

## تحسين وثوقية وفعالية الصمامات مستقيمة التدفق باستخدام الطرق الرقمية

الدكتورة منى اسبر\*

(تاريخ الإيداع 9 / 12 / 2015. قُبل للنشر في 20 / 4 / 2016)

### □ ملخص □

تصف هذه الدراسة تحسين وثوقية وفعالية الصمامات مستقيمة التدفق المستخدمة في الضواغط المكبسية، وذلك عن طريق نمذجة تدفق الغاز وحركة صفيحة الصمام. يُحدد هذا النموذج توزيع ضغط الغاز وتشوهات صفيحة الصمام على أنها صفيحة مرنة.

تمَّ اختبار هذه النمذجة عن طريق قياسات تدفق الغاز الستاتيكي في الصمام بالإضافة إلى القياسات الديناميكية لنهاية حركة صفيحة الصمام في الضاغط الاختباري حيث تمت المقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية المقاسة.

**الكلمات المفتاحية:** تحسين وثوقية، فعالية، الصمامات مستقيمة التدفق.

\* مدرسة - قسم البحرية - كلية الهندسة الكهربائية والميكانيكية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## Improve the reliability and effectiveness of the straight flow valves Using numerical methods

Dr. Mouna Esber\*

(Received 9 / 12 / 2015. Accepted 20 / 4 / 2016)

### □ ABSTRACT □

This study describes the improvement of the reliability and effectiveness of the straight flow used in piston compressors, valves, and by modeling the flow of gas and the movement of plate valve. This model distributes the gas pressure and distortions plate valve as a flexible plate to be determined.

This modeling test gas flow through the valve in the static measurements in addition to dynamic measurements of the end plate valve movement in the compressor has checksum where the comparison between numerical results and experimental results measured.

**Keywords:** improve the reliability, efficiency, flow valves straight .

---

\*Assistant Professor, Marine Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

## مقدمة:

من المعروف أن عناصر توزيع الغازات - الصمامات مستقيمة التدفق تظهر أثراً ملموساً على فعالية عمل الضواغط المكبسية وبالتالي على وثوقيتها واقتصاديتها. إن معظم الضواغط المكبسية ذات التدفق المرتفع والمستخدمة في الوقت الحاضر تُجهز بصمامات مستقيمة التدفق. تتميز هذه الصمامات بمساحة تدفق وفعالية عالية وذلك بالمقارنة مع الأنواع الأخرى من الصمامات، كما أنها تعمل بمفايد منخفضة نسبياً عند السرعات العالية لدوران عمود المرفق. لكن بنفس الوقت تُعتبر وثوقيتها غير كافية بتأثير الإجهاد، حيث تمتلك هذه الصمامات العديد من السلبيات مثل انحرافها للعمل في النظام المتذبذب (الررفة). يوضح ذلك من خلال توضع الصفيحة بشكل مواز لتدفق الغاز، التأثير المتبادل بين الصفيحة والتدفق، تناقص عامل الضغط المحسوب بسرعة عند اقتراب الصفيحة من المحدد، حيث يتناقص عامل الضغط إلى الصفر في حال اقتراب مساحة المرور في الثقب من مساحة المرور في المقعد [1]. كما تُعتبر هذه الصمامات منخفضة الإحكام وصعبة البناء والصناعة [2، 3].

يوجد الكثير من الأعمال العلمية البحثية في هذا المجال [4، 5، 6، 7، 8، 9]. إن تحليل منشورات هؤلاء الباحثين سمح لنا بتكوين هدف مسألتنا هذه، حيث يُعتبر تحسين الوثوقية والفعالية عملاً لم يكن بالإمكان دون المزيد من طرق النمذجة الصحيحة التي تسمح بتحديد بارامترات الغاز في قناة التدفق الخاصة بالصمام، وتستطيع تمثيل صفيحة الصمام كنظام له أكثر من درجة حرية.

