

## محاكاة عمل المحرك العنفي النفاث " ثنائي المحور " باستخدام " فيجول بيسك "

الدكتور محمد عطا بطل\*

منهل حسن البري\*\*

(تاريخ الإيداع 24 / 7 / 2016. قُبِلَ للنشر في 20 / 9 / 2016)

### □ ملخص □

يُعتبر المحرك النفاث الوحدة الأساسية في الطائرة لإنتاج قوة الدفع وتحريك الطائرة، لهذا تعطى الأهمية القصوى أثناء التصميم والإنتاج والاختبار. إن الوصول إلى محرك مثالي يتطلب حسابات تصميمية كثيرة ومعقدة إضافة إلى إجراء عديد من التجارب على المحرك وكل هذا يحتاج إلى حجم عمل وزمن وتكلفة اقتصادية كبيرة. ومن أجل اختصار الوقت والتكلفة نقوم بإنتاج نموذج رياضي للمحرك المدروس يحاكيه من حيث شكل العمليات الانتقالية وتغيرها مع الزمن، كذلك البارامترات التي يستقر عندها في نهاية كل عملية انتقالية، بحيث يساعد على تقدير الأداء والمواصفات الأساسية للمحرك.

وقد تمكنا في هذا البحث من وضع نموذج رياضي ديناميكي للمحرك النفاث ثنائي المحور مبني على أساس العلاقة الايروديناميكية والميكانيكية بين دوارى الضاغط وإجراء التكامل بالزمن بحيث نحكي عمل محرك حقيقي وفق برنامج حاسوبي باستخدام لغة البرمجة فيجول بيسك[6]، حيث يمكن استخدام النموذج الرياضي الديناميكي للمحرك في: دراسة الأنظمة الانتقالية للمحرك، دراسة تأثير الظروف الخارجية المتحولة (زمنياً) على عمل المحرك، وكذلك دراسة تأثير عوامل التحكم (تغير غزارة الوقود المقدم للمحرك- تغير قطر فوهة النفث) على استقرار المحرك. وهذا يمكننا من تحديد أداء المحرك النفاث في مراحل التصميم الأولى.

\* أستاذ - قسم القوى - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية  
\*\* ماجستير - هندسة هياكل ومحركات الطيران - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة حلب - سورية.

## Simulink the aviation turbo engine "dual axial" by visual basic

Dr. Mohammad Ata Batal\*  
Manhal ALbare\*\*

(Received 24 / 7 / 2016. Accepted 20 / 9 / 2016)

### □ ABSTRACT □

The jet engine is the main unite at aircraft to produce thrust ,for this it has high importance during designee, produce and testing stages .to get typical engine it need :complex many calculations, time, and high coasts .for this reasons we work to get mathematical module for this engine stimulant it in transition processers,and stable parameters' at the end of transition processers, this will help to know and predict specifications of the engine.

In this research we get mathematical module for **aviation turbo engine "dual axial"** built upon aerodynamical – mechanical relations between two rotors ,and integrate it by time using program with VB[6] .

This module help us to study: transition processers, effect of outer conditions by the time,and effect of control parameters (fuel flow- diameter of jet nozzle.....) at stability of the engine .

This will help us consider and know the parameters' of the engines at the early stages of designee.

---

\* professor - forces department -mechanical and electrical faculty-Teshreen university, Syria.

\*\*Master of aircrafts structure and engine -mechanical and electrical faculty- Aleppo university- Syria.

الرموز والمصطلحات والمختصرات المستخدمة:

THD-عنفة الضغط المنخفض	KHD-ضاغط الضغط المنخفض
TBD-عنفة الضغط المرتفع	KBD-ضاغط الضغط المرتفع
KP-الحددي	BX-مدخل الهواء
H-الوسط الخارجي	BH-الداخلي
$\Gamma$ -الغاز	B-مدخل الضاغط
T-العنفة	K-الضاغط
$q(\lambda_B)$ -الكثافة النسبية لخيوط التيار (قابلية التمرير)	Kc-حجرة الاحتراق الرئيسية
$a_{KP}$ -سرعة الصوت في المقطع الحددي [m/s]	$\lambda = \frac{C}{akp}$ -عامل السرعة النسبية (عامل التمرير)
C-سرعة الهواء أو الغاز [m/s]	$M = \frac{C}{a}$ -رقم ماخ
R-الثابت المميز للغازات [Joul/kg.K]	k-الأس الأدياباتي
$\rho$ -كثافة الغاز [kg/m <sup>3</sup> ]	$n_j$ سرعة الدوران للعنصر (j) [r.p.s] دورة في الثانية
	Q-كمية الحرارة المعطاة [Joul]
$L_i$ -العمل النوعي للعنصر (i) [Joul]	$G_B, G_\Gamma, G_T$ -استهلاك الوقود في حجرة الاحتراق، غزارة الهواء، غزارة الغاز [kg/s]
P-قوة الدفع [N]	F-المساحة [m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{Bx} = \frac{P_B^*}{P_H^*}$ -عامل انحفاظ الضغط الكلي في مدخل هواء المحرك	C $\Pi$ -السعة الحرارية النوعية في حجرة الاحتراق الرئيسية [Joul/kg.K]
$\pi_{C.P} = \frac{P_\Phi^*}{P_H}$ -نسبة التمدد (الانتشار) المتوفرة في أنبوب النفث	$\tau_k = \frac{T_k^*}{T_B^*}$ -نسبة تسخن الهواء في الضاغط
$g_{ot\delta}$ -غزارة الهواء النسبية المأخوذة لتوابع المحرك	$g_T = \frac{G_T}{G_B}$ -الاستهلاك النسبي للوقود
$\pi$ -نسبة الانضغاط (الانتشار)	$g_{OXI}$ غزارة الهواء النسبية المأخوذة لتبريد العنفة [kg/s]

## أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى تقديم نموذج رياضي ديناميكي للمحرك الجوي ثنائي المحور يحاكي عمله، وتكمن أهمية هذا النموذج في كونه يساعد في مراحل التصميم الأولي من حيث تقليل حجم العمل والزمن والتكلفة الاقتصادية.

