بسم الله الرحمن الرحيم

سلسلة

احترف صناعة صواريخ الوقود الصلب

الكتاب الثاني

التصميم الأولي لمحركات الصواريخ

إعداد
أبو طلحة السلفي

الفهرس

الفهرس ٢
مقدمة ٣
الفصل الأول: مقدمة نظرية ٤
أجزاء الصاروخ ٤
تعريفات ٤
معدل احتراق الوقود الصلب ٤
الدفع وضغط غرفة الاحتراق ٥

الفصل الثاني: استنتاجات وملاحظات من المعادلات السابقة ٦

الفصل الثالث: معادلات ومعلومات مفيدة في التصميم ٨
أقصى نسبة مساحة مسموح بها $(K_{n,all})$ ٨
شكل القلب ومعادلاته ٩
معادلات أخرى ١٢
المدى ١٢
جدول لخواص مواد غلاف محرك الصاروخ ١٣

الفصل الرابع : خطوات التصميم ١٥
خطوات التصميم ١٥

الفصل الخامس : التصميم بواسطة ملف الإكسل المرفق ١٩
خطوات التصميم ١٩
مثال ٢٠

مقدمة الكتاب

كنا قد بدأنا سلسلة "احترف صناعة صواريخ الوقود الصلب" بكتاب "صناعة صواريخ الهواة" ، وفي خاتمة الكتاب نصحت بأخذ جولة في موقعي :
http://www.jamesyawn.com/
http://www.nakka-rocketry.net/
من أجل الاطلاع على طرق اكثر كفاءة لصناعة أجزاء صواريخ الهواة بحيث تصبح أكثر ملائمة لاستخدامها كصواريخ حقيقية. فالآن على فرض قراءتك للكتاب السابق واطلاعك على الموقعين تعال لنتعلم كيف نضع تصميم نظري لمحرك صاروخ.

قبل ذلك دعونا نجيب على أسئلة قد ترد على ذهن البعض:

ما معنى تصميم أولي لمحرك الصاروخ؟
التصميم معناه أن نختار قياسات ومواد أجزاء محرك الصاروخ بحيث تعطينا مواصفات نحددها نحن للصاروخ الذي نرغب في صناعته.

لماذا لا نقلد تصاميم سابقة لمحركات الصواريخ ؟
تقليد التصاميم الموجودة معناه أولاً وجوب توفر مواد صناعة محرك الصاروخ هذا. فمثلا قد يكون عند تصميم جاهز لمحرك صاروخ ، لكن نصف قطره هو ١٧سم ، فإن لم تجد ماسورة مناسبة بهذا القياس فماذا تفعل ؟؟؟ إما أن تعدل على التصميم والنتائج ستكون مجهولة أو تلغي الموضوع. ونفس الكلام عن الوقود وباقي الأجزاء. أيضا حتى لو تمكنت من صنع المحرك الموجود، فهو قد لا يكون مناسب لمتطلبات التصميم التي ترغب بها كالمدى مثلاً.

هل حل هذه المشكلة موجود في التصميم الأولي ؟
نعم! فالخطوة الأولى في التصميم النظري هي تحديد المواد المتوافرة. فابحث عن المواسير المعدنية والبلاستيكية (PVC) المتوافرة وحدد مواصفاتها . أيضا ابحث عن مواصفات الوقود الذي يمكنك صناعته. ثم باستخدام الطرق المشروحة في هذا الكتاب حاول وضع تصميم أو عدة تصاميم نظرية توافق متطلبات التصميم .

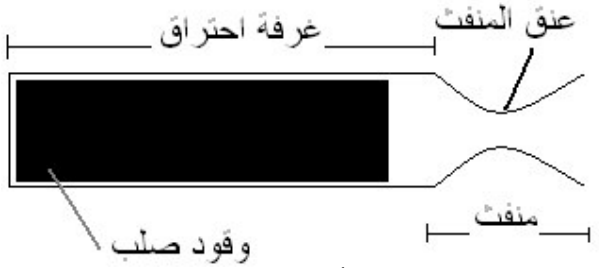
هل من أمثلة على متطلبات التصميم ؟
متطلبات التصميم نحن الذين نحددها. فمثلا قد نرغب أن يكون مدى الصاروخ أكثر من ١٠ كيلومترات، أو قد نرغب أن يكون زمن الاحتراق أقل من ثانية، او قد نرغب أن يكون للمحرك قطر معين ، أو كتلة رأس الصاروخ أكبر من ٣ كيلوغرام ، وهكذا .

