

كبح الأذرع المتحركة في نهاية شوط الحركة

الدكتور معن بيطار*

(قبل للنشر في 1997/6/14)

□ ملخص □

تستخدم الأذرع المتحركة العاملة بالهواء المضغوط (المحركات الهوائية). لأتمتة بعض الأعمال الميكانيكية، الإنتاجية، الصناعية وغيرها. تقاد الأذرع الهوائية بشكل تسلسلي وينحصر عملها في عمليات بسيطة مثل (أخذ، إحضار، وضع). بغض النظر عن المميزات الجيدة للأذرع الهوائية مثل سرعة التنفيذ والراحة في استخدام الوسط العامل وبساطة التصميم فإنها لا تسمح بالحصول على الانزياح والتوقف الدقيقين المطلوبين. تكمن الصعوبة عند دراسة أداء هذه الآليات وسلوكها الديناميكي في تحديد طريقة كبح الكتل المتحركة في نهاية شوط الحركة، مع المحافظة على مجال ضيق لتغير التسارع ودون المساس بزمان شوط العمل.

يطرح هذا البحث طريقة لكبح الذراع باستخدام مخمدات هيدرو-ميكانيكية مستقلة. تتحدد خواص الكبح بحل النموذج الرياضي الذي يعكس حركة المجموعة بمساعدة الحاسوب. تتحدد عوامل المخمد التي تعكس مقدار قوة مقاومته وشكل تغيرها، آلياً بمساعدة برنامج الحل. تبين النتائج فعالية وسهولة استخدام هذا النوع من المخمدات لكبح الكتل المتحركة في نهاية الشوط.

* أستاذ مساعد في قسم القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

BRAKING THE PNEUMATIC ACTUATOR AT THE END OF THE STROKE

Dr. Maan BITAR*

(ACCEPTED 14/6/1997)

□ ABSTRACT □

P.A., which is called (pneumatic engine) is employed for the automation of some mechanical, productive industrial works and others. The P.A. is controlled successively, and it exclusively functions in simple operations like taking, bringing and placing.

Although the P.A. has good advantages like fast execution, easy use of the man-power and simple design, it doesn't secure exact displacement and stopping required for monitor and control. Difficulty arises in studying the performance of these machinery and their dynamic action lies in specifying the method of braking moving masses at the end of the stroke with the reservation of the short range in changing acceleration without affecting the time of work stroke.

This research displays a method for braking the (P.A.) by using autonomous Hydro mechanical dampers. The characteristics of braking are specified by solving the mathematical solution which expresses the movement of the system with the aid of the computer. The damper factors which reflect the amount of its resistance and the form of its change are specified automatically by aid of logarithm. The results show the efficiency and facility in using this type of dampers to brake the moving masses at the end of the stroke.

* Associate Professor at Mechanical Power Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

نظراً للتطور السريع في أنواع السلع الاستهلاكية والصناعية، والاتجاه إلى الإنتاج الآلي وفق خطوط إنتاج مبرمجة، تعمل على إنتاج سلع بمواصفات محددة، ويمكن أن تتغير هذه المواصفات من فترة إلى أخرى مع الإبقاء على خطوط الإنتاج بشكلها الأساسي وإحداث تعديلات طفيفة على آليات الإنتاج وشروط عملها. أدى هذا التوجه العالمي إلى التركيز أكثر على استخدام الأذرع المتحركة (الروبوتات الصناعية)، التي تعمل بشكل آلي وفق نظام محدد. هذا ما نراه كثيراً في مصانع السيارات، الثلاجات، الأجهزة الإلكترونية، المشروبات، والمعلبات...

من ناحية أخرى حلت أجهزة الروبوت بشكل فعال جداً في أماكن العمل الخطرة على صحة الإنسان، مثل مناجم المواد المشعة، معامل المواد الكيميائية، أفران صب المنتجات الميكانيكية. ومكنت هذه الأجهزة الباحثين والعلماء في كشف أعماق البحار والفضاء حيث لا يمكن للإنسان أن يحل ويعمل [4].

تقاد الأذرع المتحركة بعدة طرق منها الميكانيكية، الهيدروليكية، الهوائية، الكهربائية، أو المختلطة. تتحدد طريقة القيادة تبعاً لعوامل عدة منها نوع المنتج، ظروف وشروط العمل، الإنتاجية، دقة التوقف وغيرها.

