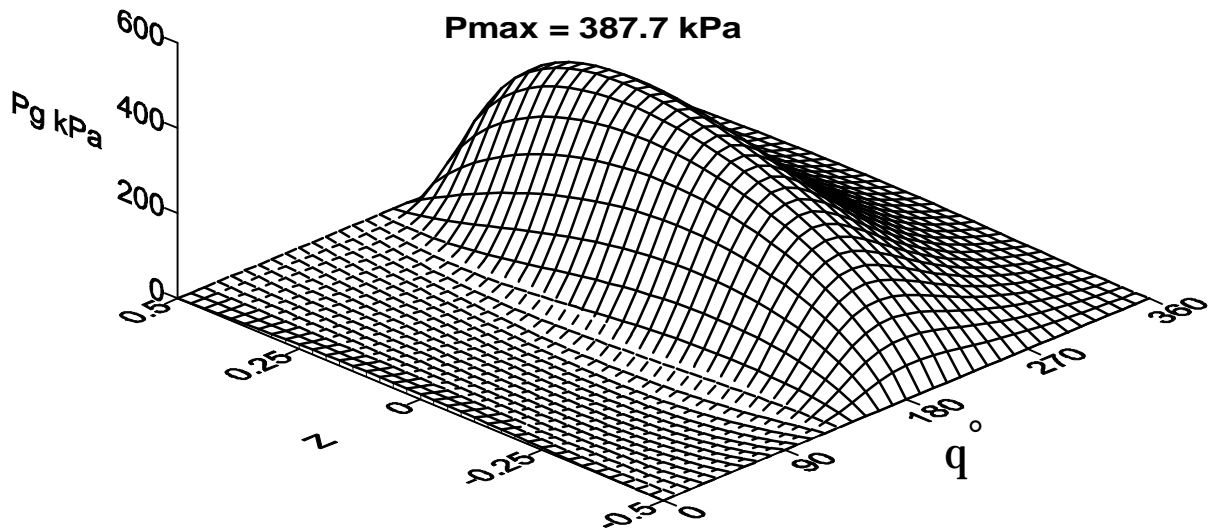
شكل رقم (5)



شكل رقم (8)

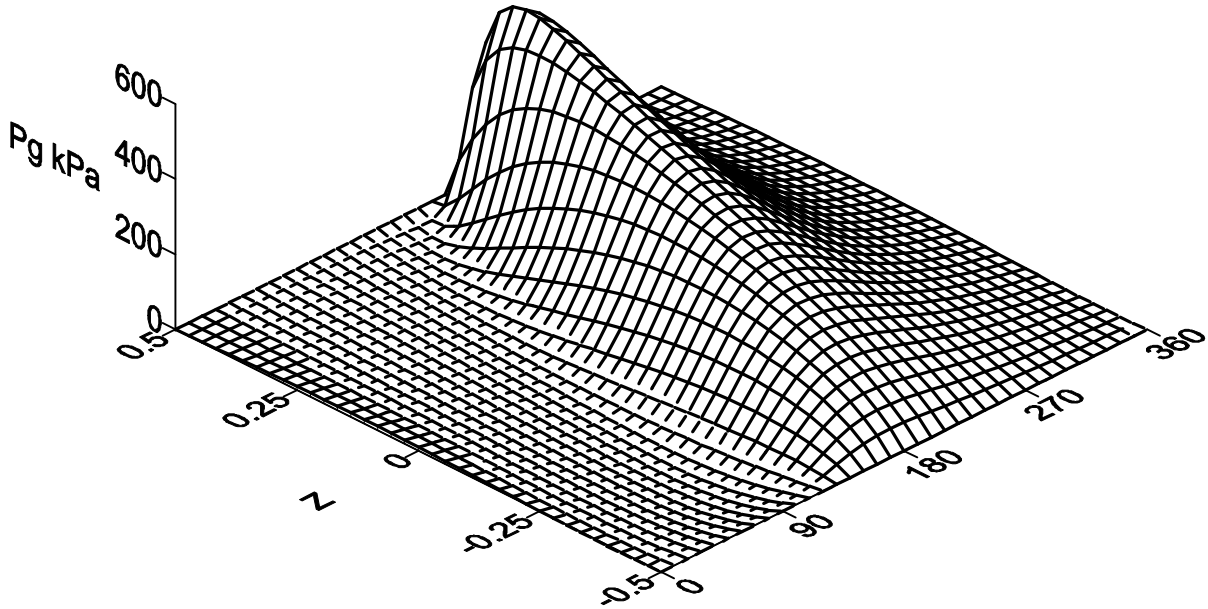


شكل رقم (7)

a - $k = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ b - $k = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$