ملاحظة: كنت قد ذكرت مقدمة الكتاب الأول أني سأترجم أجزء من كتاب (Sutton, "Rocket Propulsion elements" , 7th edition)، لكني أرى أن من الأفضل تأجيل أو الغاء هذا الأمر، لكن سأعتمد على هذا الكتاب في الفصل الأول من كتابي هذا.

1
مقدمة نظرية

أجزاء الصاروخ

نقصد بالمحرك الصارويخ محرك صاروخ ذو وقود صلب، وهو يتكون من غرفة احتراق ومنفث ووقود صلب ومُشعِل:



عند احتراق الوقود ينشأ لدينا غاز ساخن ذو ضغط مرتفع يندفع للخارج مارا بالمنفث الذي يزيد من سرعته، فتنشأ عندنا قوة دفع من رد الفعل.

غلاف غرفة الاحتراق يجب أن يتحمل الضغط والحرارة العاليين ، والمنفث (خصوصا عنق المنفث) يجب أن يتحمل الحرارة العالية والضغط ولذلك يصنع عادة من الفولاذ.

إذا اردنا أن لا يحصل احتراق لأحد أسطح الوقود (مثلا الذي عند غلاف غرفة الاحتراق) فيجب احاطته بمادة عازلة تمنع الاحتراق.

اشعال الوقود يتم بواسطة المُشعِل (igniter) وله أنواع عديدة.

تعريفات

الدفعة الكلية I_t هي تكامل قوة الدفع T بالنسبة للزمن، وفي حالة الدفع الثابت تصبح

$$I_t = F\,t_b$$

حيث t_b هو زمن الاحتراق (باهمال الفترات الانتقالية في البداية والنهاية)

الدفعة النوعية هي الدفعة الكلية لكل وحدة وزن للوقود. وفي حالة الدفع الثابت تكتب كالتالي

$$I_s = \frac{I_t}{m_p g} = \frac{F\,t_b}{m_p g}$$

حيث m_p هي الكتلة الفعالة للوقود. و g هي تسارع الجاذبية الأرضية و قيمته هي

$$g = 9.8 m/s^2$$

معدل احتراق الوقود الصلب

للعديد من أنواع الوقود الصلب من الممكن تقريب معدل الاحتراق على صورة اقتران يعتمد على ضغط غرفة الاحتراق. وعادة تكتب كالتالي:

$$r = a\,P_c^{\,n}$$

حيث r هو معدل احتراق الوقود بوحدة m/s و P_c هو ضغط غرفة الاحتراق بوحدة Pa و a و n هي معاملات تجريبية تعتمد على نوع الوقود بالدرجة الأولى.

الدفع وضغط غرفة الاحتراق

ضغط غرفة الاحتراق يحسب بالمعادلة :

$$P_c = \left(K_n \, a \, \rho_p \, \frac{I_s \, g}{C_F} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

حيث K_n هو معامل مهم جدا في تصميم محرك الصاروخ، ويساوي مساحة سطح الاحتراق A_b على مساحة مقطع عنق المنفث A_t ، أي

$$K_n = \frac{A_b}{A_t}$$

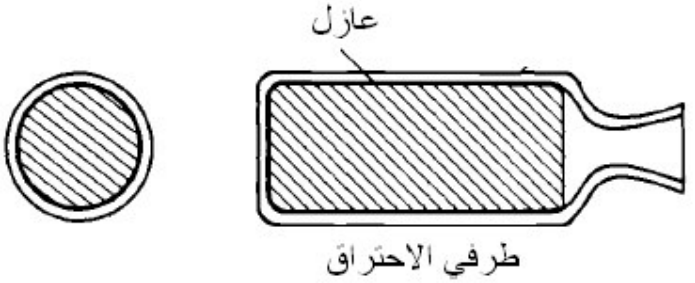
C_F يسمى معامل الدفع ، وله معادلة لحسابه ، لكن عادة نقدر له قيمة ثابتة اعتمادا على نوع الوقود. و ρ_p هي كثافة الوقود الصلب.