## أهمية البحث وأهدافه:

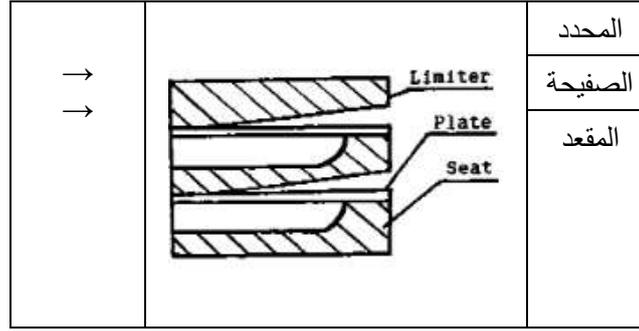
إن الهدف من البحث هو تحسين وثوقية وفعالية الصمامات مستقيمة التدفق عن طريق إيجاد طريقة دقيقة لحساب حركة صفيحة الصمامات مستقيمة التدفق، وذلك باعتبار صفيحة الصمام كنظام له عدة درجات حرية وتحديد بارامترات الغاز في قناة التدفق الخاصة بالصمام.

من أجل حل المسألة تم وضع المقترحات التالية:

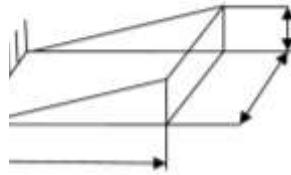
- 1 استخدام طريقة التفاضل لحل المعادلات التفاضلية الجزئية، ووضع طريقة دقيقة لحساب حركة صفيحة الصمام مستقيم التدفق باعتبارها كنظام له أكثر من درجة حرية وتحديد بارامترات الغاز في قناة التدفق للصمام.
- 2 تشكيل الموديل الرياضي المطابق ودراسة المخطط اللوغاريتمي وبرمجة الموديل المستخدم للتحقق.
- 3 يتم الحصول على الخواص الستاتيكية بطريقة الكبح للصمامات بالتدفق المستعر (الستاتيكي) للهواء.
- 4 استخدام النتائج التجريبية للتحقق من مصداقية النموذج الرياضي.

## طرائق البحث ومواده:

يُبين الشكل (1) مقطعاً عرضياً في الصمام مستقيم التدفق، بينما يبين الشكل (2) صفيحة الصمام.



الشكل (1): مقطع عرضي في الصمام مستقيم التدفق.



L

الشكل (2): صفحة الصمام المستقيم التدفق.

من أجل تشكيل النموذج الرياضي تمّ استخدام الفرضيات التالية:

- 1 توزيع ضغط الغاز في قناة الصمام أحادي البعد.
- 2 يُعتبر التدفق الكتلي للغاز ثابتاً في أي مقطع عرضي لقناة التدفق في الصمام.
- 3 انحناء صفحة الصمام أسطواني الشكل.
- 4 تدفق الغاز داخل قناة الصمام يكون شبه ثابت.

استناداً إلى الفرضيات السابقة تُعطى معادلة الحركة الخاصة بصفحة الصمام بالعلاقة:

$$\frac{\partial^4 U}{\partial X^4} + \frac{g}{a} \cdot \frac{\partial^4 U}{\partial X^4} = \frac{g}{a} (P - P_2) \quad (1)$$

مع الشروط الحدية التالية:

$$U|_{X=0} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial X}|_{X=0} = 0$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial X^2}|_{X=\ell} = 0; \quad \frac{\partial^3 U}{\partial X^3}|_{X=\ell} = 0$$

حيث:

$X$  - الإحداثي على طول القناة، تتغير قيمته من 0 (عند النهاية الثابتة) إلى 1 (عند النهاية الحرة)،

$U$  - إزاحة الصفحة [m]،

- g كتلة المقطع العرضي للصفحة [kg]،
- a الصلابة الأسطوانية للصفحة،
- b عرض الصفحة [m]،
- P توزع الضغط تحت الصفحة [Mpa]،
- P<sub>2</sub> الضغط فوق الصفحة [Mpa].

لحل هذه المعادلة باستخدام الحاسوب لا بد من تقسيم المعادلة وتحويلها إلى المعادلة التفاضلية للمصفوفات:

$$AU + BU'' = P - P_2 \quad (2)$$

حيث:

-A مصفوفة الصلابة والتي يتم حسابها بطريقة الفروق المنتهية،

-B مصفوفة العطالة،

-P متجه الضغط تحت الصفحة،

-P<sub>2</sub> متجه الضغط فوق الصفحة ويُعتبر مساوياً للضغط بعد الصمام في هذا النموذج.