تستعمل الاسطوانات (المحركات) الهوائية (Pneumatic cylinder)، بشكل واسع في الروبوتات البسيطة ذات القيادة التسلسلية والتي تنحصر وظائفها في عمليات مثل (أخذ، إحضار، وضع). بغض النظر عن المميزات الجيدة للأذرع الهوائية مثل سرعة التنفيذ والراحة في استخدام الوسط العامل وبساطة التصميم، فإنها لا تسمح بالحصول على الانزياح والتوقف الدقيقين، المطلوبين في أنظمة القيادة والتوجيه.

عند اختيار المحرك الهوائي للقيام بعملية إنتاجية أو مساعدة في المجموعات الميكانيكية الحديثة، تظهر ضرورة تحديد طريقة كبح (فرملة) المحرك الهوائي في نهاية شوط الحركة، مع المحافظة على مجال ضيق لتغير تسارع حركة ذراع المحرك الهوائي (Cylinder rod) ودون المساس بزمان شوط العمل المحدد سلفاً كعيار إنتاجي للآلية.

أغلب الأنظمة المعروفة لفرملة المحركات الهوائية تستخدم الصمامات الخانقة بمقاطع ثابتة أو متغيرة، تعتبر الحمولة الأساسية في المحركات الهوائية عطالية لذلك استخدمت بشكل واسع طرق الفرملة المفاجئة [1]. العيوب الأساسية لهذه الطرق تكمن في عدم إمكانية التحكم بارتفاع الضغط في حجرة الفرملة ما يسبب في إتلاف الجلبات وانفجار الخراطيم وعدم امتلاك الأدبائية الكافية. بالإضافة إلى أن قيمة قوة الفرملة تتحدد من تغير نظام وأسلوب الفرملة ولا تتعلق بسرعة وكتلة العنصر المتحرك (الذراع)، مما يسبب حدوث تباطؤ حاد للذراع في نهاية شوط الحركة. تسبب هذه العيوب أيضاً صعوبة تعيين إحداثيات بدء شوط

فرملة المحرك الهوائي[2]. ينتج من ذلك أنه من الضروري تصميم طرق فرملة أكثر بساطة وفعالية، مثل أجهزة الفرملة المستقلة بذاتها عن الذراع التي تنحصر وظيفتها في امتصاص الطاقة الحركية للذراع في نهاية شوط الحركة بالدقة والسرعة المطلوبين.

تتنوع أجهزة الفرملة المستقلة وتختلف أنظمة عملها وأسلوبها في مقاومة وامتصاص الطاقة الحركية للأجسام المتحركة، تعتبر أجهزة الفرملة الهيدرو-ميكانيكية الأكثر انتشاراً نظراً لكفاءتها العالية وصغر حجمها وأدائها الجيد. العيوب الأساسية لهذه الأجهزة، هي ارتفاع كلفة إنتاجها بسبب التقنية العالية المستخدمة في تصنيعها، وارتفاع درجة حرارتها خاصة في حالة العمل المتكرر الحاد، عندها لابد من إيجاد وسيلة ما لتبريدها خشية من تغير أدائها أو حصول تسربات غير مرغوبة للسائل إلى الخارج[3].

تستخدم بشكل واسع في الروبوتات البسيطة محركات هوائية ثنائية التأثير وذات قيادة تسلسلية، نبين على الشكل رقم (1) اسطوانة المحرك الهوائي الثنائية التأثير والتي تحتوي على مكبس عادي يؤمن من الانزياح المطلوب بإحداثيات محددة x الذراع، تمثل x_0 بداية إحداثيات المكبس وتعتبر عن الحجم الابتدائي للحجرة العاملة، A_1 : مساحة السطح المؤثر للمكبس، A_2 : مساحة السطح المؤثر للمكبس من الجهة المقابلة، x_{0b} : الإحداثية المقابلة للحجم غير العامل للحجرة المقابلة (حجرة التصريف للحالة المبينة)، P_1, P_2 : الضغط في الحجرة العاملة وحجرة التصريف، m : كتلة الأجزاء المتحركة والمؤثرة على المكبس، $F_c = F_1 + F_2$: قوة مقاومة حركة المكبس وتتضمن قوى المقاومات المفيدة والضارة، حيث تمثل F_1 : قوة مقاومة المخمد و F_2 : قوة مقاومة حركة مكبس المحرك الهوائي.

