

تحسين فعالية محرك نبضي نفاث بدون صمامات من خلال رفع الضغط الأولي لحجرة الاحتراق

طالب الدراسات العليا: مروه اسد

كلية: الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة: البعث

الدكتور المشرف: محمد عبده باكير

الملخص

يهدف البحث إلى الدراسة والتقييم الترموديناميكي لمحرك هجين لنوعين من المحركات: المحرك النفاث النبضي والمحرك العنفي، حيث تم دراسة امكانية استخدام المحرك العنفي كضاغط، يعطي كمية من الهواء المضغوط الفائض ليستخدم لتشغيل المحرك النبضي عديم الصمامات، إضافة الى عمله الأساسي كمحرك عنفي نفاث كامل يعطي قوة دفع، وبالتالي دراسة امكانية الاستخدام المختلط للمحرك العنفي والمحرك النبضي معاً لإنتاج الدفع للطائرة. حيث تم استنتاج أفضل قيمة لنسبة استنزاف الهواء المضغوط من ضاغط المحرك العنفي إلى المحرك النبضي عديم الصمامات، وبمقارنة أداء المحرك المقترح مع أداء المحرك العنفي النفاث التقليدي، وصلت نسبة التحسن عند بارامترات التشغيل الأفضل لعمل المحرك الى 55% عند قوة الدفع، 25% عند الاستهلاك النوعي للوقود، 15% للمردود الحراري، و3% لمردود الدفع.

الكلمات المفتاحية:

محرك عنفي نفاث - محرك نبضي نفاث - دورة همفري - دورة برايتون.

Increase the Efficiency of Valveless Pulsejet Engine by Raising the Initial Pressure

Abstract

This paper aims to study and analysis the thermodynamic properties of the proposed engine, and the ability of using Turbo engine as compressor that generates pressed air to be used in running the Pulsejet engine besides of its basic work as a complete Turbo engine that produces impulse force, then ability hybrid using both Pulse engine and Turbo engine to produce the impulse for plane. Moreover, we will get the best value of pressed air mass ration from Turbo engine to Pulse engine, and compare properties results of the proposed engine with classical Turbo engine. Improving ration reaches to 55% for thrust, 25% for specific fuel consumption, 15% for thermal efficiency and 3% for propulsive efficiency.

Keywords:

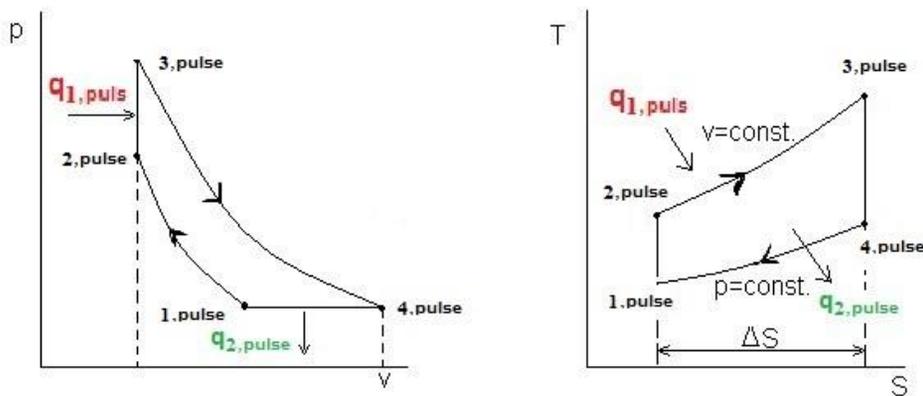
Turbojet Engine, Pulsejet Engine, Humphrey Cycle, Briton Cycle

1- مقدمة:

المحركات النفاثة النبضية هي نوع من المحركات النفاثة اللاعنفية تعمل على مبدأ الاحتراق تحت حجم ثابت في حجرة احتراق خاصة مما يؤدي الى ازدياد الضغط بدون استخدام ضاغط ميكانيكي، ثم يتم التمدد في انبوب خاص [1].
تمتاز هذه المحركات ببساطة التصميم حيث لا تحتوي على اجزاء متحركة (لا عنفة ولا ضاغط) مما يجعلها نموذجاً فريداً بين المحركات يقترب من المحركات الصاروخية. [6]

2- الدورة الترموديناميكية للمحرك النبضي ذو الانضغاط الأولي:

المحرك النبضي ذو الانضغاط الأولي هو محرك دفع غير تقليدي يتم تأمين الهواء المضغوط الداخل اليه بطرق مختلفة، يعمل وفق دورة ترموديناميكية رباعية هي دورة همفري. يبين الشكل رقم (1) الدورة المذكورة في الاحداثيات $p-v$ والاحداثيات $T-S$: [8]



الشكل (1) : الدورة الترموديناميكية للمحرك النبضي ذو الانضغاط الأولي

تجري دورة همفري ذات الانضغاط الأولي في المحرك النبضي على النحو التالي: [2]

✓ يتم ضغط الغاز العامل (الهواء الجوي) في ضاغط مناسب من الضغط الجوي

$P_a = P_{1,pulse}$ وحتى الضغط $P_{2,pulse}$. ويستهلك أثناء ذلك عملاً خارجياً.

- ✓ يتم بعد ذلك تسخين الهواء المضغوط بتقديم كمية الحرارة و قدرها $q_{1,pulse}$ من مصدر خارجي (وقود) ويتم التسخين تحت حجم ثابت مما يسبب ارتفاع ضغط الغاز العامل حتى القيمة $P_{3,pulse}$.
- ✓ يتم بعد ذلك تمدد الغاز العامل في أنبوب نفث مناسب من الضغط $P_{3,pulse}$ وحتى الضغط $P_{4,pulse}$ والذي يساوي الضغط الجوي $P_{1,pulse}$. وينتج عن ذلك عمل للاستخدام الخارجي (على شكل طاقة حركية تنتج قوة دفع).
- ✓ يتم بعد ذلك تبريد الغاز العامل تحت ضغط ثابت من النقطة (4,pulse) الى النقطة (1,pulse). ويتم ذلك عملياً باستبدال الغاز العامل بهواء جوي جديد ونبذ كمية من الحرارة $q_{2,pulse}$.
- ✓ ان التسخين تحت حجم ثابت يحتاج إلى إغلاق حجرة التسخين في لحظة إضافة الحرارة، ويجب أن يتم بعد ذلك فتح الحجرة للسماح بتمدد الغاز الذي تم تسخينه. إن ذلك يعني إغلاق وفتح حجرة الاحتراق بشكل متكرر مما يعني أن دورة همفري هي من النوع التكراري الذي ينتج " دفعات " من العمل على شكل طاقة حركية، تنتج " نبضات " من قوة الدفع وليس دفعاً مستمراً. وهي أقرب إلى دورات المحركات المكبسية التكرارية منها إلى دورة المحرك العنفي المستمرة. [6]
- ✓ ومن هنا أيضاً تسمية المحرك الذي يعمل وفقها " بالمحرك النبضي ".
- ✓ المميزات الترموديناميكية لهذه الدورة هي:

$$\beta = \frac{P_{2,pulse}}{P_{1,pulse}} \quad , \quad \Gamma = \frac{P_{3,pulse}}{P_{2,pulse}} = \frac{T_{3,pulse}}{T_{2,pulse}}$$

حيث:

β : نسبة الانضغاط الأولية خارج المحرك النبضي.

Γ : نسبة ارتفاع الضغط في حجرة احتراق المحرك النبضي.

✓ فانه يمكن استنتاج عمل الدورة ومردودها الحراري اللذان يمكن إعطائهما بالعلاقة
النهائية التالية:

✓ العمل:

$$W = q_{1,pulse} - q_{2,pulse} = C_{VG} \cdot (T_{3,pulse} - T_{2,pulse}) - C_{PG} \cdot (T_{4,pulse} - T_{1,pulse})$$

$$W = \frac{R_G T_1}{k_G - 1} \cdot \left[\beta^{\frac{k_G - 1}{k_G}} \cdot (\Gamma - 1) - k_G \cdot (\Gamma^{\frac{1}{k_G}} - 1) \right]$$

حيث:

C_{VG} : السعة الحرارية النوعية لغازات الاحتراق عند حجم ثابت.