بالإضافة إلى ما سبق هناك شروط التماس أو الاحتكاك التي تحدث عند اصطدام الصفحة مع مقعد الصمام

أو مع المحدد والتي يمكن تمثيلها بالشكل التقليدي:

$$\text{If } U[1] > U_1[1] \text{ then } U[1] - U_1[1]: \dot{U}[1] - Z \cdot \dot{U}[1]$$

$$\text{If } U[1] < 0 \text{ then } U[1] - 0: \dot{U}[1] - Z \cdot \dot{U}[1]$$

حيث:

-Z معامل القفز ويساوي حوالي (0,2)،

U<sub>1</sub>[1] عنصر متجه في الإحداثيات المحددة.

أما تدفق الغاز فيخضع إلى المعادلات الأدياباتية ومعادلات Sent-Venan - معادلات Ventsel كما يلي:

$$V^2 = \frac{2K}{K-1} \cdot \frac{P_0}{\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \quad (3)$$

$$V^2 = \frac{2K}{K-1} \cdot \frac{P_0}{\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{K-1} \right] \quad (4)$$

$$\frac{P}{P_0} = \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^K \quad (5)$$

أما تدفق الغاز فيتم حسابه بالعلاقة:

$$Q = V \cdot d \cdot \rho = \text{const} \quad (6)$$

حيث:

- $V$  سرعة الغاز على طول القناة [m/sec]،
- $P$  ضغط الغاز على طول قناة التدفق للصمام [Mpa]،
- $d$  مساحة مقطع قناة الصمام وتُحدد بالعلاقة [m<sup>2</sup>]:

$$d = (d_0 + U) \cdot b$$

حيث:

- $d_0$  سماكة قناة الصمام عندما يكون الصمام مغلقاً [m]،
- $K$  المعامل الأديباتي،
- $Q$  التدفق الكتلي للغاز [kg/sec]،
- $P_0, \rho_0$  كثافة وضغط الغاز قبل الصمام [kg/m<sup>3</sup>] , [Mpa].

بما أن هبوط الضغط النسبي لا يتجاوز (0,1) لذلك يمكن استخدام الكثافة الخطية حيث:

$$\rho = \rho_0 + \alpha$$

حيث  $\alpha \ll \rho_0$  فيمكن تحديد  $\alpha$  بالعلاقة:

$$\alpha = \frac{\frac{Q^2}{d^2 \rho_0^2}}{\frac{2Q^2}{d^2 \rho_0^2} - (K-1) \frac{C}{\rho_0}} \quad (7)$$

$$C = \frac{2K}{(K-1)} \frac{P_0}{\rho_0} \quad (8)$$

يتم حساب الضغط في قناة الصمام بالعلاقة:

$$P = P_0 \left( 1 + \frac{K \cdot \alpha}{\rho_0} \right) \quad (9)$$

من أجل صمام التصريف فيمكن تحديد الضغط في الأسطوانة من المعادلة الشهيرة من الأسطوانة:

$$\frac{dP}{dt} = - \frac{f(\varphi)}{f'(\varphi)} \cdot n \cdot \rho_0 - \frac{RT_0 \cdot \ell \cdot Q}{S \cdot r_1 \cdot f(\varphi)} \quad (10)$$

حيث:

- $P_0$  الضغط في الأسطوانة [Mpa]،
- $\varphi = \omega \cdot t$  زاوية دوران عمود المرفق،  $\omega$  - السرعة الدورانية [Rad/sec]،
- $f(\varphi)$  تابع حجم الأسطوانة،
- $r_1$  قطر عمود المرفق [m]،
- $\ell$  عدد عناصر الصمام،
- $R$  ثابت الغازات العامة [kg/kmol.°K]،
- $n$  المعامل البوليتروبي.

تُحدد درجة الحرارة  $T_0$  بالعلاقة:

$$\frac{P_0}{P_S} = \left(\frac{T_0}{T_S}\right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (11)$$

حيث  $T_S$  و  $P_S$  درجة حرارة وضغط السحب.

يتم حل النموذج الرياضي المقترح وذلك بإدخال المعادلات التفاضلية 2 و 10 مع شروط التماس والمعادلة 9 و 11 التي تحاكي صمام الطرد إلى برنامج حاسوبي.