Y_1, Y_2 : مؤشرات إعادة تشغيل موزع الهواء، S : طول الشوط العامل للمكبس. يكتسب المكبس حركته من تأثير ضغط الهواء على سطحه العامل، يتحرك المكبس للحالة المبينة نحو اليمين ويمكن توضيح هذه الحركة بالمعادلات التفاضلية التالية:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} &= p_1 A_1 - p_2 A_2 - F_c \\ \frac{dp_1}{dt} &= \frac{k}{x} \left(\frac{G_1 R T_1}{A_1} - p_1 \frac{dx}{dt} \right) \\ \frac{dp_2}{dt} &= \frac{k}{(s + 2x_0 - x)} \left[\frac{G_2 R T_2}{A_2} - p_2 \frac{dx}{dt} \right] \\ F_A &= f_t (p_1 A_1 - p_2 A_2) \end{aligned} \quad (1)$$

حيث، k : ثابت الأدبائية، G_1, G_2 : مصروف الهواء المتدفق عبر خط الضغط، والخارج من حجرة التصريف بالترتيب، T_1, T_2 : درجة الحرارة المطلقة للهواء المتدفق عبر خط الضغط،

والخارج من حجرة التصريف، علماً أن $p_m, T_2 = T_1 (p_2 / p_m)^{\frac{k-1}{k}}$: ضغط الهواء المتدفق عبر خط الضغط، R: ثابت الغازات العام.

تتعين كتلة الهواء المتدفق إلى الحجرة العاملة والخارج من حجرة التصريف، بالعلاقات:

$$G_i = \mu_{ni} f_i p_1 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{RT_i} (\sigma^{2/k} - \sigma^{k+1/k})} \quad (2)$$

$i = 1, 2$

لحالة نظام التدفق تحت الحرج، و:

$$G_i = \mu_{ni} f_i p_1 \sqrt{\frac{0.469}{RT_i}} \quad (3)$$

$i = 1, 2$

لحالة نظام التدفق، فوق الحرج.

حيث σ : نسبة ضغط الوسط الذي يدخل إليه الهواء إلى ضغط الوسط الآتي منه، بالتالي، $\sigma = p_1 / p_m$: الحجرة العاملة، و $\sigma = p_a / p_2$: لحجرة التصريف.

μ_{ni} : عامل ضياعات تدفق الهواء الداخل إلى الحجرة العاملة أو الخارج من حجرة التصريف، f_i : مساحة المقطع العرضي لفتحة دخول الهواء إلى الأسطوانة، أو فتحة الخروج.

تحدد قيمة قوة المقاومة F_i وبدء تأثيرها تبعاً لطريقة كبج الذراع وبداية شروط الكبج. يبين الشكل رقم (2) مقطعاً للمكبج الهيدرو-ميكانيكي المقترح.

يتسرب السائل من الحجرة العاملة ذات الضغط p_1 إلى حجرة التجميع (الحجرة المستقبلة) عبر فتحة تصريف مساحتها $f(x)$.

لتعيين قوة مقاومة المخدم تحليلياً، نعتبر السائل غير قابل للانضغاط وتهمل الضياعات في الحجرة العاملة.

يتحدد أداء المخدم الهيدرو-ميكانيكي المبين أعلاه تبعاً لعدة متحولات يمكن التعبير عنها بمعادلة برنولي (معادلة الحفاظ على حجم ثابت) التالية:

$$p_1 + \rho \frac{u_1^2}{2} = p_2 + \rho \frac{u_2^2}{2} \Delta p_h + \Delta p_e \quad (4)$$

$$Q = u_1 f_1 = u_2 f_2 = \text{const}$$

حيث Δp_h : الضياعات الهيدروليكية، تتعلق بأبعاد الفتحات وسرعة التسريب ولزوجة السائل والضغط. يؤثر نظام التدفق أيضاً على الضياعات الهيدروليكية ويتحدد هذا النظام بواسطة رقم

رينولدز للجريان:

$$Re_n = u d_p / \nu = 4Q / \mu \nu$$

حيث u : السرعة الوسطية لتدفق السائل m/sec ، v : عامل اللزوجة الحركية m/sec ، d_p : القطر الهيدروليكي لمجرى التدفق m ، الذي يتبع العامل $\mu(m)$ والمساحة العرضية للمجرى $f(m)$ ، عندها:

$$Q = d_p = 4f/\mu \quad m^3/s$$

$$Q = f.u$$

Δp_e : الضياعات العطالية، ρ : كثافة السائل وتساوي وسطياً $(900kg/m^3)$. تأخذ معادلة برنولي للجزء المحصور بين مقطعي المخمد 1 و 2 الشكل التالي:

$$p_{h1} = p_{h2} + (u_2^2 - u_1^2) \rho / 2 + \Delta p_h + \Delta p_e \quad (6)$$