الدفع الناتج من محرك الصاروخ يحسب بالمعادلة :

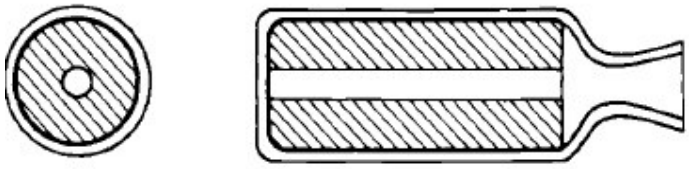
$$F = C_F A_t P_c$$

نلاحظ أن الضغط وقوة الدفع تتناسبان مع K_n وبالتالي مع مساحة سطح الاحتراق.

لذا فإن شكل الوقود الصلب الذي يعطي مساحة احتراق ثابتة أثناء الاحتراق سيعطي دفع وضغط ثابتين، مثلا طرفيات الاحتراق:



أما ثقبي احتراق مثل الشكل التالي:



فمن الواضح أن مساحة سطح الاحتراق تزداد أثناء الاحتراق ، لذا فإن الدفع وضغط غرفة الاحتراق يزدادان أثناء الاحتراق .

يمكن تصميم ثقبيات احتراق بحيث تبقى مساحة الاحتراق ثابتة أثناء الاحتراق ، مثلا :

أيضا يمكن تصميمها لتعطي مساحة احتراق وضغط ودفع متناقصات أو متزايدات أثناء الاحتراق.

وهناك طرق أخرى للحصول على ضغط ودفع شبه ثابتين، سنذكرها لاحقاً.

2
استنتاجات وملاحظات من المعادلات السابقة

الآن لنقف قليلا مع المعادلات السابقة .
لنأخذ معادلة:

$$P_c = \left(K_n \, a \, \rho_p \, \frac{I_s \, g}{C_F} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

حيث

$$K_n = \frac{A_b}{A_t}$$

أيضا المعادلة:

$$F = C_F A_t P_c$$

لاحظ ان $\left(K_n = A_b / A_t \right)$ تعني نسبة مساحة سطح الوقود المعرض للاحتراق إلى نسبة مساحة مقطع عنق المنفث. ولاحظ أن الضغط (وبالتالي قوة الدفع) يتناسب مع النسبة K_n . إذن تحديد قيمة K_n مهم جدا في التصميم، مثلا لو أردنا أن نعدل على تصميم معين رأينا أن قوة الدفع فيه قليلة ، فيجب أن نحاول زيادة قيمة K_n وذلك بزيادة مساحة سطح الاحتراق أو بتقليل مساحة مقطع عنق المنفث .

أيضا نستنتج أنه كي نحصل على دفع ثابت (وهو يعطي سهولة في التعامل النظري مع التصميم)، فيجب أن تكون قيمة K_n ثابتة، أي يجب أن تكون مساحة سطح الاحتراق ثابتة أثناء الاحتراق.

أما إن كانت متغيرة، فسوف نتعامل مع متوسط القيم (average) ونرمز له بالرمز السفلي av مثلا متوسط K_n يرمز له بـ $K_{n,av}$ وهكذا لباقي الرموز، ونستطيع تعديل المعادلات لتصبح محسوبة للقيم المتوسطة في حالة الـ K_n المتغيرة :

$$P_{c,av} = \left(K_{n,av} \, a \, \rho_p \, \frac{I_s \, g}{C_F} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

$$F_{av} = C_F A_t \, P_{c,av}$$

$$I_t = F_{av} \, t_b$$

أيضا يمكن حساب القيم القصوى للضغط والقوة من القيمة القصوى لـ K_n ، أي

$$P_{c,\max} = \left(K_{n,\max} \, a \, \rho_p \, \frac{I_s \, g}{C_F} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

$$F_{\max} = C_F A_t \, P_{c,\max}$$

حيث الرمز السفلي max معناه القصوى (مثلا $P_{c,\max}$ معناه الضغط الأقصى)