معطيات الدخول إلى البرنامج تُعتبر البارامترات التالية: شوط المكبس - طول ذراع التوصيل - سرعة دوران عمود المرفق - قطر المكبس - ضغط السحب  $P_S$  وضغط الطرد  $P_0$  - درجة حرارة الامتصاص  $T_S$  - الدليل الأديباتي - ثابت الغاز.

زاوية فتح الصمام تُعطى ضمن المجال  $(0^\circ - 180^\circ)$ ، حيث يتم حساب صمام السحب. أما صمام الطرد فيتم حسابه ضمن المجال  $(180^\circ - 360^\circ)$ . بحسب الخطوة (1/100) يتوقف التكامل عند غلق الصمام.

قبل بدء التكامل بالزمن يتم وضع الشروط التالية: زاوية دوران الذراع تساوي زاوية الفتح - الضغط في

الأسطوانة

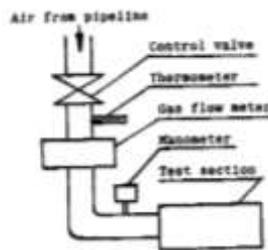
يساوي الضغط الموجود في فجوة السحب أو الطرد المتعلق بالفجوة المحسوبة - انتقال وسرعة مجموعة وحدة

صفائح الصمام تساوي الصفر.

#### 4- الضبط التجريبي والإجراءات:

يبين الشكل (3) رسماً توضيحياً للتجهيزات التجريبية للجريان الستاتيكي. يتدفق الهواء المضغوط من الأنبوب الصناعي بضغط (6) بار عبر صمام التحكم، حيث يدير مقياس التدفق عبر نموذج الصمام. بينما يبين الشكل (4) مقطعاً عرضياً للصمام، حيث يتألف من مقعد الصمام ومحدد الصمام وشفحة الصمام. يحتوي كل من المقعد والمحدد تقريباً صغيرة تتصل بأنابيب تقيس ضغط الغاز عبر قناة الصمام، وباستخدام المانومتري يتم قياس هبوط الضغط وتوزع الضغط.

#### تدفق هواء الأنبوب



صمام التحكم

مقياس الحرارة

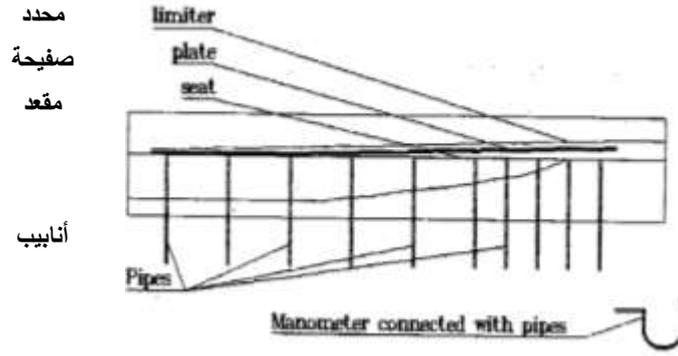
قياس تدفق

الغاز

مانومتر

مقطع اختبار

الشكل (3): منظر عام للأجزاء التجريبية للتدفق الساكن.



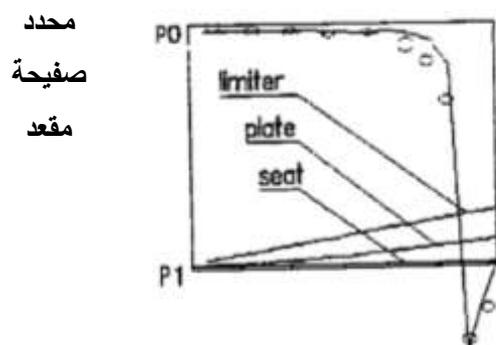
### مانومتر متصل بأنابيب

الشكل (4): مقطع اختياري تجريبي لقياس التدفق الستاتيكي.