حيث u_1, u_2 : السرعات الوسطية لتدفق السائل عند المقاطع 1 و 2 شكل رقم (2)، نعين سرعة السائل لأي مقطع بدلالة المكبس v بمساعدة العلاقات:

$$\begin{aligned} Q_h &= A_{h1}.v \\ u_i &= A_{hi}.v / f_i \end{aligned} \quad (7)$$

حيث A_{h1} : المساحة العاملة لمكبس المخمد. تتعين الضياعات الهيدروليكية Δp_h لحالة التسريب المضطرب وفق مبدأ الضياعات الموضعية، بالعلاقة:

$$\Delta p_h = \rho \cdot \sum_i (\xi_i \cdot u_i^2 / 2) = \rho \cdot v^2 \cdot A_{h1}^2 \cdot \sum_i (\xi_i / 2 f_i^2) \quad (8)$$

والضياعات العطالية المنقولة إلى مكبس المخمد، تتعين بالعلاقة:

$$\Delta p_e = \rho \cdot L \cdot v \quad (9)$$

$$L = A_{h1} \cdot \sum_i (l_i / f_i) \quad (10)$$

حيث L : الطول المكافئ لمجرى التدفق بين مكبس المخمد وفتحة التصريف، نبذل (8) و (9) بـ (6)، نحصل:

$$p_{h1} = p_{h2} + \left(\frac{\rho \cdot v^2 \cdot A_{h1}^2}{2} \right) \left(A_{h2}^2 - A_{h1}^{-2} + \sum_i \frac{\xi_i}{f_i^2} \right) + \rho \cdot L \cdot v \quad (11)$$

بفرض $A_{h1} = A_{h2}$ واعتبار المقاومات الموضعية فقط بين المقطعين 1 و 2 التي تسببها الفتحة المتضيقة $f(x)$ لحركة السائل من الحجرة الأولى إلى الحجرة الثانية. وإلغاء علاقة A_{h1} بـ x . عندها تتعين قوة المقاومة الهيدروليكية للمخمد بالعلاقة:

$$F_h = A_{h1} \cdot p_{h1} = \frac{\xi \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_{h1}^3}{2 f(x)} + \rho \cdot A_{h1} \cdot L \cdot v + p_{h2} \cdot A_{h1} \quad (12)$$

يمثل الحد الأول للمعادلة (9) القوة اللازمة للتغلب على المقاومة الموضعية للسائل التي تتحدد طبيعتها وقيمتها تبعاً لدرجة تغير مساحة فتحة تصريف السائل من الحجرة الأولى للمخمد إلى الحجرة الثانية، والحد الثاني، القوة اللازمة لإكساب كتلة السائل تسارعاً $x = v$ ، والحد الثالث،

القوة اللازمة للتغلب على المقاومة التي يسببها الضغط p_{h2} على مكبس المخمد. يتعلق الضغط p_{h2} بتصميم المخمد. يمكن أن يكون ثابتاً ويساوي الضغط الجوي أي $p_{h2} = 0$ ، أو متغيراً يتبع الضغط الابتدائي للنابض x_2 وصلابته k_2 ، وإزاحة المكبس x ، أي:

$$p_{h2} = k_2(x_2 + x)/A_{h2} \quad (13)$$

تتعين قوة المقاومة الكلية للمخمد، التي تظهر من جراء تأثير القوى الخارجية على ذراع مكبسه من مبدأ توازن القوة، بعد إهمال كتلة المخمد، نحصل:

$$F_t = F_h + F_j + k_1(x_1 + x) \quad (14)$$

حيث F_t : قوة الاحتكاك الجاف بين المكبس والأسطوانة، والذراع والأسطوانة للمخمد. X_1 : الضغط الابتدائي الأول.

نعوض (12) بـ (14) مع ملاحظة المعادلة (13)، نحصل:

$$F_t = \xi \cdot \rho \cdot A_{h1}^3 v^2 / 2 f(x)^2 + k_{eq} \cdot x + \rho \cdot A_{h1} \cdot L \cdot v + F_{t0} \quad (15)$$

حيث k_{eq} : الصلابة المكافئة للنوابض، $F_{t0} = F_t + k_1 \cdot x_1 + k_2 \cdot x_2$ الجزء الثابت من قيمة قوة مقاومة المخمد.