C_{PG} : السعة الحرارية النوعية لغازات الاحتراق عند ضغط ثابت.

k_G : الأس الأديباتي لغازات الاحتراق

R_G : الثابت النوعي لغازات الاحتراق

✓ المردود الحراري:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{2,pulse}}{q_{1,pulse}}$$

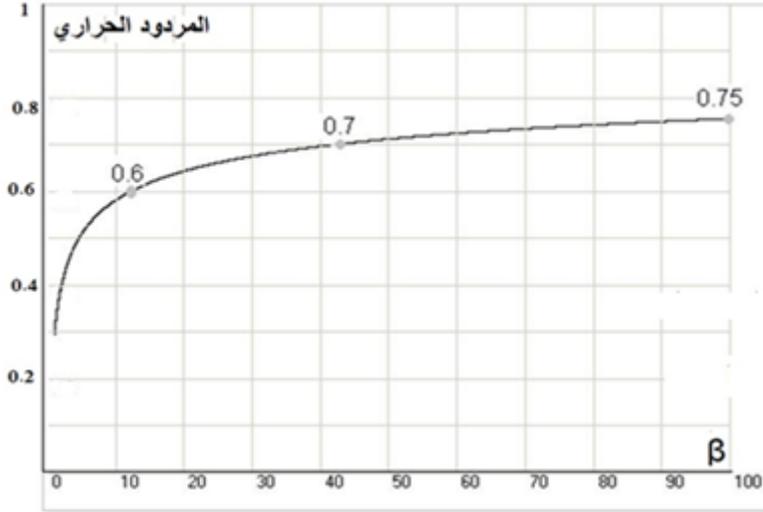
$$\eta_{th} = 1 - \frac{k_G \cdot (\Gamma^{\frac{1}{k_G}} - 1)}{\beta^{\frac{k_G - 1}{k_G}} \cdot (\Gamma - 1)}$$

يلاحظ من العلاقات السابقة أن عمل دورة همفري ومردودها النظري يتعلقان بكل من نسب الانضغاط في الضاغط ونسبة التسخين في حجرة الاحتراق التي تتعلق بدورها بنسبة الانضغاط. [5]

يمكن التعويض عن Γ في العلاقات السابقة بالعلاقة:

$$\Gamma = \frac{P_{3,pulse}}{P_{2,pulse}} = \frac{T_{3,pulse}}{T_{2,pulse}} = \frac{T_{3,pulse}}{T_{1,pulse} \cdot \beta^{\frac{k_G-1}{k_G}}}$$

عند دراسة علاقة المردود بنسبة الانضغاط المبينة في الشكل التالي (2) سمح باستنتاج ما يلي: [8].



الشكل (2): علاقة المردود الحراري مع نسبة الانضغاط

1- تمتلك دورة همفري (الدورة الترموديناميكية للمحرك النبضي مع انضغاط أولي) مردوداً حرارياً قيمته (0.27 - 0.2) عند عدم وجود انضغاط أولي. أي أن المحرك العامل وفق هذه الدورة يمكن مبدئياً أن يعمل بدون وجود ضاغط. لذلك كانت النماذج الأولى للمحركات النبضية مصنوعة بدون ضاغط ميكانيكي. واعتمد على الانضغاط الناتج عن التسخين فقط لجريان الدورة.

2- يمكن زيادة مردود هذه الدورة بزيادة نسبة الانضغاط. ويزداد سريعاً حتى نسبة انضغاط (10 - 12) حيث يصل المردود النظري إلى (0.6)، بعدها تتباطأ الزيادة في المردود بشكل واضح.

فمثلاً: إن زيادة الانضغاط من 12 إلى 42 (بمقدار 3.5 ضعف تؤدي إلى زيادة المردود بمقدار 10% فقط، وتؤدي زيادة نسبة الانضغاط حتى 100 (بمقدار 8 أضعاف) إلى زيادة المردود بمقدار 15% فقط. فإذا أخذنا بعين الاعتبار الصعوبة التقنية من جهة، وانخفاض المراديد الحقيقية للضواغط ذات الانضغاط العالي من جهة أخرى، يمكن أن نستنتج أن نسبة الانضغاط المناسبة لهذا النوع من الدورات الترموديناميكية (وللمحركات المبينة على أساسها) تقع في المجال $\beta=10-20$ حيث المردود النظري η_{th} يأخذ القيمة (0.58-0.65).

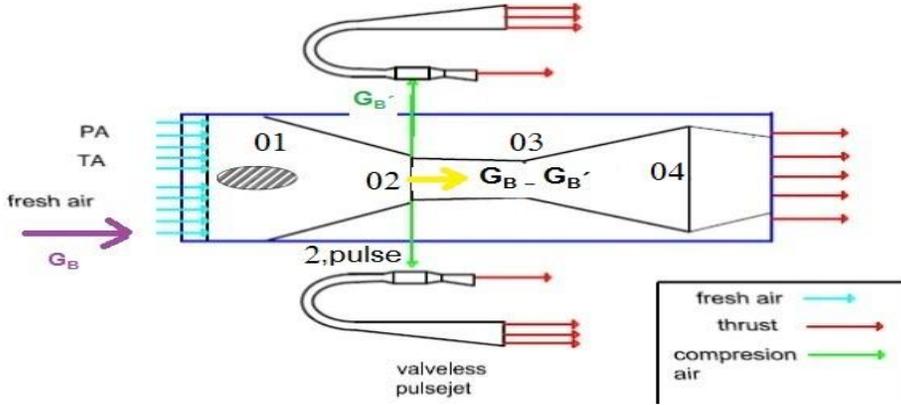
3- إن استخدام ضاغط ميكانيكي في الدورة (في المحرك النبضي) يفقد هذا النوع من المحركات ميزة مهمة هي بساطة التصميم وعدم وجود أجزاء متحركة فيه، لكنه يكسبه ميزة المردود الجيد مما يفتح آفاقاً لاستخدامه في الطيران كمحرك أساسي أو إضافي.

3- دراسة ترموديناميكية للمحرك العنفي النبضي عديم الصمامات (المحرك المقترح):

3-1- المخطط الرمزي لأجزاء المحرك العنفي النبضي المقترح:

إن المخطط الرمزي المقترح للمحرك الهجين موضح بالشكل (3)، وهو مكون من جزئين أساسيين:

- محرك عنفي تقليدي أو منتج للغاز المضغوط مهمته الأساسية تقديم الهواء المضغوط بالكمية والضغط اللازمين للمحرك النبضي، كما يشارك بتقديم قوة دفع كمحرك نفث.
- محرك نبضي عديم الصمامات مكون فقط من حجرة احتراق تنتهي بجزئي أنبوب نفث بطول مناسب، ويأخذ الهواء اللازم لتشغيله من خلف ضاغط المحرك العنفي، والذي يجب أن يصمم من أجل هذه الغاية.



الشكل (3) المخطط الرمزي للمحرك العنفي النبضي النفاث المقترح

حيث:

G_B : التدفق الكتلي للهواء الداخل الى ضاغط المحرك العنفي النفاث.

G_B' : التدفق الكتلي للهواء المستنزف الى المحرك النبضي من المحرك العنفي.

2-3 - حساب الدورة الترموديناميكية للمحرك العنفي النبضي: (Turbo - Pulse Engine TPE)

إن الدورة الترموديناميكية الحقيقية للمحرك العنفي هي دورة برايتون المؤلفة من أربعة

عمليات ترموديناميكية كما في الشكل(4):[3]

✓ يضغط الهواء من النقطة 1 إلى النقطة 2 بواسطة الضاغط وفق عملية كظيمة عكوسة.