أجريت التجربة عند أنظمة مختلفة حيث كل نظام مطابق لتدفق معين للغاز خلال الصمام، حيث يُعبر عن سرعة تدفق الغاز برقم رينولدز وذلك عند إزاحة ثابتة لنهاية صفيحة للصمام (عند ارتفاع ثابت لصعود الصفيحة). تم إجراء الاختبارات الديناميكية على ضاغط تجريبي يعمل بالتيار المستمر عند سرعات دوران تتراوح بين 500 و 1500 (r.p.m) دورة في الدقيقة، قطر الأسطوانة يساوي (200mm)، طول شوط المكبس (0,75mm). حيث تم بوساطة المحولات قياس ضغط الغاز في الأسطوانة، وفي حيز السحب، حيث يتم التحكم بإزاحة نهاية صفيحة الصمام بوساطة محول تحريضي بالإزاحة التفاضلية الذي يقوم بقياس إزاحة الصفيحة، وتكون الأخطاء النسبية في قياس إزاحة صفيحة الصمام حوالي (10%)، والخطأ النسبي في قياس ضغط الأسطوانة حوالي (5%).

### النتائج والمناقشة:

لإجراء المقارنة بين نتائج المحاكاة والقياسات التجريبية لاختبار النموذج الرياضي لتدفق الغاز (حيث تم نقل النموذج الرياضي إلى شروط الاختبارات الاستاتيكية)، تم تمثيل نتائج الدراسة الرقمية والتجريبية لتوزيع الضغط في الشكلين (5) و (6)، الإحداثي الأفقي هو الإحداثي X على طول قناة الصمام،  $P_0$  الضغط قبل الصمام،  $P_1$  الضغط بعد الصمام. يُلاحظ من الشكلين (5) و (6) التطابق والتوافق الجيد بين الحل الرقمي والنتائج التجريبية الأخرى الذي يعتبر دليلاً على مصداقية الحل الرقمي.

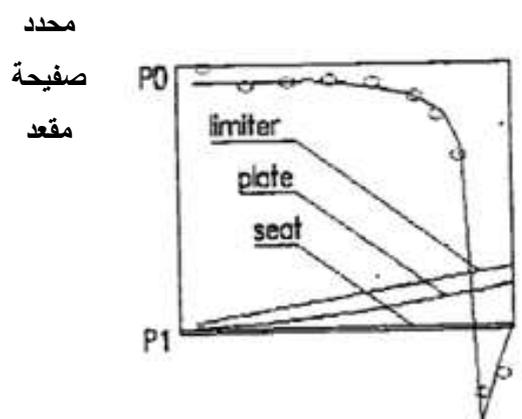


الضغط المحسوب —

الضغط المقاس تجريبياً ○

$R_e = 7048$  (عدد رينولد)

الشكل (5): المقارنة الاستاتيكية لتوزيع ضغط الغاز.



الضغط المحسوب —

الضغط المقاس تجريبياً ○

$R_e = 7048$  (عدد رينولد)

الشكل (6): المقارنة الاستاتيكية لتوزيع ضغط الغاز.

تمت أيضاً المقارنة بين المحاكاة وقياسات الضاغط المخبري من أجل اختبار النموذج الرياضي لضغوط

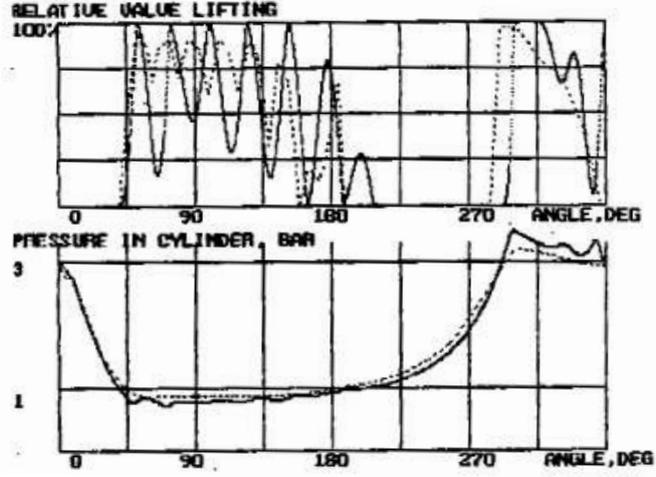
مصمام الديناميكية.

يمثل الشكلان (7) و (8) ارتفاع صفيحة الصمام وقياس ضغط الغاز تجريبياً ومحاكاة ذلك عبر الحاسوب. يبين

الشكلان السابقان التوافق الجيد بين الحل العددي والنتائج المقاسة.