نلاحظ أيضا أهمية القيم $a\,\rho_p\,n\,I_s$ في حساب قيمة قوة الدفع وقيمة الضغط. ρ_p هي كثافة الوقود، وهي للوقود الذي صنعناه في الكتاب الماضي (أعني نترات البوتاسيوم مع السكر((KN/SU(65/35)): $\rho_p = 1830 Kg/m^3$. و I_s هي الدفعة النوعية وهي من خصائص الوقود، وهي للوقود الذي صنعناه في الكتاب السابق تساوي $(I_s = 130)$. أما $a\ n$ فهي أيضا من خصائص الوقود وهي للوقود الذي صنعناه في الكتاب السابق ضمن نطاق معين من قيم الضغط تساوي

$a = 3\times10^{-5}\ m/s/Pa^{0.4}$

$n = 0.4$

أما ما هو نطاق قيم الضغط الذي تكون فيه هاتين القيمتين صحيحتين فلعلي أبحث عنه لاحقاً، كل ما أستطيع أن أقوله الآن أني أضمن أن هاتين القيمتين صحيحتين عندما $(100 < K_n < 400)$ (والتي تحدد قيمة الضغط كما أسلفنا). بالمناسبة درجة حرارة الإحتراق للوقود المذكور هي ١٦٢٠ كلفن (وهي منخفضة مقارنة بالأنواع الأخرى).

اما C_F فهي تعتمد على عدة عوامل لكن يمكن اعتبار قيمتها تساوي تقريباً ١,٥ $(C_F \sim 1.5)$.

الآن بما أننا تكلمنا عن I_s دعونا نرى تأثيرها على مدى الصاروخ، نستطيع بعد عدد من الاشتقاقات أن نصل إلى المعادلة التقريبيبة التالية لمدى الصاروخ:

$$X \approx g\,{I_s}^2\left[\ln\left(1+\frac{m_p}{m_f}\right)\right]^2$$

حيث m_f هي الكتلة النهائية للصاروخ بعد انتهاء احتراق الوقود.

نلاحظ أن المدى يتناسب مع مربع الدفعة النوعية، أي لو زادت الدفعة النوعية للضعفين فإن مدى الصاروخ قد يتضاعف لأربعة أضعاف ! وللعلم الدفعة النوعية هي خاصية من خواص الوقود. فهل معنى هذا أننا سنستخدم دائما الوقود ذو أعلى قيمة للدفعة النوعية، الجواب لا ! . والسبب أنه قد لا يتوفر لدينا وقود ذو دفعة نوعية عالية أو أن صناعته تكون صعبة. أيضا عادة الوقود ذو الدفعة النوعية العالية يكون له حرارة احتراق عالية قد تذيب المحرك إن كان مصنوع من مواد عادية !

في الكتاب السابق شرحنا كيف نصنع وقود نترات البوتاسيوم مع السكر((65/35) KN/SU) وهو وقود آمن وسهل الصنع ومواده متوفرة، أما قيمة الدفعة النوعية له فهي تقريباً $I_s = 130\,s$. وهي قيمة متوسطة، (هناك أنواع وقود أخرى تصل الدفعة النوعية لـ ٢٨٠ !).

الآن نعود للمعادلة السابقة، نرى أن المدى يتناسب أيضا مع نسبة كتلة الوقود إلى كتلة الصاروخ بعد احتراق الوقود. إذن كلما كان الصاروخ يحوي كمية أكبر من الوقود كلما كان المدى أعلى ، وهي نتيجة منطقية جداً.

المعادلة السابقة لن نستخدمها في حساب المدى ، فسوف نأخذ في الفصل التالي معادلة وطريقة أدق ، فقط كان الغرض من المعادلة السابقة أن نرى أثر الدفعة النوعية على مدى الصاروخ.

٣
معادلات ومعلومات مفيدة في التصميم

الآن نريد أن نشتق المعادلات التي تلزمنا في التصميم ، بالاعتماد على معادلات فصل ١ ومصادر أخرى.