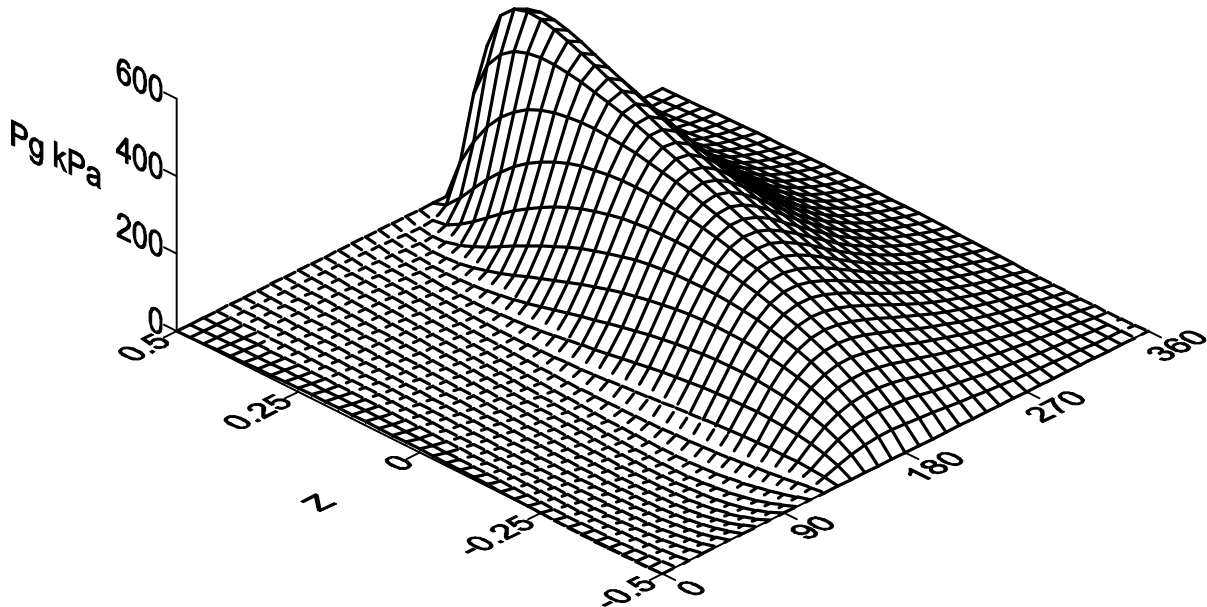
شكل رقم (9) توزيع الضغط داخل كرسي التحميل في حالة تحميل ديناميكي عند
($DM = 0.4$, $a = 60^{\circ}$, $F_{ex} = 80$)

Pmax = 526.9 kPa



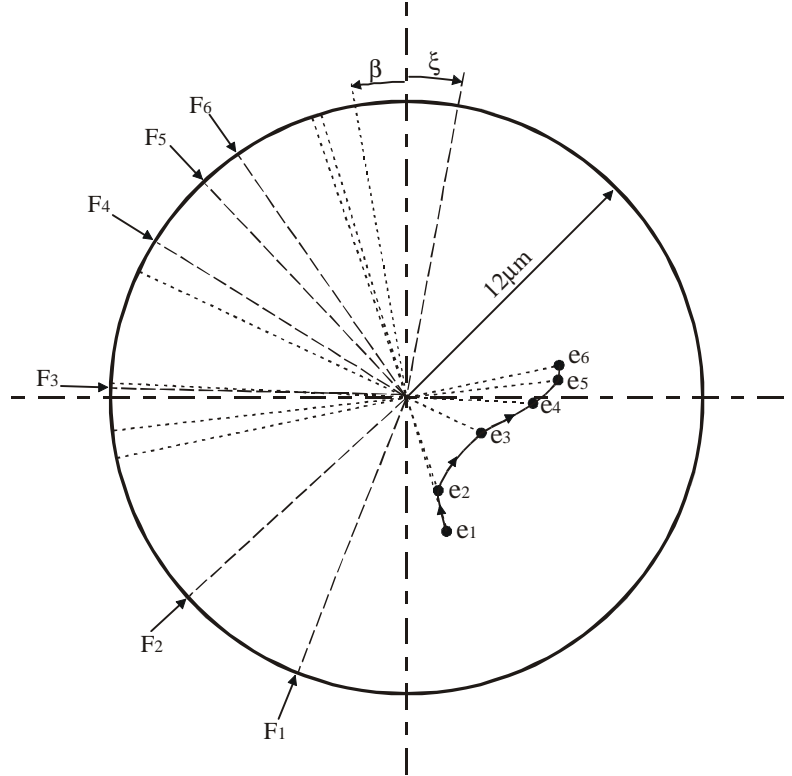
a - $k = 25^\circ\text{C}$

Pmax = 511 kPa



b - $k = 75^\circ\text{C}$

شكل (10) توزيع الضغط داخل كرسي التحميل في حالة تحميل ديناميكي
عند ($DM = 0.8$, $a = 60^\circ$, $F_{ex} = 80$)



شكل (11) جزء دائري مكبر يوضح حركة مركز العمود $DM = 0.4$, $k = 25^\circ C$