ارتفاع الصمام  
النسبي

الضغط في  
الأسطوانة



$\varphi^\circ$   
 $\varphi^\circ$

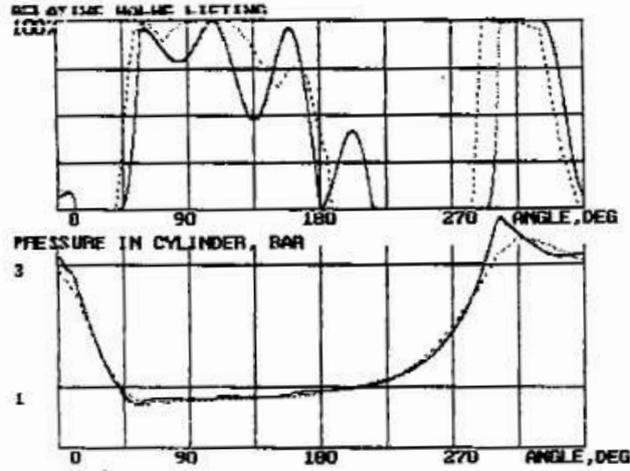
تجريبياً	.....	محاكاةً	—
----------	-------	---------	---

الشكل (7): مقارنة قيم المحاكاة والقيم التجريبية لنهاية حركة الصمام عند (n = 500 r.p.m).

ارتفاع الصمام

النسبي

الضغط في الأسطوانة

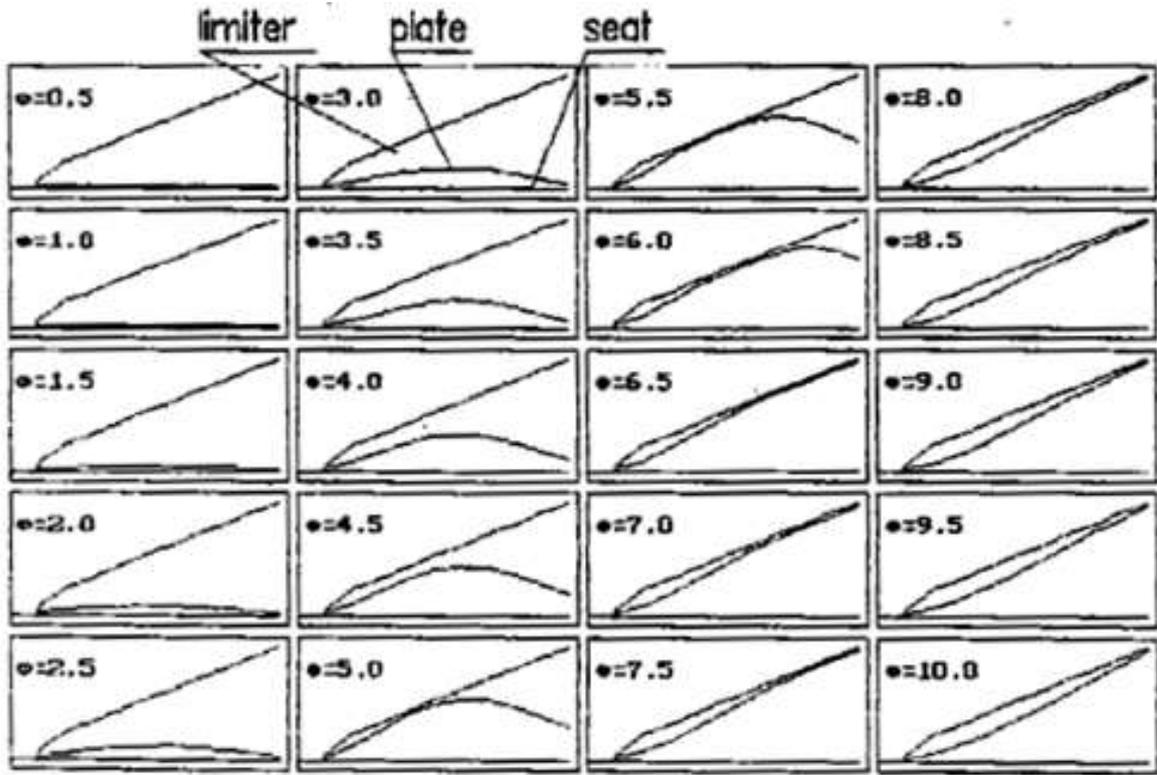


تجريبياً	.....	محاكاةً	—
----------	-------	---------	---

الشكل (8): مقارنة قيم المحاكاة والقيم التجريبية لنهاية حركة الصمام عند (n = 1000r.p.m).