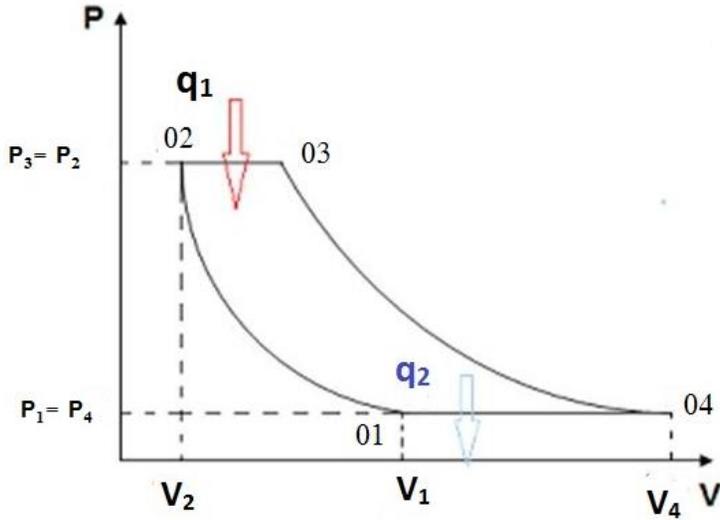
✓ تسخينه تحت ضغط ثابت من النقطة 2 إلى النقطة 3 في حجرة احتراق.

✓ يدخل الغاز الساخن إلى العنفة فيتمدد وفق عملية كظيمة تنتج العمل المطلوب لعمل الضاغط.

✓ يتابع تمدده بنفس العملية في فوهة النفط معطياً الدفع المطلوب

✓ تبريد الغاز العامل ويتم في الوسط الخارجي (عملياً بتبديل الهواء بهواء جديد).

ولا تتم العمليات السابقة في المحركات الحقيقية بشكل أدبياتي _ كما يفترض وإنما تتم بشكل بوليتروبي، بسبب الضياعات المتنوعة التي ترافقها والتي تؤدي إلى انخفاض عمل الدورة.[2]



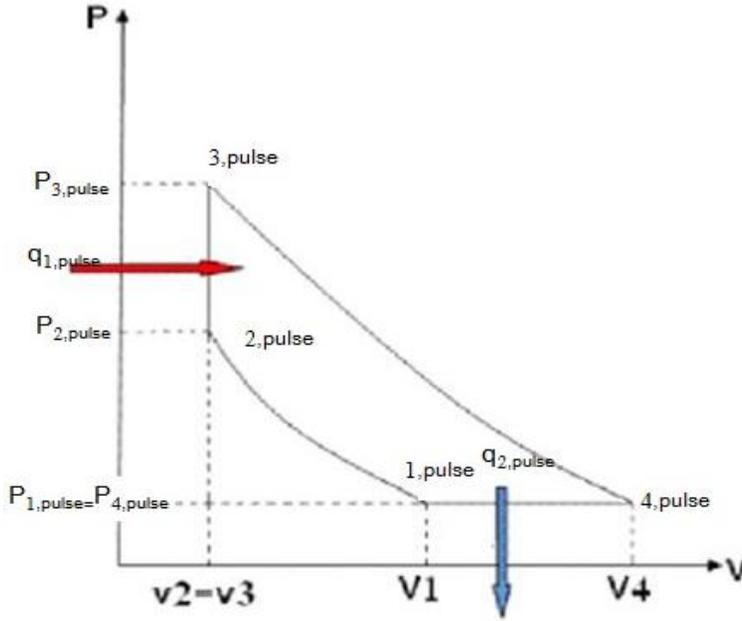
الشكل (4) العملية الترموديناميكية للمحرك العنفي النفاث

3-3- الدورة الترموديناميكية للجزء النبضي من المحرك [4] :

تتألف الدورة الترموديناميكية في المحرك النبضي من العمليات التالية كما هو موضح بالشكل رقم (5):

- عملية انضغاط بوليتروبية خارجية (تتم في ضاغط المحرك العنفي وسيتم حساب العمل المستهلك فيها عند حساب المحرك العنفي وبالتالي لا تحسب في المحرك النبضي).

- عملية احتراق تحت حجم ثابت.
- عملية تبريد تحت ضغط ثابت.



الشكل (5) الدورة الترموديناميكية للمحرك النباض

يتم حساب الدورة الترموديناميكية للمحرك النبضي انطلاقاً من الضغط ودرجة حرارة الهواء الداخل إلى حجرة احتراق المحرك النبضي ($T_{2,pulse}$, $P_{2,pulse}$) ، أما سرعة دخول الهواء إلى المحرك النبضي ($V_{0,pulse}$) فهي سرعة خروجه من ضاغط المحرك العنفي، حيث أن سرعة دخول و خروج الهواء من الضاغط تبقى نفسها لا تتغير بسبب وجود مرحلتين للناشر الثابت و المتحرك داخله، حيث تزيد السرعة في الجزء المتحرك و تنخفض في الجزء الثابت لذلك يمكننا القول أن السرعة تبقى نفسها لا تتغير، أما سرعة الدخول للضاغط فهي نفسها سرعة الخروج من ناشر المحرك العنفي $V_{out} = V_{0,pulse}$ التي تتعلق بعامل ارتفاع الضغط في الناشر σ_{Bx} ، ثم تحسب سرعة الخروج من الناشر على النحو التالي: [7]

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} (V_{in}^2 - V_{out}^2)$$

$$; \Delta P = P_{01} - P_{00}$$

حيث:

ΔP : فرق الضغط بين طرفي الناشر.

ρ : كثافة الهواء عند تبعاً للبارامترات الجوية.

V_{in} : سرعة دخول الهواء للناشر و هي سرعة دخول الهواء للمحرك العنفي V_0 .

V_{out} : سرعة خروج الهواء من الناشر.

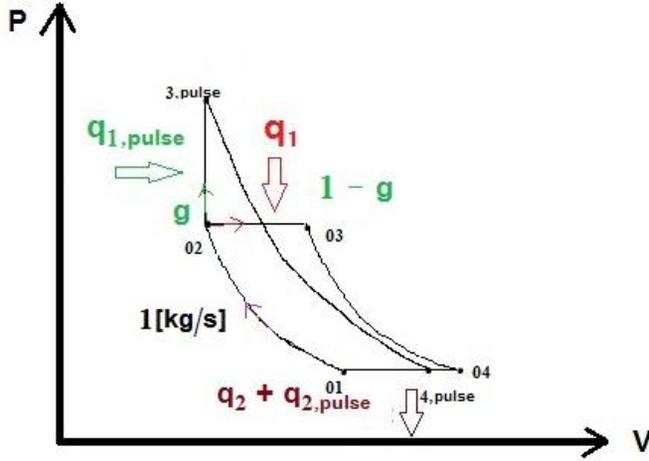
P_{01} : ضغط الهواء بعد الناشر.

P_{00} : ضغط الهواء عند الدخول للناشر.

مع ملاحظة أن عمل المحرك النبضي يساوي عمل التمدد كاملاً كون الانضغاط لا يتم في هذا المحرك.

لذلك: سوف يتم تشغيل المحرك النبضي بجانب المحرك العنفي النفاث وذلك لتأمين الهواء المضغوط من ضاغط المحرك العنفي لحرارة احتراق المحرك النبضي ، إضافة لتأمين تشغيل الضاغط بواسطة عنفة المحرك العنفي ، ويتم ذلك باعتبار أن التدفق الكتلي للهواء الداخل الى المحرك العنفي النفاث هو $1[\text{kg/s}]$ ، يمكن افتراض قيمة التدفق الكتلي لأن الجملة هي جملة ترموديناميكية مفتوحة، وبأن تدفق الهواء بعد الضاغط سيتم استنزاف قسم منه (g نسبة استنزاف من التدفق الكلي) الى حجرة احتراق

المحرك الاخر وهو المحرك النبضي، أما ما تبقى من التدفق ($g-1$) فيتابع جريانه الى حجرة احتراق المحرك العنفي النفاث ثم الى العنفة وانتهاءً بفوهة النفاث، الشكل رقم(6).



الشكل (6) العمليات الترموديناميكية للمحرك العنفي النبضي المقترح

ولكن: عند اجراء الاستنزاف من المحرك العنفي النفاث الى المحرك النبضي ومع انخفاض بتدفق الهواء العامل المار بالعنفة عنه في الضاغط فإن الاستطاعة المقدمة من قبل العنفة لا يساوي الاستطاعة اللازمة لتشغيل الضاغط وبالتالي أصبح هناك نقص في استطاعة العنفة المنتجة.

نقترح حل لهذه المشكلة: المشكلة تكمن في نقص الاستطاعة المقدمة من قبل العنفة ولزيادة هذه الاستطاعة نقترح زيادة مراحل التمدد في العنفة أي استبدال العنفة القديمة بعنفة جديدة ذات عدد مراحل أكثر لتتمدد فيها غازات الاحتراق لدرجة حرارة أقل وبالتالي الاستطاعة المقدمة من قبلها تكون أكبر.