## منهجية البحث:

تم إنجاز هذا البحث للحصول على النموذج الرياضي الديناميكي في جامعة تشرين ومركز البحوث عام 2016 وذلك باعتماد منهجية بحث وفق التالي:

الاعتماد على مميزات العمل والتشغيل لأجزاء هذا المحرك، وتجهيزها لتكون قابلة للنمذجة الحاسوبية بحيث يتم الاستفادة منها ضمن البرنامج الحاسوبي، والقيام بنمذجتها.

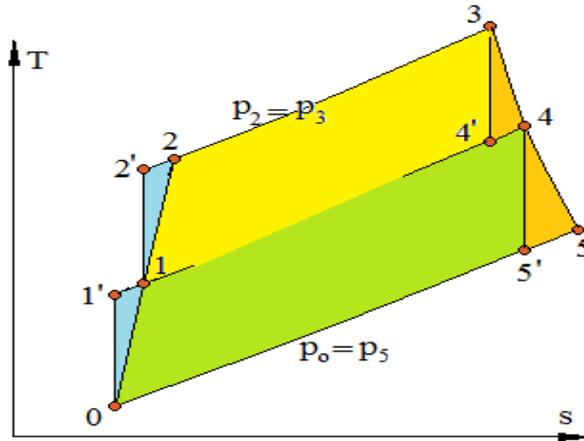
توصيف العمليات الديناميكية (الإقلاع-التسارع) الجارية في المحرك بواسطة معادلات رياضية من النوع المستقر بالزمن وذلك نتيجة لبطء هذه العمليات نسبياً.

معاملة المعادلات بطريقة (رانج-كتا) على خطوات زمنية صغيرة يُنتج النموذج عمليات التسارع والإقلاع، وتأثير كل البارامترات المتغيرة زمنياً على أداء المحرك.

**تعريف بالمحرك العنفي النفاث ثنائي المحور:**

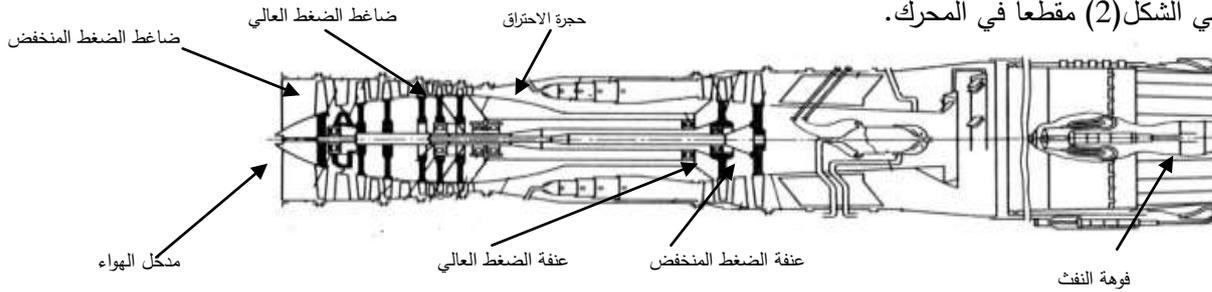
يتكون المحرك العنفي النفاث من مجموعة أجزاء تعمل بشكل متناسق بحيث تؤمن بالنتيجة جريان الدورة الترموديناميكية وإنتاج الطاقة المفيدة وبالشكل المناسب والشكل (1) يبين الدورة الترموديناميكية التي يعمل وفقها المحرك العنفي وتدعى دورة برايتون [6]، والتي تتكون من العمليات التالية: عنفي النفاث ثنائي المحور:

- (0-2) الانضغاط في الناشر (diffuser) والضغوط
- (2-3) تسخين في حجرة الاحتراق
- (3-5) التمدد في العنفة وأنبوب النفث
- (5-1) التبريد في الجو الخارجي



الشكل (1) الدورة الترموديناميكية التي يعمل وفقها المحرك النفاث

ويعطي الشكل (2) مقطعاً في المحرك.



الشكل (2) مخطط تصميمي لمحرك عنفي نفاث ثنائي المحور

يتأثر عمل أجزاء المحرك بعضها ببعض عند عملها المشترك في منظومة المحرك وخاصة الأجزاء المترابطة ميكانيكياً وغازوديناميكياً. إن هذا الترابط الغازوديناميكي والميكانيكي يشكل داخل المحرك وحدات مستقلة تصميمياً ومترابطة في عملها مع بعضها بعضاً. ويتصف كل منها بمميزات خاصة يمكن التعبير عنها بيانياً ورياضياً، لهذا فإن استخدام المميزات في وضع نموذج رياضي ديناميكي للمحرك يؤمن تقليد عمل المحرك بما فيه برامج التحكم والعمل المشترك مما يساعد على تقويم الأداء المثالي للمحرك.

#### 4- النموذج الرياضي الديناميكي للمحرك [2,7]:

النموذج الرياضي الديناميكي هو تمثيل رياضي لعمل المحرك يأخذ بعين الاعتبار كل المتغيرات الترموديناميكية على كل أجزاء المحرك كتابع للزمن. ويستخدم هذا النموذج في دراسة الأنظمة الانتقالية لعمل المحرك، ودراسة تأثير الظروف الخارجية المتحولة (زمنياً)، وكذلك دراسة تأثير عوامل التحكم على استقرار المحرك. يمكن توصيف العمليات الديناميكية (الإقلاع- التسارع-التباطؤ) الجارية في المحرك بواسطة معادلات رياضية من النوع المستقر بالزمن بسبب بطء هذه العمليات، وبمكاملتها على خطوات زمنية صغيرة يُنتج النموذج عمليات التسارع والتباطؤ والإقلاع كما يمكن أن ينتج تأثير كل البارامترات المتغيرة زمنياً على أداء المحرك. إن أساس النموذج الرياضي للعمليات الانتقالية في المحرك هي معادلة حركة الجزء الدوار (معادلة دوران جسم صلب حول محور).