أقصى نسبة مساحة مسموح بها $\left(K_{n,all}\right)$:

يجب ان نحدد قيمة أقصى ضغط يمكن لمحرك الصاروخ أن يتحمله دون وهو في مأمن عن حصول الانهيار . سوف نعتبر أن قيمة الضغط هذه هي نفس قيمة الضغط التي يمكن لغلاف محرك الصاروخ أن يتحملها وهو في مأمن عن الانهيار، (أما ضمان عدم انهيار باقي الأجزاء مثل انفصال المنفث فيتم بالتصنيع الجيد!). هذا الضغط يمكن حسابه بالمعادلة:

$$P_{all} = \frac{2\omega\sigma_y}{D'S}$$

حيث σ_y هو اجهاد المطاوعة وهو من خواص المادة المستخدمة لصناعة الغلاف (أنظر الجدول في آخر هذا الفصل). ω هو سمك غلاف الصاروخ. D' هو قطر غلاف الصاروخ و S هو معامل الأمان. كلما كان معامل الأمان أكبر كلما كان محرك الصاروخ أكثر أماناً من الانهيار. معامل الأمان يكون عادة من ١,٥ إلى ٢ لكننا سنأخذه أكبر من هذا .

للعلم الأصل أن يكون اجهاد المطاوعة المستخدم في هذه المعادلة أقل من الموجود في الجدول الذي تحت ، لأن الاجهاد الذي في الجدول هو لدرجات الحرارة العادية وليس لدرجات الحرارة العالية الموجودة في الصواريخ. لكن سنستعمل اجهاد المطاوعة من الجدول أما أثر الحرارة فسوف نتضمنه من خلال زيادة قيمة معامل الأمان.

الآن بعد أن حددنا أقصى ضغط مسموح به في محرك الصاروخ، نستطيع أن نحدد أقصى نسبة K_n مسموح بها للقلب (الوقود) أي $K_{n,all}$ ، ونشتقها من إحدى المعادلات التي أخذناها في الفصل الأول ، أعني المعادلة:

$$P_c = \left(K_n a \rho_p \frac{I_s g}{C_F} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

إذن نستطيع أن نكتب

$$P_{c,all} = \left(K_{n,all} a \rho_p \frac{I_s g}{C_F} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

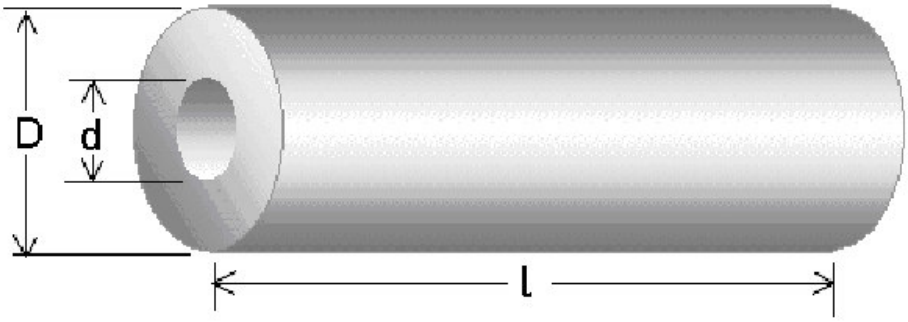
$$K_{n,all} = \frac{C_F \left(P_{c,all}\right)^{1-n}}{I_s g a \rho_p}$$

إذن عند محرك الصاروخ يجب أن تكون أقصى قيمة لـ K_n أقل من هذه القيمة $K_{n,all}$ حتى تكون في مأمن من انهيار المحرك، (يعني هذا الشرط بديل لشرط أن يكون أقصى ضغط مسموح به أقل من $P_{c,all}$).