والسؤال ما هو مقدار الزيادة في تمدد الغازات في العنفة؟

إن مقدار الزيادة في تمدد غازات الاحتراق في العنفة يجب أن يساوي مقدار النقص في استطاعتها نتيجة نقص تدفق هذه الغازات بسبب الاستنزاف.

نكتب المعادلات مع الاخذ بالحساب التغير في استطاعة العنفة، حيث استطاعة العنفة يجب أن يساوي استطاعة الضاغط:

$$N_T = N_C$$

$$(G_B - G_{B'}) \cdot C_{PG} (T_{03} - T_{04}) = G_B \cdot C_{Pa} (T_{02} - T_{01})$$

ومن أجل واحدة الكتلة:

$$(1-g) \cdot C_{PG} (T_{03} - T_{04}) = C_{Pa} (T_{02} - T_{01})$$

حيث:

N_T : استطاعة العنفة

N_C : استطاعة الضاغط

T_{03} : درجة حرارة غازات الاحتراق بعد حجرة الاحتراق

T_{04} : درجة حرارة غازات الاحتراق بعد العنفة

T_{02} : درجة حرارة الهواء المضغوط بعد الضاغط

T_{01} : درجة حرارة الهواء الداخل للضاغط

3-4- الموديل الرياضي للمحرك العنفي النبضي النفاث المقترح:

يبين الجدول رقم (1) الرموز والمصطلحات العلمية المقابلة لها والمستخدم في الموديل الرياضي:

المعطيات	
$T_a = 223.3 \text{ K}$	درجة الحرارة الخارجية الجوية
$P_a = 0.265 \text{ bar}$	ضغط الهواء الخارجي الجوي
$T_{03} = 2000 \text{ K}$	درجة حرارة الغازات الخارجة من حجرة الاحتراق في المحرك العنفي
$T_{3,pulse} = 2000 \text{ K}$	درجة حرارة الغازات الخارجة من حجرة الاحتراق في المحرك النبضي
$R_a = 286 \text{ J/kg.K}$	الثابت النوعي للهواء
$R_G = 289 \text{ J/kg.K}$	الثابت النوعي لغازات الاحتراق
$C_{pa} = 1005 \text{ J/kg.K}$	السعة الحرارية للهواء عند ضغط ثابت
C_{PG}	السعة الحرارية لغازات الاحتراق عند ضغط ثابت

تحسين فعالية محرك نبضي نفث بدون صمامات من خلال رفع الضغط الأولي لحجرة الاحتراق

$C_{va} = \frac{C_{pa}}{k_a}$	السعة الحرارية للهواء عند حجم ثابت
$C_{vG} = \frac{C_{pG}}{k_G}$	السعة الحرارية لغازات الاحتراق عند حجم ثابت
$k_a = 1.444$	الأس البوليتروبي للهواء إذا كان التحول أديباتي
$k_G = 1.323$	الأس البوليتروبي لغازات الاحتراق إذا كان التحول أديباتي
$\zeta_{com} = 0.99$	مردود حجرة الاحتراق للمحركين النبضي والعنفي
$a = \sqrt{k_a \cdot T_a \cdot R_a}$	سرعة الصوت في الظروف الجوية
$V_0 = a \cdot M$	سرعة دخول الهواء للمحرك العنفي
M	رقم ماخ
$\beta = 1:40$	نسبة الانضغاط في الضاغط
$\Delta P_B = 0.01 \text{ bar}$	انخفاض الضغط في حجرة الاحتراق
$H_u = 43260000 \text{ J/kg}_f$	القيمة الحرارية للوقود المستخدم في حجرة الاحتراق
$\zeta_{sc} = 0.86$	المردود البوليتروبي لعملية الانضغاط في الضاغط
$\zeta_{st} = 0.87$	المردود البوليتروبي لعملية التمدد في العنفة
$\zeta_j = 0.95$	مردود أنبوب النفث في المحرك النبضي
$\zeta_m = 0.90$	المردود الميكانيكي للمحرك العنفي
$g = 0:0.05:0.9$	نسبة استنزاف الهواء من المحرك العنفي الى النبضي
$\varphi_c = 0.9$	عامل انخفاض سرعة خروج الغازات من فوهة وأنبوب النفث
$\sigma_{Bx} = 1.016$	عامل ارتفاع الضغط عند مدخل الهواء
$\sigma_{\varphi k} = 0.6$	عامل انخفاض الضغط في فوهة النفث
$G_B = 1 \text{ [kg/sec]}$	التدفق الكتلي للهواء المستهلك في المحرك العنفي
$G_{B^*} = G_B \cdot g$	التدفق الكتلي للهواء المستهلك في المحرك النبضي

جدول (1): الرموز والمصطلحات العلمية المستخدمة في الموديل الرياضي

3-4-1- بارامترات الضغط ودرجات الحرارة عند أجزاء المحرك العنفي:

• الناشر (Diffuser):

يحسب ضغط الهواء على مدخل الناشر من العلاقة التالية:[3]

$$P_{00} = P_a \cdot \left(1 + \frac{k_a - 1}{2} \cdot M^2\right)^{\frac{k_a}{k_a - 1}}$$

وضغط الهواء بعد الخروج من الناشر يعطى بالعلاقة التالية:[7]

$$P_{01} = P_{00} \cdot \sigma_{Bx}$$

أما درجة الحرارة فتبقى نفسها لا تتغير قبل الدخول للناشر وبعده أي:

$$T_a = T_{00} = T_{01}$$

• الضاغط (Compressor):

تحسب درجة حرارة الهواء بعد الخروج من الضاغط وفق العلاقة التالية:

$$T_{02} = T_{01} \cdot T_k$$

حيث

T_k : نسبة التسخين في الضاغط و تحسب من العلاقة [7]:

$$T_k = 1 + \frac{\frac{k_a - 1}{k_a} - 1}{\zeta_{\infty c}}$$

أما ضغط الهواء بعد الضاغط فيحسب تبعاً لنسبة الانضغاط في الضاغط وفق

المعادلة التالية:

$$P_{02} = P_{01} \cdot \beta$$

حيث يحسب العمل النوعي للضاغط بالمعادلة التالية:[3]

$$w_c = \frac{k_a}{k_a - 1} \cdot R_a \cdot (T_{02} - T_{01})$$

و بالتالي استطاعة الضاغط N_c :

$$N_c = w_c \cdot G_B$$

• **حجرة الاحتراق (Burner):**

يتم في حجرة الاحتراق تقديم الحرارة تحت ضغط ثابت ولكن وبسبب وجود ضياعات في الضغط يحسب ضغط غازات الاحتراق بعد حجرة الاحتراق وفق المعادلة التالية: [3]

$$P_{03} = P_{02} \cdot (1 - \Delta P_B)$$

أما درجة حرارة غازات الاحتراق بعد خروجها من حجرة الاحتراق T_{03} فتكون محددة حسب نوع معدن حجرة الاحتراق.