يمكن وصف تغير قوة مقاومة المخمد كتابع لإزاحة المكبس $F_t = F(x)$ ، دون اعتبار قوة مقاومة عطالة السائل وقوة الاحتكاك الجاف، المنحني بالمبين على الشكل رقم (3). لدينا في بداية الإحداثيات $F_{t(x)} = F_{t0}$ ، أما خلال الشوط العامل للمخمد ($v > 0$) يتحدد قانون تغير مقاومة المخمد بشكل أساسي من قوة المقاومة الهيدروليكية (الحد الأول للمعادلة 15). يسبب اختيار التابع $f(x)$ تأثيراً بالغاً على مواصفات وقيمة القوة $F_{t(x)}$ ، لذا يجب مراعاة الدقة البالغة في تحديد التابع $f(x)$. تظهر قوة المقاومة المرنة $k_{eq} \cdot x$ على الشكل رقم (3) بالخط المنقط. تقابل المساحة المظلة عمل المقاومات الهيدروليكية خلال دور واحد، الذي يساوي مقدار الطاقة الحركية المخمدة (المتصة)، تقابل المساحة المحصورة بين الخط المنقط ومحور الإحداثيات، عمل القوة F_{t0} وقوة مرونة النابض. يعود المكبس إلى وضعيته الابتدائية ($v > 0$) من جراء تأثير قوة المرونة.

ينحصر دور المخمد العامل مع محرك هوائي في فرملة القوى العطالية، بالتالي تتعين عوامله الأساسية من شرط مساواة الطاقة الحركية للكتل المتحركة بعمل كافة القوة المؤثرة على ذراع المحرك الهوائي وذلك بعد اصطدامه بالمخمد، يمكن التعبير عن ذلك بالمساواة:

$$\Delta E_k = \sum_{i=1}^m \int_0^{S_i} F_i(x) dx \quad (16)$$

ΔE_k : تغير الطاقة الحركية للكتل المتحركة، بدلالة زمن الفرملة. $F_{t(x)}$: تابع يصف قانون تغير، i : قوة خلال شوط الفرملة. S_i : شوط الفرملة.

يعتبر ذراع مكبس المحرك الهوائي الأكثر صلابة بين بقية أجزاء المحرك الهوائي،
بالتالي عند دراسة التصميمية للمجموعة، نمثل جملة المحرك الهوائي والمخمد بنموذج
فيزيائية وحيد الكتلة، شكل رقم (4)، عندها تأخذ المعادلة (16) الشكل التالي:

$$\Delta E_k = \int_0^{s_f} F_A(x) dx + \int_0^{s_f} F_t(x) dx - \int_0^{s_f} F_E(x) dx \quad (17)$$

حيث F_A : قوة مقاومة حركة مكبس المحرك الهوائي، F_t : قوة مقاومة حركة المكبس من جهة
المخمد، F_E : قوة تحريك ذراع الاسطوانة الهوائية. تعتبر هذه القوى غير خطية وغير معلومة
لكنها تتعين بعد حل جملة المعادلات التي تمثل حركة المحرك الهوائي مع المخمد، من بداية
شوط الحركة إلى نهايته حيث يجب أن يتوقف المكبس بشكل انسيابي. يتعين عمل قوة
المقاومة A_A ، وقوة الفرملة A_t ، والقوة المحركة A_E ، كمجموع الأعمال الجزئية لهذه القوى
لكل خطوة تكامل، شكل رقم (5) وفق العلاقة:

$$A_i = \sum_{j=0}^{N-1} A_j \quad (18)$$

حيث A_i : عمل القوة i المؤثرة على ذراع المحرك خلال شوط الفرملة. A_j : العمل الجزئي
لـ قوة على خطوة التكامل، N : عدد التكاملات التي قسم إليها شوط الفرملة (في الحالة
العامة N مجهول)، نستخدم في عملية التكامل طريقة شبه المنحرف، نحصل:

$$A_j = \int_{x_j}^{x_{j+1}} F_j(x) dx = \frac{1}{2} (F_j + F_{j+1}) h \quad (19)$$

بالتالي يمكن تعيين قوة مقاومة المخمد اللازمة لإيقاف حركة المكبس خلال شوط الفرملة
المحدد سلفاً $S_t = S/a$ ، بالعلاقة:

(حيث: S : طول شوط حركة مكبس المحرك الهوائي، S_t : طول شوط الفرملة، a : ثابت يحدد
نسبة طول شوط الفرملة إلى شوط المكبس).

$$F_t = E_k - \int_0^{s_f} F_A(x) dx + \int_0^{s_f} F_t(x) dx \quad (20)$$

تعطي هذه المعادلة قيمة قوة مقاومة المخمد وشكل تغيرها تبعاً لعوامل المخمد وشروط بدأ
شوط الفرملة.