$$J \frac{d\omega}{d\tau} = \sum M (1)$$

حيث: M - العزم المؤثر على القلب الدوار،  $\omega$  - السرعة الزاوية للقلب الدوار، J - عزم العطالة القطبي للقلب الدوار

يخصص هذا البحث لدراسة محرك عنفي نفاث ثنائي المحور، أي يملك دوارين منفصلين ميكانيكياً: دوار الضغط المنخفض ودوار الضغط المرتفع. بعد التعويض عن العزم والسرعة الزاوية بقيمتها من أجل كلا الدوارين (PBD, PHD) تأخذ المعادلة (1) الشكل التالي:

$$\frac{dn_{HD}}{d\tau} = \frac{900}{\pi^2 \cdot J_{HD} \cdot n_{HD}} (N_{THD} - N_{KHD}) (2)$$

$$\frac{dn_{BD}}{d\tau} = \frac{900}{\pi^2 \cdot J_{BD} \cdot n_{BD}} (N_{TBD} - N_{KBD}) (3)$$

يلاحظ من العلاقات الخاصة بالدوارين إن النموذج الرياضي يجب أن يتضمن حسابات استطاعات العنفات والضواغط كتابع للزمن ويتم ذلك بإجراء الحسابات الترموديناميكية لعمليات التمدد ورفع الضغط الجارية في المحرك (حسابات الدورة الترموديناميكية) وذلك باستخدام مميزات العنفات والضواغط.

### 5- تحديد العوامل الرياضية للنموذج الرياضي الديناميكي للمحرك [1]:

بما أن النموذج الرياضي الديناميكي هو من المستوى الصفري - حيث يمثل المحرك بمميزات أجزائه المعروفة سلفاً - وهو تمثيل رياضي لعمل المحرك يأخذ بعين الاعتبار كل المتغيرات الترموديناميكية على الأجزاء الأساسية للمحرك كتابع للزمن. سيتم في هذا البحث وضع نموذج ديناميكي كحالة تقريبية للحل باستخدام المميزات حيث يعتبر المحرك مستقراً في كل لحظة. ويتضح من العلاقات (2) و (3) أنه يجب البدء بوضع خوارزمية الحصول على الاستطاعات والتي يمكن الحصول عليها بواسطة الحسابات الترموديناميكية للمحرك على الأنظمة الانتقالية التي يمكن تقسيمها شكلياً إلى المراحل التالية:

● مرحلة الإقلاع.

● مرحلة التسارع حتى السرعة الاسمية.

#### 1-5 مرحلة الإقلاع:

تتضمن عملية الإقلاع تدوير المحرك من وضع الإيقاف وحتى الدوران البطيء. ويتم التدوير بواسطة مصدر استطاعة خارجي يسمى بالمقلع، الذي يتوقف عن العمل عندما تبدأ العنفة بإنتاج عمل كافي لتدوير الضاغط، وهنا نبدأ بحقن الوقود في حجرة الاحتراق كي تستطيع العنفة انجاز العمل المطلوب. إن خوارزمية حل النموذج الرياضي الديناميكي للمحرك أثناء الإقلاع يمكن صياغتها بناء على آلية الإقلاع المذكورة سابقاً، كما يلي:

إن خطوط عمل كلا الدوارين إضافة إلى استطاعة المقلع العنفي معروفة سلفاً من مميزات التشغيل للضاغط. وبالتالي فإن حل النموذج الرياضي الديناميكي يتم حسب تسلسل الحساب الترموديناميكي التالي:

$$G_{B0} = 0.0404 \cdot \frac{P_B^*}{\sqrt{T_B^*}} \cdot q(\lambda)_{HD} \cdot F_B \quad (4)$$

$$L_{KHD} = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot \left( \pi_{KHD}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_{KHD}} \quad (5)$$

$$T_K^* = 288 + \frac{L_{KHD}}{\frac{k}{k-1} \cdot R} \quad (6)$$

$$T_{KHD}^* = T_B^* \cdot \left( \frac{\pi_{KHD}^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{KHD}^*} + 1 \right) \quad (7)$$

$$T_K^* = T_{KHD}^* \cdot \left( \frac{\pi_{KBD}^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{KBD}^*} + 1 \right) \quad (8)$$

$$L_{KBD} = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot \left( \pi_{KBD}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_{KBD}} \quad (9)$$

$$L_K = L_{KHD} + L_{KBD} \quad (10)$$

$$q(\lambda_B)_{BD} = \frac{G_{B0} \cdot \sqrt{T_B^*}}{0.0404 \cdot P_B^* \cdot F_B} \quad (11)$$

$$T_{\Gamma}^* = \frac{G_{T\Sigma} \cdot H_u \cdot \eta_{\Gamma}}{G_B \cdot C_{\Pi}} + T_K^* \quad (12)$$

$$L_{TBD} = \frac{k_{\Gamma}}{k_{\Gamma} - 1} R_{\Gamma} \cdot T_{\Gamma}^* \left( 1 - \frac{1}{\pi_{TBD}^*} \right) \quad (13)$$

$$T_{TBD}^* = T_{\Gamma}^* - \frac{L_{TBD}}{\frac{k_{\Gamma}}{k_{\Gamma} - 1} R_{\Gamma}} \quad (14)$$

$$L_{THD} = \frac{k_{\Gamma}}{k_{\Gamma} - 1} R_{\Gamma} \cdot T_{TBD}^* \left( 1 - \frac{1}{\pi_{THD}^*} \right) \cdot \eta_{THD} \quad (15)$$

$$T_T^* = T_{TBD}^* - \frac{L_{THD}}{\frac{k_{\Gamma}}{k_{\Gamma} - 1} R_{\Gamma}} \quad (16)$$