وبالتالي يمكننا حساب استهلاك الوقود النسبي في المحرك العنفي (g_t) وفق المعادلة التالية: [3]

$$g_t = \frac{C_{PG} \cdot 10^3 (T_{03} - T_{02})}{\zeta_{com} \cdot H_u}$$

حيث:

C_{PG} : السعة الحرارية النوعية لغازات الاحتراق عند ضغط ثابت

وتحسب وفق المعادلة: [7]

$$C_{PG} = 0.883 + 2.09 \cdot 10^{-4} \cdot (T_{03} - 0.48 T_{02})$$

أيضاً تحسب كمية الحرارة النوعية المضافة في حجرة احتراق المحرك العنفي وفق المعادلة: [3]

$$q_1 = C_{PG} \cdot (T_{03} - T_{02})$$

• **العنفة (Turbine):**

في المحركات العنفة يجب أن تؤمن العنفة عمل الضاغط وبالتالي استطاعة العنفة يجب أن تساوي استطاعة الضاغط لذلك:

$$N_T = N_C$$

وبالتالي يمكن حسب العمل الذي تنجزه العنفة من المعادلة التالية:[3]

$$W_T = \frac{N_T}{G_B(1-g)}$$

ويحسب بالتالي الهبوط الحراري على العنفة من المعادلة:

$$\Delta T = \frac{W_T}{C_{PG}}$$

وكذلك نسبة التمدد في العنفة (β_t):[7]

$$\beta_t = \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta T}{T_{03} \cdot \zeta_{\infty t}}} \right)^{\frac{k_G}{k_G - 1}}$$

ونحسب ضغط ودرجة حرارة خروج الغازات من العنفة وفق المعادلات التالية:

$$P_{04} = \frac{P_{03}}{\beta_t}$$

$$T_{04} = T_{03} - \Delta T$$

• فوهة النفث (Nozzle):

حيث تحسب نسبة تمدد غازات الاحتراق في فوهة النفث β_n لإنتاج الدفع

للمحرك العنفي وفق المعادلة التالية:

$$\beta_n = \frac{P_{04} \cdot \sigma \varphi k}{P_a}$$

وبالتالي سرعة خروج غازات النفث وفق المعادلة التالية:[3]

$$V = \varphi_c \sqrt{\frac{2 \cdot k_G}{k_G - 1} \cdot R_G \cdot T_{04} \left[1 - \frac{1}{\beta_n^{\frac{k_G - 1}{k_G}}} \right]}$$

حيث تتساوى سرعة النفث مع قوة الدفع النوعية في المحرك العنفي $V = P_V$

وبذلك تحسب قوة الدفع في المحرك العنفي النفاث وفق المعادلة:

$$F_S = G_B \cdot P_Y$$

أيضاً يمكننا حساب الاستهلاك النوعي للوقود وفق المعادلة:

$$SFC = \frac{3600 \cdot g_t}{F_S}$$

3-4-2- بارامترات الضغط ودرجات الحرارة عند أجزاء المحرك النبضي النفاث:

❖ حجرة احتراق (Burner):

بارامترات الهواء الداخل لحجرة احتراق المحرك النبضي تساوي بارامترات الهواء المضغوط خلف الضاغط وبالتالي:

$$T_{2,pulse} = T_{02} \quad P_{2,pulse} = P_{02}$$

ويكون ضغط غازات الاحتراق عند خروجها من حجرة الاحتراق: [6]

$$P_{3,pulse} = P_{2,pulse} \cdot \frac{T_{3,pulse}}{T_{2,pulse}}$$

حيث:

$T_{3,pulse}$: درجة حرارة غازات الاحتراق بعد حجرة الاحتراق و هي محددة أيضاً بنوع معدن حجرة الاحتراق.

كمية الحرارة النوعية المضافة في حجرة احتراق المحرك النبضي تحسب وفق المعادلة: [8]

$$q_{1,pulse} = C_{VG} \cdot (T_{3,pulse} - T_{2,pulse})$$

أيضاً يمكننا حساب استهلاك الوقود النسبي في المحرك النبضي حسب المعادلة: [6]

$$g_{t,pulse} = \frac{q_{1,pulse}}{\zeta_{com} \cdot H_u}$$

❖ أنبوب النفث (Thrust Pipe):

تحتسب نسبة التمدد الكلية في المحرك النبضي β_{pulse} : [8]

$$\beta_{pulse} = \frac{P_{3,pulse}}{P_a}$$

وبالتالي نستطيع حساب العمل النوعي المنجز في المحرك النبضي وهو عمل التمدد

كامل في أنبوب النفث: [8]

$$w_{pulse} = \frac{1}{k_G - 1} \cdot R_G \cdot T_{3,pulse} \cdot \left(1 - \frac{1}{(\zeta_j \cdot \beta_{pulse})^{\frac{k_G - 1}{k_G}}} \right)$$

أيضاً نستطيع حساب سرعة خروج غازات النفث من أنبوب النفث وفق المعادلة:

$$V_{pulse} = \sqrt{2 \cdot w_{pulse}}$$

حيث تتساوى قوة الدفع النوعية مع سرعة خروج الغازات في المحرك النبضي وفق

المعادلة:

$$P_{Y,pulse} = V_{pulse}$$

وبالتالي تعطى قوة الدفع الناتجة عن المحرك النبضي وفق المعادلة التالية:

$$F_{S,pulse} = G_{B'} \cdot P_{Y,pulse}$$

يمكننا بذلك حساب الاستهلاك النوعي للوقود في حجرة احتراق المحرك النبضي وفق المعادلة:

$$SFC_{pulse} = \frac{3600 \cdot g_{t,pulse}}{F_{s,pulse}}$$

3-4-3- مميزات أداء المحرك العنفي النبضي النفاث:

▪ تعطى قوة الدفع الكلية للمحرك المقترح وفق المعادلة التالية:

$$F_{S,tot} = F_S + F_{S,pulse}$$

▪ ويمكننا حساب الاستهلاك النوعي للوقود في المحرك المقترح بالمعادلة التالية:

$$SFC_{tot} = \frac{3600 \cdot g_{t,tot}}{F_{S,tot}}$$

حيث:

$g_{t,tot}$: استهلاك الوقود النسبي و يمكن حساب قيمته من المعادلة التالية:

$$g_{t,tot} = \frac{q_{tot}}{\zeta_{com} \cdot H_u}$$

حيث:

q_{tot} : كمية الحرارة النوعية المضافة في المحرك المقترح و تعطى بالمعادلة:

$$q_{tot} = g \cdot q_{1,pulse} + (1-g) \cdot q_1$$

▪ يعطى مردود الدفع للمحرك المقترح وفق المعادلة التالية: [7]

$$\eta_p = \frac{g \cdot V_{0,pulse} (V_{pulse} - V_{0,pulse}) + (1-g) \cdot V_0 \cdot (V - V_0)}{0.5 [g \cdot (V_{pulse}^2 - V_{0,pulse}^2) + (1-g) \cdot (V^2 - V_0^2)]}$$

▪ المردود الحراري يحسب وفق المعادلة: [7]

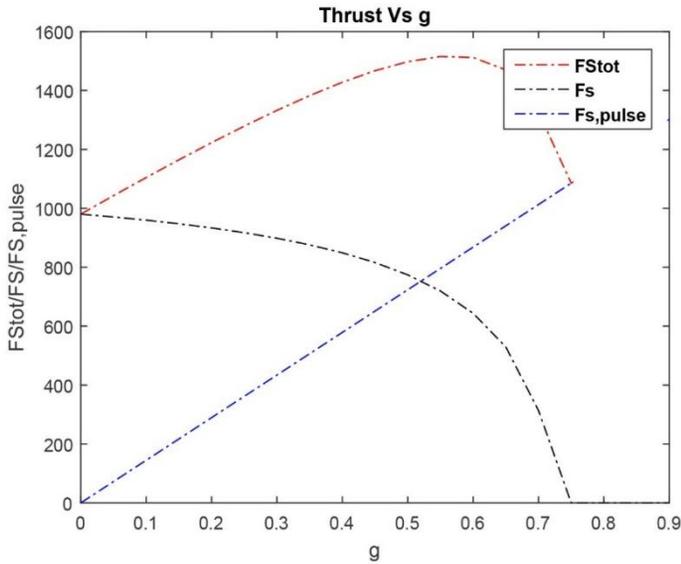
$$\eta_{th} = \frac{0.5 [g \cdot (V_{pulse}^2 - V_{0,pulse}^2) + (1-g) \cdot (V^2 - V_0^2)]}{q_{tot}}$$

4- تحليل أداء المحرك العنفي النبضي Pulse Turbo Jet Engine:

تمت برمجة الخوارزميات السابقة على برنامج Matlab وأجريت عدة دراسات شملت تأثير مختلف البارامترات على أداء المحرك العنفي النبضي المقترح.