لبحث أداء المحرك الهوائي مع المخمد المقترح، تم إعداد برنامج بلغة فورتران لحل
جملة المعادلات الرياضية من (1) إلى (20) التي تعكس حركة المحرك الهوائي مع المخمد
المقترح [5]. يعمل البرنامج على مراقبة الحل والوصول إلى التوقف التام لذراع المحرك
الهوائي في نهاية شوط الحركة مع مراعات الشوط الابتدائية لتحقيق هذا التوقف. إذا لم

نتوصل إلى النتيجة المطلوبة، يعيد البرنامج المسألة إلى بدايتها وبعيد الحل من أجل معطيات جديدة لصلابات نوابض المخمد وقطر فتحات تصريف السائل بين حجرتيه.

نبين فيما يلي أحد الحلول العددية لجملة معادلات الحركة مع المعطيات التالية لعناصر الجملة:

$$p_m = 0.14 \text{ MPa}, p_a = 0.1013 \text{ MPa}$$

$$A_2 = 0.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, A_1 = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S = 0.4 \text{ m}, m = 12 \text{ kg}, k = 1.4, x_0 = 0.03 \text{ m}$$

$$f_2 = 5.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2, f_1 = 2.8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2, \mu_1 = \mu_2 = 0.08$$

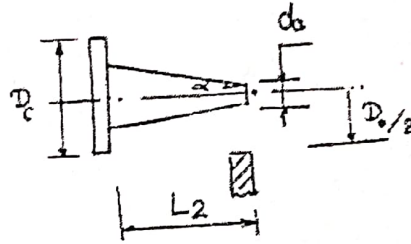
يملك المخمد المعطيات التالية:

$$a = 1/0.7, L_2 = 0.0.124 \text{ m}, L = 0.12 \text{ m}$$

$$D_c = 50 \cdot 10^{-3} \text{ m}, D_0 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ m}, d_a = 15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

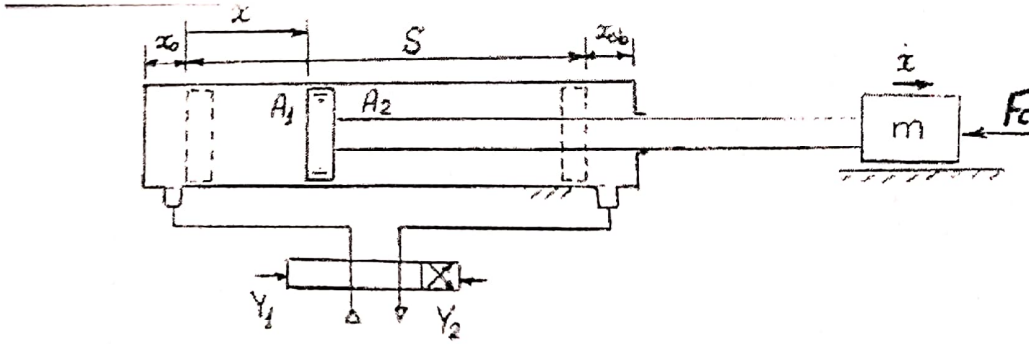
$$k_{d1} = 151 \text{ N/m}, k_{d2} = 101 \text{ N/m}, \rho = 900 \text{ kg/m}^3$$

$$\xi = 0.063, f_t = 0.15$$

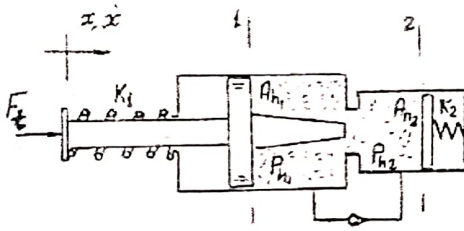


نبين على الشكل رقم (6) منحنيات تغير سرعة وتسارع ذراع المحرك الهوائي ومنحني تغير قوة مقاومة المخمد كتابع إلى انزياح الذراع x . واضح من الشكل ان انخفاض الحاد للسرعة عندما $x = 0.7 \text{ s}$ ، أي في بداية شوط الفرملة، عائد إلى الصدم المفاجئ للمكبج الهيدرو-ميكانيكي حيث التأثير الكبير لعطالة السائل. بسبب التباطؤ الحاد في حركة الذراع ظهور قوة عطالة كبيرة ولكن لفترة صغيرة جداً من الزمن. بعدها وقبل نهاية شوط الحركة، تبدأ السرعة بالتناقص بشكل انسيابي وذلك بسبب امتصاص الجزء الأكبر من الطاقة الحركية للكتل المتحركة في بداية شوط الفرملة وتغير طبيعة قوة المقاومة الهيدروليكية للمخمد التي تتبع بشكل أساسي سرعة الكتل المتحركة. نحصل بالنتيجة على توقف هادئ ودقيق للذراع في نهاية شوط الحركة وبدون ظهور ردود أفعال عالية على الذراع من جهة المخمد كما هو واضح من منحنى تغير قوة مقاومة المخمد. لا نحتاج في هذه الحالة إلى ضغوط عالية للهواء في حجرات المحرك الهوائي بهدف تثبيت توقف الذراع في نهاية الشوط كما هو الحال عند