$$L_{\Gamma BD} = L_{TBD} - L_{KBD} \quad (17)$$

$$N_{\Gamma BD} = L_{\Gamma BD} \cdot G_{B0} + N_{ST} \quad (18)$$

$$\frac{dn_{BD}}{d\tau} = \frac{900}{\pi^2 \cdot J_{BD} \cdot n_{BD}} N_{\Gamma BD} \quad (19)$$

$$N_{\Gamma HD} = (L_{THD} - L_{KHD}) \cdot G_{B0} \quad (20)$$

$$\frac{dn_{HD}}{d\tau} = \frac{900}{\pi^2 \cdot J_{HD} \cdot n_{HD}} N_{\Gamma HD} \quad (21)$$

$$\Delta n_{HD} = \frac{dn_{HD}}{d\tau} \cdot \Delta\tau \quad (22)$$

$$n_{HD} = n_{HD} + \Delta n_{HD} \quad (23)$$

$$\Delta n_{BD} = \frac{dn_{BD}}{d\tau} \cdot \Delta\tau \quad (24)$$

$$n_{BD} = n_{BD} + \Delta n_{BD} \quad (25)$$

### 2-5 مرحلة التسارع:

تتضمن عملية التسارع الانتقال من نظام الدوران البطيء وحتى السرعة الاسمية العظمى. حيث يتم التحكم بعملية التسارع عن طريق مقود الوقود من قبل الطيار أي التحكم بكمية الوقود المقدمة إلى حجرة الاحتراق والتي تحدد مقدار التسارع.

يتم حساب أنظمة العمل المشترك للمحرك المدروس بعد الأخذ بعين الاعتبار مميزات الدوار للضغط المرتفع المعروفة سابقاً (مميزة الضاغط وموضع خط العمل.....الخ). لذلك يجب تحديد نقاط عمل على منحنى التشغيل لضغط الضغط المنخفض باستخدام شروط العمل المشترك من شرط تساوي غزارة الهواء عند مخرج ضاغط الضغط المنخفض وعلى مدخل ضاغط الضغط المرتفع، وكذلك تساوي استطاعة ضاغط الضغط المنخفض مع استطاعة عنفة الضغط المنخفض.

$$\left. \begin{aligned} G_{BBD} &= G_{KHD} \\ N_{KHD} &= N_{THD} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

كما يجب الاستفادة من مميزات دوار الضغط العالي ومميزة ضاغط الضغط المنخفض المعطاة على شكل مخطط في الشروط المحولة إلى الشروط النظامية.

$$\pi_{KHD}^*, \eta_{KHD}^* = f(n_{HD,np}, q(\lambda_B)) \quad (27)$$

$$\tau_{KHD}^* = f(n_{HD,np}, q(\lambda_B)) \quad (28)$$

إن وجود المواصفات السابقة يسمح بالاستغناء عن استخدام معادلة الغازة على مدخل ومخرج ضاغط الضغط المنخفض.

يمكن أن تعطى مميزة عنفة الضغط المنخفض بالعلاقة التالية:

$$\bar{L}_T = \left( \frac{L_{THD}}{T_{TBD}^*} \right) \left/ \left( \frac{L_{THD0}}{T_{TBD0}^*} \right) = 1.11 * \bar{\pi}_{THD} - 0.11 \quad (29)$$

$$\bar{\pi}_{THD}^* = \frac{\pi_{THD}^*}{\pi_{THD0}^*} \quad (30)$$

يمكن تحويل معادلة الغازة بعد الأخذ بعين الاعتبار أن:

$$P_{KHD}^* = P_{BBD}^* \text{ و } T_{KHD}^* = T_{BBD}^* \quad (31)$$

إلى الشكل التالي:

$$q(\lambda_K)_{HD} = A_2 \cdot q(\lambda_B)_{BD} \quad (32)$$

حيث  $A_2$  عامل تُحدد قيمته بالاستناد إلى البارامترات  $q(\lambda_B)_{BD}$ ،  $q(\lambda_B)_{HD0}$  على أنظمة العمل الحسابية وتؤخذ قيمة  $q(\lambda_K)_{HD}$  من مميزات ضاغط الضغط المنخفض المعطاة في الإحداثيات:

$$q(\lambda_B)_{BD} = f(n_{BD,np}, q(\lambda_K)_{BD}) \quad (33)$$

$$\tau_{KHD}^* = f(n_{BD,np}, q(\lambda_K)_{BD}) \quad (34)$$

أما معادلة توازن الاستطاعة فيمكن ان نكتب على النحو التالي:

$$L_{KHD} = (1 + g_T) \cdot (1 - g_{ot6}) \cdot L_{THD} \quad (35)$$

$$C_P \cdot T_B^* \cdot (\tau_{KHD}^* - 1) = (1 + g_T) \cdot (1 - g_{ot6}) \cdot T_{TBD}^* \cdot \bar{L}_T \cdot \frac{L_{THD0}}{T_{TBD0}^*} \quad (36)$$

$$\frac{T_{TBD0}^*}{T_B^*} = \tau_{KHD}^* \cdot \tau_{\Gamma TBD}^* \quad (37)$$

وبهذا يمكننا كتابة:

$$\tau_{KHD}^* = \frac{1}{(1 - A_3 \cdot \tau_{\Gamma TBD}^* \cdot \bar{L}_T)} \quad (38)$$

وهكذا فإن حساب أنظمة العمل المشترك ورسم منحنيات التشغيل على مميزات ضاغط الضغط المنخفض تتم حسب التسلسل المبين سابقاً، وذلك باستخدام برنامج حاسوبي بعد حساب كلاً من:

1. نسبة ارتفاع الضغط لضغط الضاغط المرتفع والتي تحدد بناء على معرفة موضع منحنى التشغيل.

2. الكثافة النسبية لخيوط التيار (إمكانية التمرير).

3. مردود ضاغط الضغط المرتفع.

6- وضع نموذج رياضي ديناميكي لمحرك عنفي نفث ثنائي المحور [4,5]:

لحل النموذج الرياضي الديناميكي للمحرك المدروس يجب استخدام المميزات التشغيل الحقيقية وحساب عزوم العطالة القطبية.