4-1 مخططات دراسة سلوك المحركات بالنسبة لتغير نسبة الاستنزاف (g):

❖ مخطط قوة الدفع:



الشكل (7): علاقة قوة الدفع بنسبة الاستنزاف g

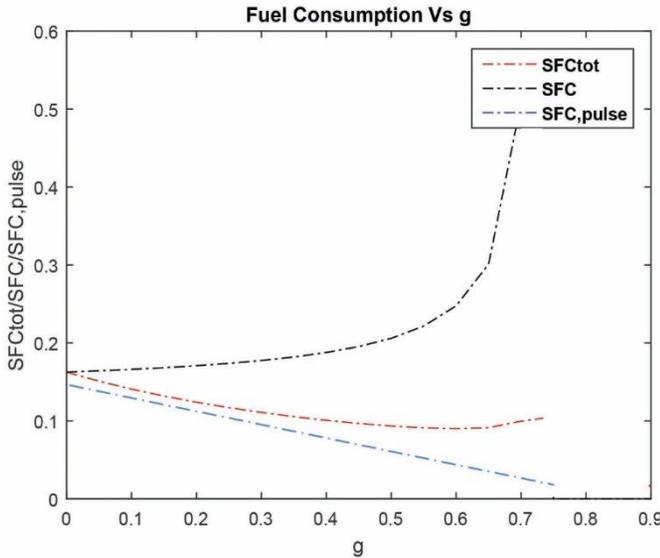
نلاحظ من الشكل رقم (7) مايلي:

1-تزداد قوة الدفع مع ازدياد نسبة الاستنزاف g حتى تصل الى قيمة عظمى تقترب من $1600 [N/kg.s^{-1}]$ عند نسبة استنزاف قريبة من 0.6 لتبدأ بعدها بالانخفاض يرجع ذلك لزيادة عمل العنفلة ولتراجع سرعة نفث المحرك.

2-عند نسبة استنزاف معينة تختلف باختلاف نسبة الانضغاط في المحرك العنفي (عند بارامترات التشغيل قيمة $g=0.75$) تصبح قيمة قوة الدفع في المحرك العنفي صفراً (أي لا يعمل المحرك العنفي في هذه الحالة كمحرك نفاث بل فقط كضاغط هواء للمحرك النبضي)

3-معنى ذلك أن هناك نسبة استنزاف معينة تشكل حداً لعمل المحرك المقترح، وتسمى نسبة استنزاف حد العمل.

❖ مخطط الاستهلاك النوعي للوقود:



الشكل (8): علاقة الاستهلاك النوعي للوقود بنسبة الاستنزاف g

حيث:

SFC_{tot} : الاستهلاك النوعي للوقود في المحرك المقترح $(kg_{fuel}/N.h)$.

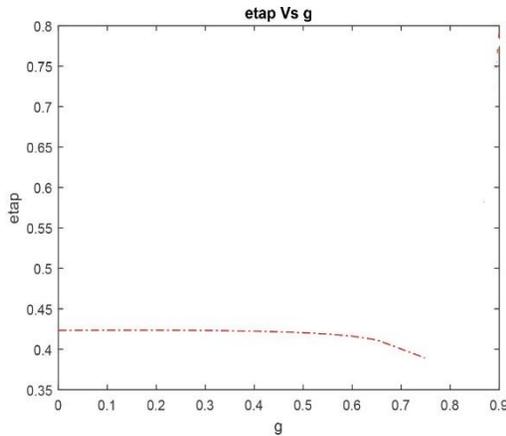
SFC : الاستهلاك النوعي للوقود في المحرك العنفي المستنزف $(kg_{fuel}/N.h)$.

SFC_{pulse} : الاستهلاك النوعي للوقود في المحركات النبضية $(kg_{fuel}/N.h)$.

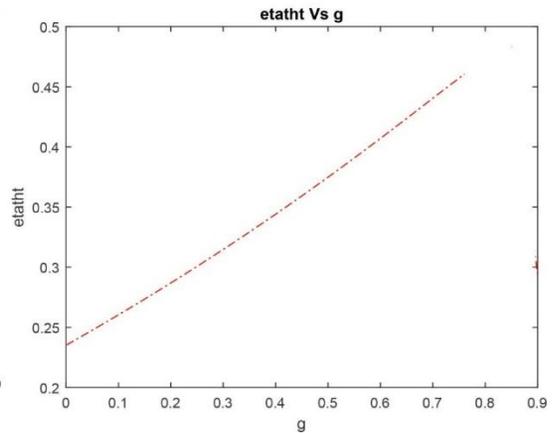
نستنتج من الشكل (8) أن:

- الاستهلاك النوعي للوقود ينخفض بازدياد نسبة الاستنزاف g في المحرك الهجين والمحركات النبضية حتى يصل الى قيمة تقترب من $0.08(kg_{fuel}/N.h)$.
- الاستهلاك النوعي للوقود في المحرك العنفي (المستنزف) يزداد بازدياد نسبة الاستنزاف الى أن يصل الى قيمة لنسبة الاستنزاف قريبة من نسبة استنزاف حد العمل ($g=0.75$) تصبح فيها الزيادة في الاستهلاك كبيرة جداً وذلك للتناقص الكبير في قوة الدفع عند تلك النقطة.

❖ مخططات المردود الحراري ومردود الدفع:



الشكل (10): علاقة مردود الدفع مع النسبة g



الشكل (9): علاقة المردود الحراري بالنسبة g

حيث:

etath : المردود الحراري للمحرك المقترح.

etap : مردود الدفع للمحرك المقترح.

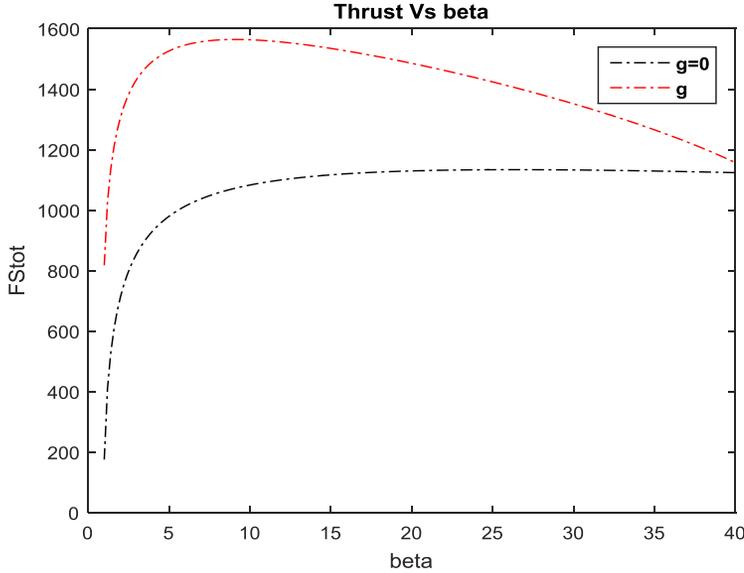
نلاحظ من المخططات السابقة أن:

- تحسن المردود الحراري للمحرك المقترح مع زيادة نسبة الاستنزاف الى أن تصل الى نسبة قريبة من حد العمل ($g=0.75$) ينخفض بعدها المردود الحراري، مع ملاحظة أن المردود الحراري عند انعدام نسبة الاستنزاف ($\eta_{th} = 0.23$) هو مردود المحرك العنفي النفاث فقط عند شروط التشغيل.
- اما في مخطط مردود الدفع الشكل (10) لا يوجد هذا التغير الملحوظ عند ازدياد نسبة الاستنزاف g أما عند وصوله الى نسبة الاستنزاف الأفضل للعمل يبدأ بالانخفاض.