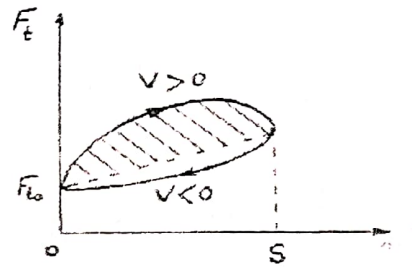
استخدام طريقة الفرملة بمساعدة الصمامات الخانقة. إن عدم إجهاد المحرك الهوائي عند فرملته في نهاية الشوط له فوائد ديناميكية وأدائية مهمة جداً من حيث دقة أداء المحرك والمحافظة على الإذباتية اللازمة للمحافظة على قانون ثابت لتغيرات القوى الهيدروديناميكية المؤثرة في الجملة.



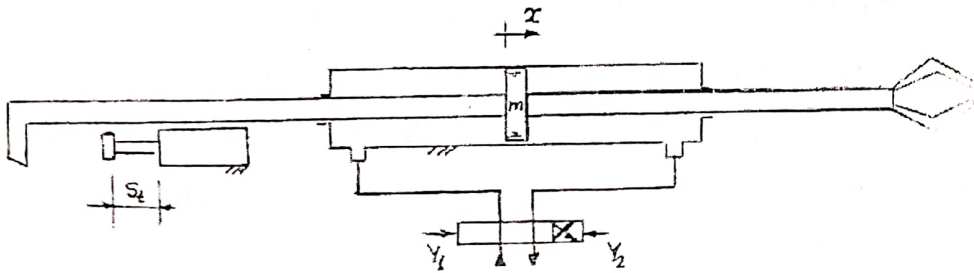
شكل (1)



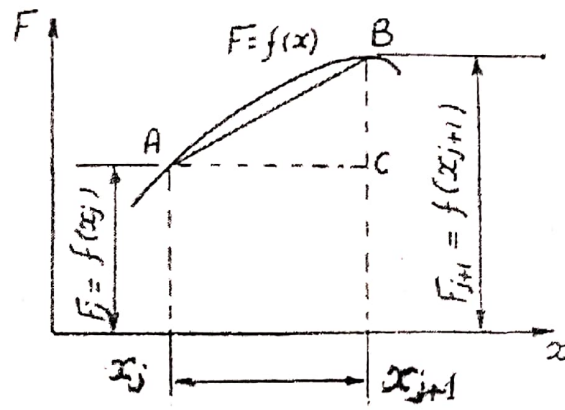
شكل (2)