### 1-6 مميزات المحرك

تعرف الميزة بأنها العلاقة بين البارامترات التي تحدد وتصف نتائج عمل الجزء المدروس و البارامترات التي تحدد نظام عمل هذا الجزء.

### 1-1-6 الضاغط

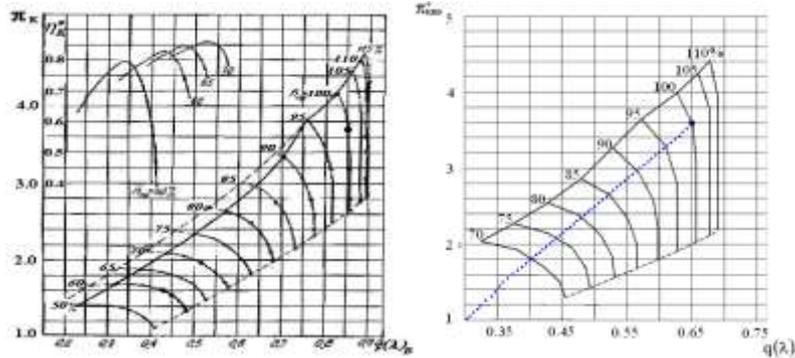
تعرف مميزة الضاغط على أنها علاقة البارامترات التي تحدد عمل الضاغط (نسبة الانضغاط، المردود) بالبارامترات التي تصف نظام عمل الضاغط (غزارة الهواء، سرعة الدوران....).

الضاغط المركب على المحرك المدروس هو ضاغط محوري ثنائي المحور يتألف من:

1. ضاغط الضغط المنخفض فيه نسبة رفع الضغط النظرية  $\pi_{KHD}^* = 3.5$

2. ضاغط الضغط المرتفع فيه نسبة رفع الضغط النظرية  $\pi_{KBD}^* = 3.8$

والشكل (3) يبين مميزات ضاغطي المحرك:



الشكل (3-أ) الشكل (3-ب)

الشكل (3) مميزة ضاغطي المحرك : أ- الضغط المنخفض ب- ضاغط الضغط العالي

يعبر عن مميزة الضواغط بالعلاقة بين نسبة رفع الضغط  $\pi^*$  وسرعة الدوران  $n$  والكثافة النسبية لخيوط التيار

(إمكانية التمرير) على مدخل الضاغط  $q(\lambda_B)$ . كما هو موضح بالعلاقة التالية:

$$\pi^* = f(n, q(\lambda_B)) \quad (39)$$

$$\eta^* = f(n, q(\lambda_B)) \quad (40)$$

من خلال هذا الشكل نلاحظ أن المميزات تحتوي على أجزاء (خطوط) عمودية تقريباً، لذا فإن إدخال هذه الميزة إلى الحاسوب عملية صعبة جداً وغير ممكنة لذا تم تحويل هذه الميزة إلى شكل أبسط بحيث يتم تلافي هذه السلبية وبالتالي يسهل استخدامها في الحاسوب. حيث يتم تحويل المميزات إلى الإحداثيات الجديدة التي أصبحت تعبر

عن العلاقة بين نسبة رفع الضغط  $\pi^*$  ونسبة التسخين خلال الضاغط  $\tau^*$  بالعامل  $\Pi$  وسرعة الدوران  $n$  كما هو موضح بالعلاقة التالية:

$$\pi^* = f(\Pi, n) \quad (41)$$

$$\tau^* = f(\Pi, n) \quad (42)$$

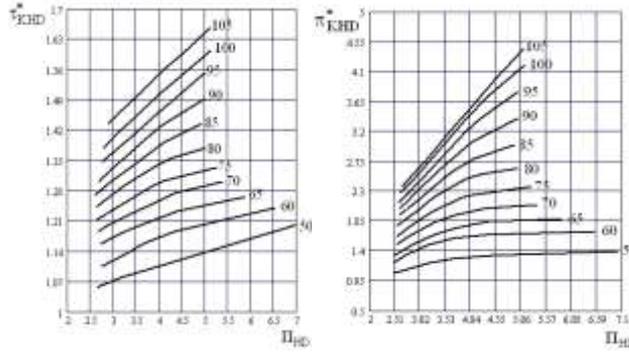
$$\Pi = \frac{\pi^*}{q(\lambda)_B} \quad \text{حيث أن:} \quad (43)$$

$$\tau^* = 1 + \frac{\pi^{*\frac{K-1}{K}} - 1}{\eta} \quad (44)$$

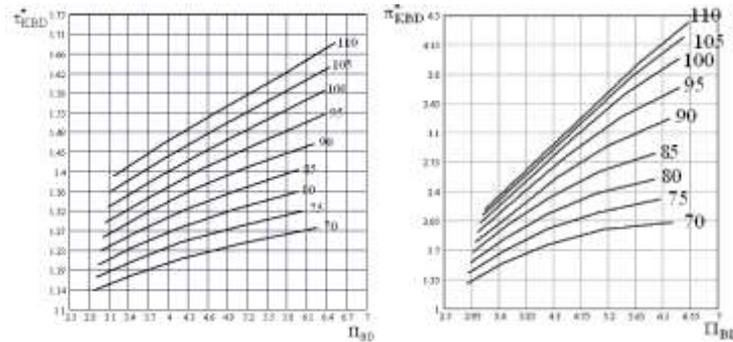
بعد اجراء عملية التحويل تم الحصول على المعادلات التي تعبر عن شكل المميّزة الجديدة والتي يعبر عنها بالعلاقات التالية:

$$\left. \begin{aligned} \pi^* &= a(\Pi_{(n)}^2) + b(\Pi_{(n)}) + c \\ \tau^* &= d(\Pi_{(n)}^2) + e(\Pi_{(n)}) + f \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

أما شكل هذه المميّزات فهو موضح في الشكل (4) الشكل (5).