4-2-مخططات دراسة تأثير نسبة الانضغاط في ضاغط المحرك العنفي على أداء المحرك المقترح ومقارنته مع أداء المحرك العنفي التقليدي:

في هذه المخططات ان المقارنة تكون بين المحرك العنفي التقليدي بدون استنزاف ($g=0$) وبين المحرك العنفي النبضي المقترح عند أفضل أداء له أي عند أفضل نسبة استنزاف g (تؤخذ بقيمة تقريبية من المخططات السابقة)

❖ مخطط قوة الدفع:

الشكل (11): علاقة قوة الدفع بنسبة الانضغاط β

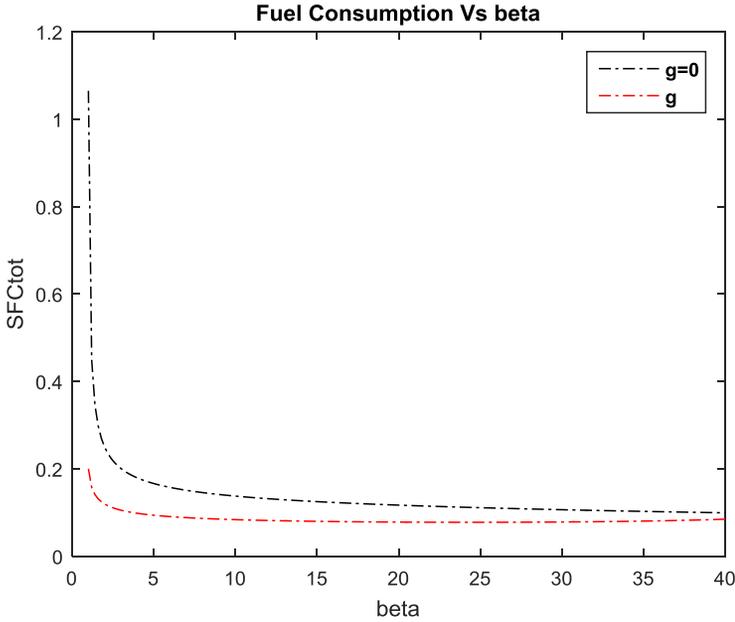
نلاحظ من المخطط السابق أن:

- عند نسبة انضغاط تساوي الواحد أي الضاغط لا يعمل فإن قوة الدفع في المحركات العنفيه صغيرة جداً (لا تتجاوز $150[\text{N}/\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$ للإقلاع في بداية التشغيل) أما قوة الدفع للمحرك المقترح فهي جيدة تتجاوز $1000[\text{N}/\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$ يمكن الاعتماد عليها في حال توقف الضاغط فجأة عن العمل.

- نلاحظ أن الزيادة الملحوظة في قوة الدفع في المحرك المقترح تظهر عند نسب الانضغاط المنخفضة أي (3 - 8) تبدأ قوة الدفع بالتراجع عند نسب الانضغاط المتوسطة والمرتفعة.

- إن ازدياد قوة الدفع الى أن تصل الى نسبة انضغاط معينة وتراجع بعدها يعود الى أن قوة الدفع تتناسب طردياً مع سرعة النفث التي بدورها تتراجع بشكل ملحوظ عند نسبة الانضغاط التي تجعل عمل العنفة يرتفع بنسبة كبيرة.

- عند جميع قيم نسب الانضغاط نلاحظ أن المحرك المقترح أفضل من المحرك العنفي التقليدي وذلك بنسب تحسن تختلف حسب اختلاف نسبة الانضغاط وتصل الى 60% في أفضل ظروف التشغيل، وينعدم هذا التحسن عند نسبة انضغاط عالية قريبة من 40. ❖ مخطط الاستهلاك النوعي للوقود:



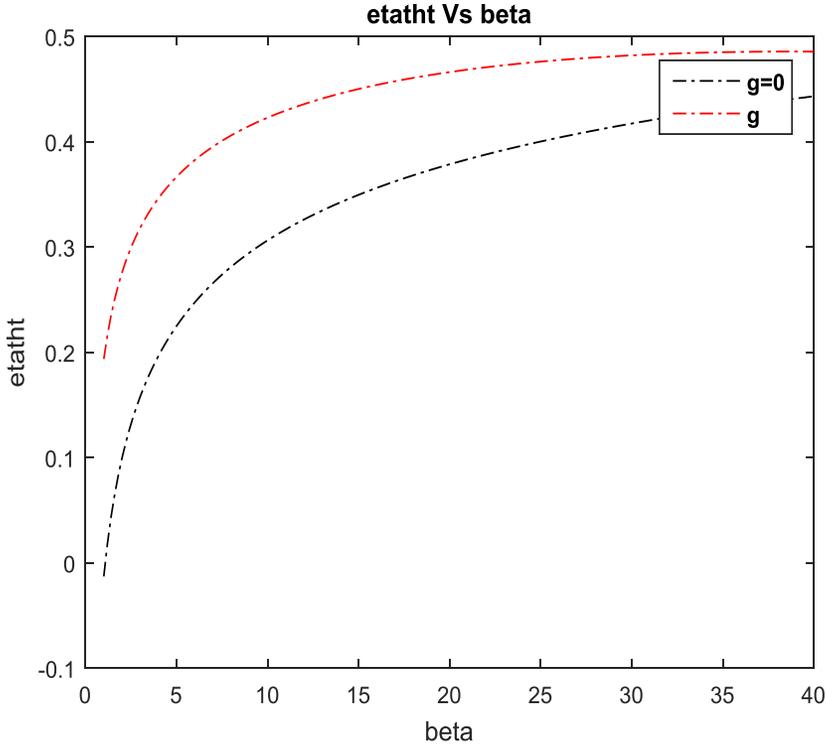
الشكل (12): علاقة الاستهلاك النوعي للوقود مع نسبة الانضغاط β

نلاحظ أن:

- الاستهلاك النوعي للوقود مرتفع جداً في بداية تشغيل المحرك العنفي التقليدي يتجاوز قيمة 1 [kg/N.h] أما في المحرك المقترح لا توجد هذه القفزة الكبيرة في الاستهلاك عند التشغيل فتبلغ قيمة الاستهلاك قرابة 0.2 [kg/N.h] أي يوجد توازن في الاستهلاك خلال زيادة نسب الانضغاط.

- المحرك المقترح اقتصادي أكثر من المحرك العنفي التقليدي ويظهر هذا بشكل واضح عند نسب الانضغاط المنخفضة، حيث تبلغ نسبة التوفير بالاستهلاك النوعي للوقود حوالي 25%.

❖ مخطط المردود الحراري:

الشكل (14): علاقة المردود الحراري بنسبة الانضغاط β

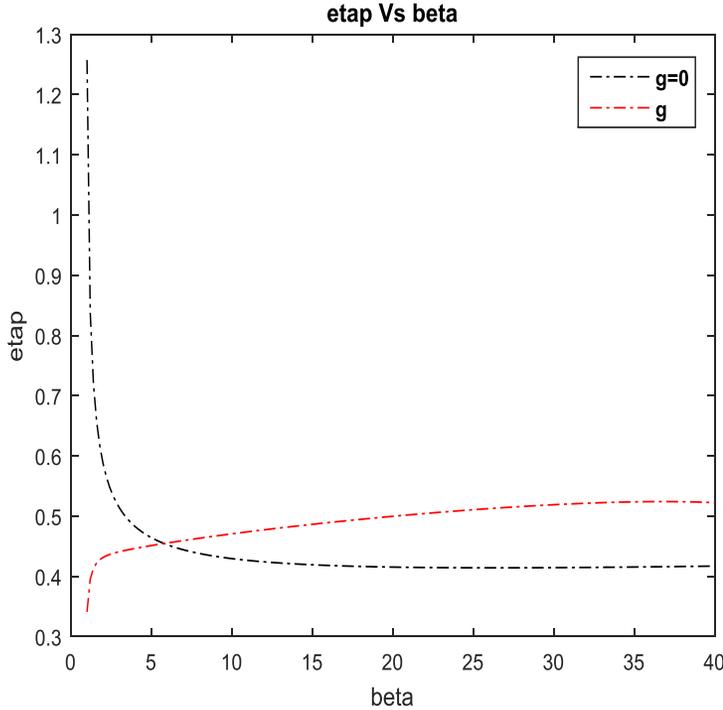
نلاحظ من المخطط أن:

- انعدام المردود الحراري للمحرك العنفي التقليدي عند نسبة انضغاط تساوي الواحد (لا يوجد انضغاط في الضاغط) أما المحرك المقترح فيعطي مردود قريب ل 0.2 عند هذه النسبة وذلك بفضل الجزء النبضي من المحرك الذي يعمل بدون انضغاط أولي فيه.
- يمكن زيادة المردود بزيادة نسبة الانضغاط، حيث أن المردود الحراري يتناسب طردياً مع سرعة النفط، وتكون هذه الزيادة سريعة حتى نسبة انضغاط تقريبا 12 (تختلف باختلاف نسبة الاستنزاف) يصل فيها المردود الحراري الى 0.47، بعدها تتباطأ هذه الزيادة في المردود بشكل واضح، أي زيادة نسبة الانضغاط

من 5 الى 10 (أي بمقدار الضعف) أدت الى زيادة المردود بقيمة 12% تقريباً أما عند الزيادة من 20 الى 40 سوف تؤدي الى زيادة المردود بمقدار 4 % فقط.