كما هو مبين في الشكل (9)، من أجل رؤية عملية فتح الصمام ورسم خط المرونة، تمّ استعراض عملية ارتفاع صمام الطرد التي تمّ أخذها كل 5 درجات من دوران عمود المرفق، وذلك باعتبار أن ضغط الأسطوانة يفوق ضغط التصريف. يمكن استخدام هذه الطريقة أيضاً من أجل تحديد الاجهاد على سطح الصفيحة وسرعات التماس أو الصدم، ومن أجل المزيد من التنبؤات (المعلومات) فيما يخص الإجهاد وكذلك من أجل التصميم الأمثل لكل من محدد الصعود للصمام وقناة الغاز.

## مقعد صفيحة محدد



الشكل (9): استعراض فتح صمام التصريف وفق الحل العددي.

## الاستنتاجات والتوصيات:

يُمثل هذا العمل النتائج الرقمية لتدفق الغاز وحركة صفيحة الصمامات مستقيمة التدفق المستخدمة في الضواغط المكبسية، حيث تمَّ تحديد توزيع ضغط الغاز على وجهي الصفيحة وعلاقة الحمولة المطبقة على الصفيحة بانتقالها بالإضافة إلى تحديد تشوهات صفيحة الصمام المرنة.

تمَّ استخدام النتائج التجريبية للتحقق من مصداقية النموذج الرياضي، حيث أظهرت مقارنة النتائج التجريبية والعددية دقة عالية وتوافق جيد، كما تمَّ إظهار عملية رفع الصمام.

يُمكن اعتبار العلاقة التي تمَّ الحصول عليها من أجل توزيع الحمولة على الصفيحة أساس من أجل النموذج الرياضي لعمل الصمامات مستقيمة التدفق.

يُمكن استخدام الطريقة المقترحة من أجل تصميم عناصر الصمامات ذات التدفق المستقيم.

### المراجع:

- [1] ФРИНКЕЛЬ М.И. Нормативное проектирование компрессоров. – Д.: Машиностроение, 1969.
- [2] Зналинский В.Б. ПовнменениеэфФективностиПортневныхкомпрессоровнаосновеисследованийнеплотности и надежностипрямоточныхклапанов. –Дисс. Насоиск.Уч. Стен. Кдна.Техн. Наук.ДПУ, 1991.
- [3] ЯнмнВ.В. Повышениетехническогоуровнясредних и крупныхпоршневыхкомпрессоровнаопозитныхбасах. Научныйдоклад.ДПИ, 1989.
- [4] БелноговВ.Н., Киткис В., Киримас Н. НекоторыерезультатыисследораниядинамикиПрямоточногокдапана. – В сб. Механика 7.Материалыконф.“Развитиетехн.Наук в республике и использ.Ихрезультатов.Каунас, 1976 /1977/.
- [5] C. Deshamps, R.T.S. Ferreira, A.T. Prata. The Effective Flow and Force areas in Compressor Valves. Proc. of Compressor Engineering Conference at Purdue, 1988, Vol. 1, pp. 104-111.
- [6] J.F.T Maclaren, S.V. Kerr. An Analytical and experimental Study of Self-Acting Valves in a Reciprocating Air Compressor. IMechE Conference: International Reciprocating and Rotary Compressors Design and Operational Problems. Proc. Inst. Mech. Engrs., 1969, 70, Vol. 184, 3R.
- [7] W. Soedel. Introduction to Computer Simulation of Positive Displacement Type Compressors. Short Course Text, Ray W. Herrick Laboratories, 1972.
- [8] D. Moes. New Valve of Design for Flexible Operation Reciprocating Compressors. Proc. of Compressor Engineering Conference at Purdue, 1988, Vol. 1, pp. 115-123.
- [9] S. Touber. A Contribution to the Improvement of Compressor Valve Design. Delft University of Technology, TheMederlands, 1976.