الشكل (4) مميّزة ضاغط الضغط المنخفض في الاحداثيات الجديدة



الشكل (5) مميّزة ضاغط الضغط المرتفع في الاحداثيات الجديدة

**ملاحظة:** يتم في نظرية المحركات الجوية [1] البرهان إن نسبة التمدد على عفة الضغط المرتفع ثابتة يعني أن ضاغط الضغط المرتفع يملك منحنى تشغيل ثابت على المميّزة كما في الشكل (3). هذه الصفة تسهل إلى حد كبير نمذجة دوران الضغط العالي.

### 2-1-6 العنفة:

تعرف مميزة العنفة على أنها علاقة كل من بارامتر الغزارة وبارامتر العمل والمردود بنسبة الانتشار على العنفة ودرجة الحرارة أمام العنفة وهذه المميزة موضحة في الشكل (6).

• المعروف أن نسبة الانتشار على عنفة الضغط المرتفع تكون ثابتة. لذلك تعطى مميزتها على شكل خط مستقيم كما هو موضح في العلاقات التالية:

$$\tau_{TBD}^* = \frac{T_{\Gamma}^*}{T_{TBD}^*} = \text{const} \quad (46)$$

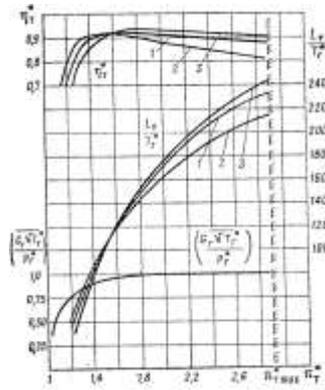
$$\pi_{TBD}^* = \text{const} \quad (47)$$

• أما مميزة عنفة الضغط المنخفض فيجب استخدامها على اعتبار أن صفاتها تتغير حسب مساحة المقطع الحدي لأنبوب النفث  $F_{KP}$  ويتم إدخال المميزة إلى الحاسوب باستخدام العلاقات التالية:

$$\frac{G_{\Gamma} \sqrt{T_{\Gamma}^*}}{P_{\Gamma}^*} = \left( \frac{n}{\sqrt{T_{\Gamma}^*}}, \pi_{THD}^* \right) \quad (48)$$

$$\pi_{THD}^* = f(F_{KP}) \quad (49)$$

$$\eta_{THD}^* = \left( \frac{n}{\sqrt{T_{\Gamma}^*}}, \pi_{THD}^* \right) \quad (50)$$



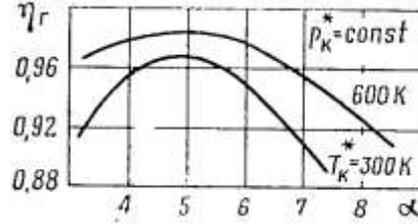
الشكل (6) مميزة العنفة المعممة

### 3-1-6 حجرة الاحتراق

تعرف مميزة حجرة الاحتراق بأنها علاقة عامل الاحتراق  $\eta_{\Gamma}$  بمجموعة البارامترات التي تحدد عمل حجرة الاحتراق وأهم هذه البارامترات عامل فائض الهواء  $\alpha$ ، ودرجة الحرارة والضغط خلف الضاغط وكذلك درجة الحرارة على مخرج الحجرة نفسها.

بما أن تغير عامل الاحتراق  $\eta_{\Gamma}$  قليل كتابع لسرعة الدوران، وعامل انخفاض الضغط  $\sigma_{KC}$  يتغير بشكل بسيط

$$\sigma_{KC} = 0.98 \quad \eta_{\Gamma} = 0.97 \quad \text{فإن هذه القيم تعطى كقيم ثابتة:} \left( \frac{T_{\Gamma}^*}{T_K^*}, \lambda_K \right)$$



الشكل (7) مميزة حجرة الاحتراق

## 4-1-6 أنبوب النفث

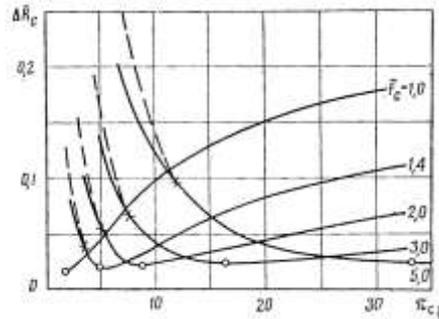
تعرف مميزة أنبوب النفث بأنها علاقة عامل قوة الدفع بكل من نسبة الانتشار المتاحة ورقم ماخ للطيران. تعتبر قيمة المقطع الحدي لأنبوب الخروج هي القيمة المؤثرة على عنفة الضغط المنخفض وتعطي هذه القيمة بدلالة  $q(\lambda)_{KP}$  في المقطع الحدي والذي يحدد على أساس قيمة نسبة الانتشار الممكنة في أنبوب الخروج. (51)

$$\pi_{CP}^* = \frac{P_T^*}{P_H} \cdot \sigma_{\Phi K}$$

فعندما تكون  $\pi_{CP}^* \geq \pi_{CP,P}^*$  فإن قيمة  $q(\lambda)_{KP} = 1$ ، أما إذا كانت  $\pi_{CP}^* \leq \pi_{CP,P}^*$  فإن

$$q(\lambda)_{KP} = \lambda_{KP} \left( \frac{K_{\Gamma} - 1}{2} \right)^2 \cdot \left( 1 - \frac{K_{\Gamma} - 1}{K_{\Gamma} + 1} \right) \cdot \lambda_{KP}^2$$

$$\lambda_{KP} = \sqrt{\frac{K_{\Gamma} + 1}{K_{\Gamma} - 1} \left( 1 - \frac{1}{\frac{\pi_{CP}^*}{K_{\Gamma}} \cdot \frac{K_{\Gamma} - 1}{K_{\Gamma} + 1}} \right)} \quad (52)$$



الشكل (8) مميزة أنبوب النفث

## 2-6 حساب عزوم العطالة القطبية لكلا الدوران [3]:

يتم حساب عزوم العطالة من أجل تحديد العوامل الرياضية لحل المعادلة الديناميكية للمحرك، وللتبسيط تم افتراض شكل تصميمي لدوراني الضاغط و تم الحساب وفق التسلسل الآتي:

## 1-2-6 حساب عزم العطالة القطبي لدوار الضغط المنخفض:

يتألف دوار الضغط المنخفض من ضاغط الضغط المنخفض وعنفة الضغط المنخفض ومحور الضغط المنخفض. يتألف ضاغط الضغط المنخفض من خمس مراحل كل مرحلة تحتوي في جزئها الدوار على قرص دوار الذي يركب عليه الشفرات الدوارة إضافة إلى المحور الذي تتركب عليه المراحل الخمسة وهو من النوع القرصي الطبلي. تتألف عنفة الضغط المنخفض من مرحلة واحدة تحوي القرص المركب عليه الشفرات المتحركة إضافة للمحور الذي تثبت

عليه القرص والذي يقوم بنقل عزم الفتل من العنفة إلى الضاغط. محور دوار الضغط المنخفض مفرغ من الداخل وينقل عزم الفتل من العنفة إلى الضاغط ويتألف من محور العنفة ومحور الضاغط. عزم العطالة القطبي للقلب الدوار هو مجموع عزوم العطالة لكل من الأقراص والمحاور والشفرات لذا تم حساب عزم العطالة لكل جزء على حدة، وباستخدام الحزمة البرمجية MathCAD تم الحصول على عزوم العطالة القطبي لدوار الضغط المنخفض المبينة في الجدول (1):

الجدول (1) قيم عزوم العطالة القطبية لدوار الضغط المنخفض

عزم عطالة المنخفض	عزم عطالة المحاور	عزم عطالة الشفرات	عزم عطالة الأقراص
[kg.m <sup>2</sup> ]	[kg.m <sup>2</sup> ]	[kg.m <sup>2</sup> ]	[kg.m <sup>2</sup> ]
19.188	0.1286	7.1175	10.848

### 2-2-6 حساب عزم العطالة القطبي لدوار الضغط المرتفع:

يتألف دوار الضغط المنخفض من: ضاغط الضغط المرتفع، عنفة الضغط المرتفع ومحور الضغط المرتفع. يتألف ضاغط الضغط المرتفع: من ست مراحل وهو من النوع القرصي طبلي حيث تحوي كل مرحلة على قرص دوار والشفرات المتحركة المثبتة عليه. عنفة الضغط المرتفع عبارة عن مرحلة واحدة وهي تتألف من: القرص الدوار والشفرات المتحركة المركبة عليه. محور دوار الضغط المرتفع مفرغ من الداخل ويتكون من محور العنفة ومحور الضاغط.

تتم عملية حساب عزم العطالة القطبي للقلب الدوار ذو الضغط المرتفع بنفس الطريقة التي تم فيها حساب عزم العطالة القطبي للقلب الدوار ذو الضغط المنخفض.

بعد ذلك تم الحصول على قيم عزوم العطالة القطبية كما هو موضح في الجدول (2):

الجدول (2) قيم عزوم العطالة القطبية لدوار الضغط المرتفع

عزم عطالة دوار الضغط المرتفع	عزم عطالة المحاور	عزم عطالة الشفرات	عزم عطالة الأقراص
[kg.m <sup>2</sup> ]	[kg.m <sup>2</sup> ]	[kg.m <sup>2</sup> ]	[kg.m <sup>2</sup> ]
29.84	2.273	4.229	16.398

### النتائج والمناقشة:

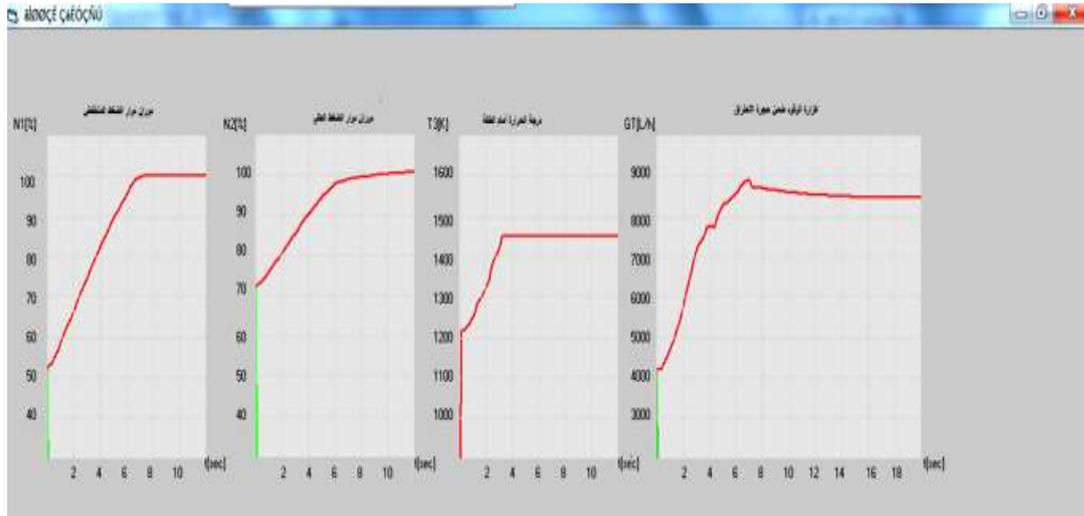
كنتيجة لهذا البحث تم الحصول على نموذج رياضي ديناميكي للمحرك العنفي النفاث ثنائي المحور يعكس العمليات الترموديناميكية والديناميكية الجارية في المحرك أثناء عمله. ومن خلال حل ومعالجة النموذج الرياضي الديناميكي بعد وضع برنامج بلغة VB-6 تم تمثيل عمل المحرك، وباستخدام تقنيات إظهار النتائج على ثلاث شاشات إحداها لإظهار مخططات الإقلاع تمثل تغير بارامترات المحرك خلال مرحلة الإقلاع.