- إذا أخذنا الصعوبة التقنية من جهة وانخفاض المراديد الحقيقية للضواغط ذات الانضغاط العالي من جهة أخرى، يمكن أن نستنتج أن نسبة الانضغاط المناسبة لهذا النوع من المحركات تقع في المجال (3 - 15) حيث المردود الحراري يقع في المجال (0.4 - 0.49).

❖ مخطط مردود الدفع:



الشكل (14): علاقة مردود الدفع بنسبة الانضغاط β

نلاحظ من المخطط أن:

- لا يوجد هذا التحسن الملحوظ في مردود الدفع بين المحرك العنفي والمحرك المقترح الفرق صغير جداً.
- كما نعلم أن المحرك العنفي التقليدي يتناقص فيه مردود الدفع بازدياد نسب الانضغاط في المجال المنخفض ويبدأ بالاستقرار عند مجال نسب الانضغاط المرتفعة، وذلك يعود الى العلاقة العكسية بين مردود الدفع وسرعة النفث، أما المحرك المقترح فإنه يتناسب طردياً مع نسبة الانضغاط.
- يلاحظ أن مردود الدفع للمحرك المقترح أفضل من المحرك العنفي التقليدي عند نسب انضغاط أكبر من 10 أما أصغر من 5 فإن المحرك العنفي التقليدي يعد أفضل من المحرك العنفي النبضي من حيث مردود الدفع.

الاستنتاجات من مخططات دراسة العلاقة بين مميزات أداء المحرك المقترح ونسبة الانضغاط الاولى β :

- يعمل المحرك المقترح بصورة أفضل من المحرك العنفي النفاث عند جميع نسب الانضغاط ولكن يكون هذا التحسن ملحوظ أكثر عند نسب الانضغاط المنخفضة (8 - 3) β من حيث قوة الدفع والاستهلاك النوعي للوقود والمردود الحراري أما مردود الدفع يعمل أفضل عند β مرتفعة.

- حيث وصلت نسبة التحسن عند قيم التشغيل الأفضل لعمل المحرك الى:

55% عند قوة الدفع $F_{S,tot}$

25% عند الاستهلاك النوعي للوقود SFC_{tot}

15% عند المردود الحراري η_{th}

3% عند مردود الدفع η_p

5- النتائج:

من خلال الدراسة السابقة للمحرك الهجين المقترح ومقارنة قيم قوة الدفع والاستهلاك النوعي للوقود مع المحرك العنفي النفاث التقليدي تم التوصل إلى النتائج التالية:

1- إن المحرك الهجين المصمم على أساس محرك عنفي والذي يأخذ الهواء المضغوط من ضاغط المحرك العنفي، يعمل بشكل أفضل من المحرك العنفي التقليدي عند جميع نسب الانضغاط، وخاصة عند نسب انضغاط منخفضة (3 - 8)، وبالتالي التصميم على أساس محرك عنفي ذو ضاغط نسبة انضغاطه منخفضة يغني عن الصعوبات التقنية من جهة وانخفاض المراديد الحقيقية للضاغط ذات الانضغاط العالي من جهة أخرى.

2- وصلت نسبة التحسن للمحرك المقترح عن المحرك العنفي التقليدي عند قيم التشغيل الأفضل لعمل المحرك الى:

$$55\% \text{ عند قوة الدفع } F_{s,tot}$$

$$25\% \text{ عند الاستهلاك النوعي للوقود } SFC_{tot}$$

$$15\% \text{ عند المردود الحراري } \eta_{th}$$

$$3\% \text{ عند مردود الدفع } \eta_p$$

3- مع زيادة نسبة الاستنزاف يتحسن أداء المحرك المقترح، الى أن تصل قوة الدفع الى قيمة عظمى، وباستمرار زيادة النسبة يتوقف المحرك العنفي عن انتاج قوة الدفع تسمى عندها نسبة الاستنزاف بنسبة حد العمل، حيث يشكل ذلك حداً لعمل المحرك المقترح.

4- يمكن استخدام منظومة مكونة من محرك عنفي نفاث ومجموعة من المحركات النبضية التي تعمل محركات اضافية مساعدة للمحرك العنفي، معززة لقوة الدفع في المحرك العنفي.

5- يمكن أيضاً اعتبار المحركات النبضية محركات أساسية يمكن الاعتماد عليها في حال حصول خلل في عمل ضاغط المحرك العنفي، وتوقفه فجأة عن العمل

(وثوقية وأمان في حال استخدامه في الطائرات المدنية)، حيث بلغت قوة الدفع عند توقف الضاغط عن العمل في المحرك العنفي $[150 \text{ N/kg.s}^{-1}]$ ، أما في المحرك المقترح تجاوزت $[1000 \text{ N/kg.s}^{-1}]$.

6- تلافى مشكلة في المحرك العنفي التقليدي وهي الحصول على إما مردود حراري جيد أو مردود دفع جيد وذلك بتحول العلاقة العكسية بين مردود الدفع ونسبة الانضغاط الى علاقة طردية.

6-المقترحات:

وبناءً على الدراسة السابقة يقترح استخدام هذا النوع من المحركات:

- 1) بناءً على الدراسة السابقة يقترح استخدام هذا النوع من المحركات:
 - أ- كمحرك أساسي يعمل بنسبة انضغاط منخفضة تقع ضمن المجال (1.5 - 6) وهذا يعطي ميزة البساطة في تصميم المحرك الهجين النفاث من حيث عدد مراحل الضاغط.
 - ب- معزز لقوة الدفع في الطائرات التي تستخدم المحركات العنفية فقط.
- 2) دراسة فعالية استخدام المحركات النبضية كمحركات اقلاع للطائرات.
- 3) دراسة فعالية استخدام المحركات النبضية كمحركات توجيه في الطائرات.
- 4) اقتراح تقنيات لزيادة نسبة استنزاف حد العمل وذلك لتلافي مشكلة الحد من عمل المحرك المقترح.
- 5) دراسة امكانية استخدام غازات الاحتراق ذات الضغط المرتفع بعد العنفة في حجرة احتراق المحرك النبضي.
- 6) يقترح تنفيذ هذا المحرك بأجهزة وأدوات مخبرية ومقارنة النتائج العملية مع النتائج النظرية للبحث.

7-المراجع:

المراجع الأجنبية:

1. SAI, KUMAR, 2014, International Journal of Engineering Research and Technology ISSN: 2278-0181, **Design of Pulse Jet Engine for UAV**, Vol.3, Issue 9.
2. IFTEKHAR, MOHAMMAD, 2016, **KAIZEN TECHNIQUE APPLIED FOR "VALVE" USED IN PULSEJET ENGINE**, International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), Vol.5, Issue 5.
3. THOMAS M, JEFFRYS W. CHAPMAN, **Practical Techniques for Modeling Gas Turbine Engine Performance**, URL:
<https://www.ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=201600124852019-08-29>.
4. MEHOLIC, GREGORY V, 1995, **The Evolution and Testing of An Aero valve Pulsejet Engine**, Theses-Daytona Beach.142, URL:

<https://www.commons.erau.edu/db-theses/142>.

5. BRESLAU, MULLER, 2018 , **Comprehensive Thermodynamic Analysis of the Humphrey Cycle for Gas Turbines with Pressure Gain Combustion**, Article, URL:

<https://www.semanticscholar.org>.

6. ANAND, RAHUL, 2020, **VALVELESS PULSED COMBUSTOR ANALYSIS**, Thesis—the Academic Department of school of science and Engineering, Article, URL:

<https://www.researchgate.net>.

7. RAUF, JIM, 1980, **Jet Engine—Powering Modern Airplanes**, UPPSAIA UNIVERSITY, Vol.2.

<https://www.teknat.uu.se/student>.

المراجع العربية:

8. سليمان، نادر، 2006. دراسة ترموديناميكية وتصميمية لتأثير بارامترات الدخول

إلى محرك نبضي. رسالة ماجستير، جامعة حلب، قسم هندسة الطيران، كلية الهندسة

الميكانيكية والكهربائية، سوريا، 56 صفحة.