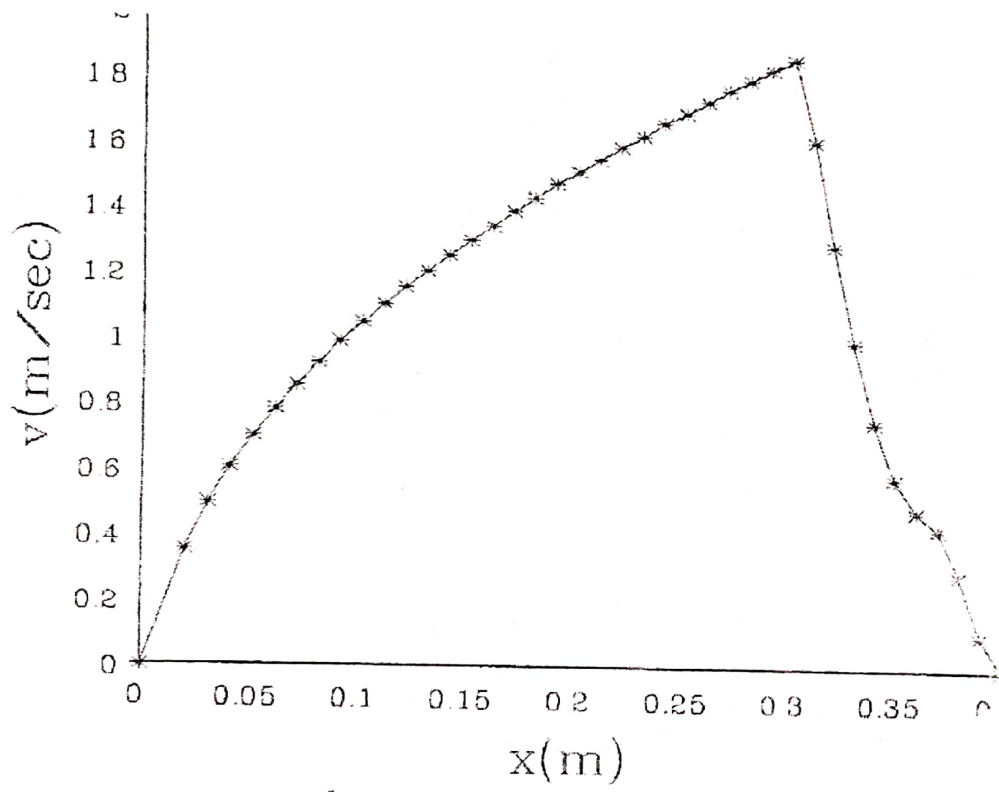
شكل (3)



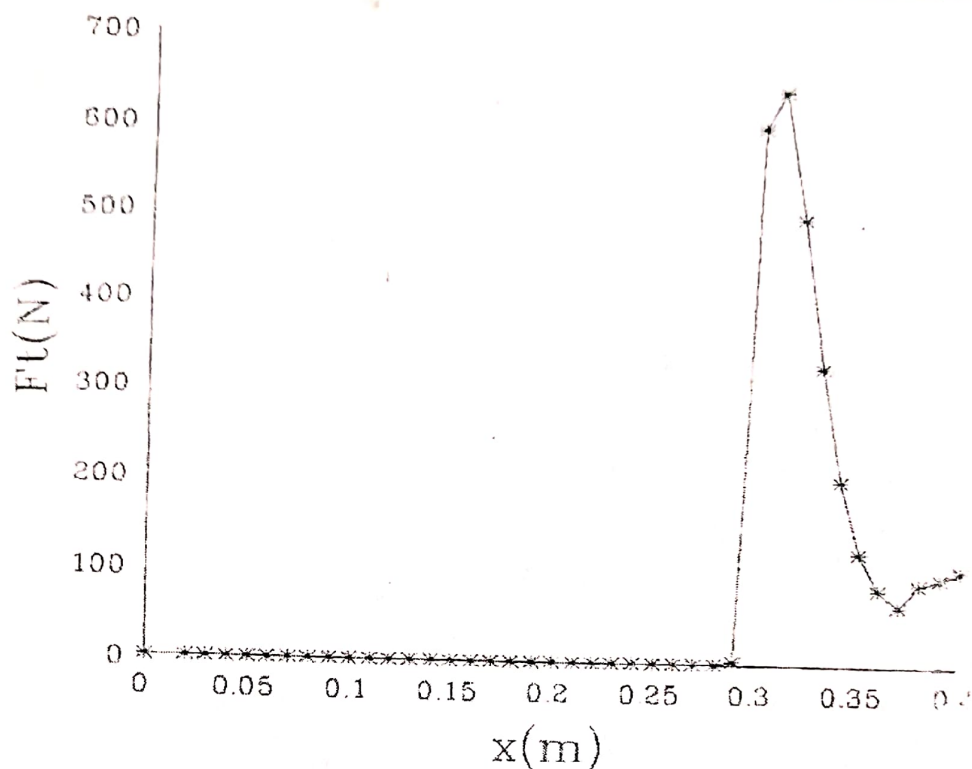
شكل (4)



شكل (5)



شكل (1-6)



شكل (2-6)

REFERENCES

المراجع

- [1]- Herts. e.v.; Krenen. H.V.; Pneumatic actuator design "Machine building" M, 1975.
- [2]- Paroe, A.A, Calculation coordinates of the origin of braking pneumatic actuator (rabot "Machine building journal", 1981, N-7.
- [3]- Feliboy. U.B. arresting arrangement apeumatic actuator, L. Machine building, 1987.
- [4]- Speno, H.A. Penetration Robot, design and utilization, M, 1985.
- [5]- Marvin, N, Numerical Methods for engineering applications New York, P McGraw-Hill, 1991.