يظهر الشكل (14) تغير بارامترات المحرك من سرعة دوران دوار الضغط المنخفض والعالي ودرجة الحرارة أمام العنفة وكيف يتم تقديم الوقود ضمن حجرة الاحتراق خلال مرحلة الإقلاع حتى الاستقرار على نظام البطيء الأرضي.



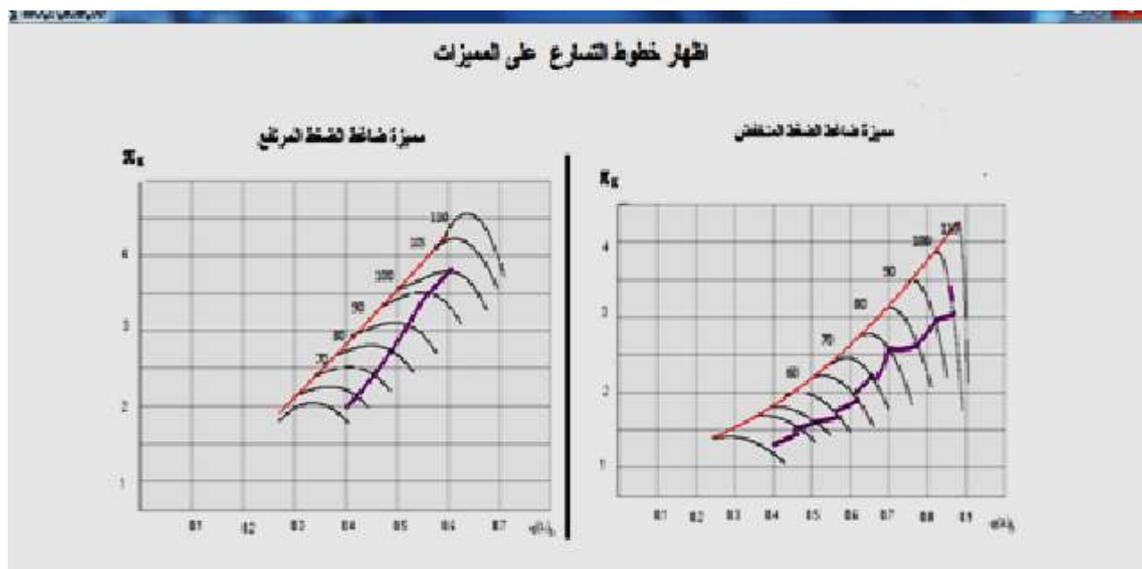
الشكل(14) تغير البارامترات كتابع للزمن أثناء إقلاع المحرك

كما ويظهر الشكل ( 15 ) تغير بارامترات المحرك من سرعة دوران دوار الضغط المنخفض والعالي ودرجة الحرارة أمام العنفة وكيف يتم تقديم الوقود ضمن حجرة الاحتراق خلال مرحلة التسارع من نظام البطيء الأرضي حتى الاستقرار على السرعة الاسمية العظمى.



الشكل (15) تغير البارامترات كتابع للزمن أثناء التسارع

ويظهر الشكل ( 16 ) توضع خطوط التسارع على مميزات تشغيل الضواغط العالي والمنخفض أثناء تنفيذ التسارع.



الشكل (16) خطوط التسارع كما تظهر على مميزات التشغيل للضواغط

### الاستنتاجات والتوصيات:

مما سبق يمكن القول أن النموذج الرياضي المصمم في هذا البحث يحاكي عم لمحرك عنفي نفاث ثنائي المحور من حيث: شكل تغير البارامترات، إظهار الترابط والتأثير المتبادل فيما بينها، تغيرها مع الزمن وذلك خلال العمليات الانتقالية، و القيم التي يستقر عندها في نهاية كعملية انتقالية، حيث تظهر المخططات السابقة استقرار وثبات بارامترات المحرك الرئيسية مع مرور الزمن طالما كان مقود الوقود في وضع ثابت وهذه الصفة من صفات النموذج (وهي صفة الاستقرار).

وفي هذا النموذج يمكن تغيير أجزاء المحرك من خلال تغيير مميزة التشغيل الخاصة به، والشكل الهندسي والكتلي، وبرامج التحكم المقترحة، ودراسة تأثير ذلك على قيم البارامترات النهائية والاستقرار، وهذا مفيد في مرحلة التصميم الأولي.

كما يظهر في كل العمليات الانتقالية: منحنيات التشغيل للضواغط والحرارة أمام العنفة وسرع الدوران للدوارين واستهلاك الوقود وتغيرها مع الزمن، ويمكن أن نظهر وندرس تغير أي بارامتر خلال العملية الانتقالية وتأثير باقي البارامترات والمتغيرات عليه.

ووفق الهدف الذي تم وضع هذا النموذج الرياضي لأجله يمكن تطوير النموذج ليحاكي عمل المحرك عند العمليات الديناميكية السريعة ودراسة الأنظمة غير المستقرة للمحرك ودرجة استقرار المحرك عند التعرض لها.

### المراجع:

- 1 - سليمان، علي. نظريات المحركات العنفية الجوية، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية، حلب 2001.
- 2 - سليمان، علي. الحسابات الترموديناميكية والغازوديناميكية وحساب المميزات لمحرك جوي عنفي نفاث، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية، حلب 2001.
- 3 - أبو عمر، تيسير. تصميم المحركات العنفية الجوية، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية، حلب 2004.

- 4- Р.М ФЕДОРОВ. В.Н ;ФОМИН . А.М. БУТРВ Н.Е. ЖУКОВСКОГР  
ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПРЕССОРОВ Альбом, ИЗДАНИЕ ВВИА , 1989.  
4 - فيودروفومين; بوتزف.جوكوفسكا. الخواص الايروديناميكية للضواغط, 1989
- 5- JET ENGINE ROLLS-ROYCE plc, 2010.
- 6- بطل، محمد عطا; داوود، صلاح. الترموديناميك وانتقال الحرارة، منشورات جامعة تشرين، 2016.
- 7- Daniel A.O' Neil ,MikelD.petty- Organizational simulation for model based systems engineering- Procedia computer science – 2013,Vol 16.