شكل القلب ومعادلاته:

أشكال القلب (الوقود) التي سندرسها في هذا الكتاب هي ثلاث أنوع مشهورة فقط ، وهي جميعها اسطوانية ذات ثقب اسطواني ، وهي:

١ - قلب يحترق من جميع السطوح (السطح الخارجي والسطح الداخلي والسطحين الجانبين)

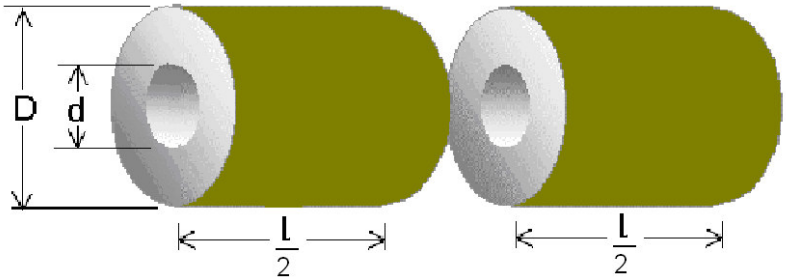


حيث D هو القطر الخارجي للقلب، وd هو القطر الداخلي (قطر الثقب)، و l هو طول القلب.

٢ – قلب سطحه الخارجي ممنوع من الاحتراق ، والاحتراق فقط على السطحين الجانبين والسطح الداخلي.

(اللون الرصاصي يرمز للسطح القابل للاحتراق، واللون الأخضر يرمز للسطح الممنوع من الاحتراق، والمنع يتم باحاطته بمادة مانعة للاحتراق).

٣ – قلب مقسم لعدة قطع متساوي في الطول، وممنوع من الاحتراق على السطح الخارجي . مثلا الشكل التالي هو لقلب مكون من قطعتين.



ويمكن للقلب أن يكون مكون من أكثر من قطعتين ، ونرمز لعدد قطع القلب بالرمز N . حيث l هي مجموع طول جميع القطع ، وكل قطعة طولها (l/N).

الآن نأخذها بشيء من التفصيل:

لو أردنا أن نكتب مساحة سطح الاحتراق الابتدائية (عند بداية حصول الاحتراق أو حتى قبله)، فهي:

١ - للقلب الذي يحترق من جميع السطوح (الشكل الأول فوق):

$$A_{b,i} = l\pi(d+D) + 0.5\pi(D^2 - d^2)$$

٢ - وللقلب الذي لا يحترق من السطح الخارجي ويحترق من باقي السطوح(الشكل الثاني فوق):

$$A_{b,i} = l\pi d + 0.5\pi(D^2 - d^2)$$

٣ - وللقلب المقسم معزول السطح الخارجي (مثل الشكل الثالث فوق):

$$A_{b,i} = l\pi d + N \times 0.5\pi(D^2 - d^2)$$

كما سنرى في الفصل التالي، فنحن في البداية سنحدد قيمة $K_{n,i}$ ثم سنحسب $A_{b,i}$ منها ، ثم سنحسب l ، إذن من الأفضل أن نعيد كتابة المعادلة السابقة لتصبح:

١ - للقلب المحترق من جميع السطوح :

$$l = \frac{A_{b,i} - 0.5\pi(D^2 - d^2)}{\pi(d+D)}$$

٢ - وللقلب معزول السطح الخارجي :

$$l = \frac{A_{b,i} - 0.5\pi(D^2 - d^2)}{\pi d}$$

٣ - وللقلب المقطع معزول السطح الخارجي :

$$l = \frac{A_{b,i} - N \times 0.5\pi(D^2 - d^2)}{\pi d}$$

مساحة الاحتراق سوف تتغير أثناء الاحتراق، فالطول سوف يقل والقطر الداخلي سوف يزداد والقطر الخارجي سوف يقل، إذن مساحة الاحتراق متغيرة، وبالتالي النسبة K_n متغيرة، وبالتالي الضغط متغير والدفع أيضا متغير، إذن الكثير من القيم ليست ثابتة، وبالتالي سوف نهتم من الآن فصاعدا بنوعين من القيم ، القيم القصوى ومعدل القيم. لذا سوف نحسب أقصى قيمة لـ K_n (أي $K_{n,\max}$) و متوسط K_n (أي $K_{n,av}$). الأصل أن نقوم بايجاد عدد كبير من قيم K_n التي تحصل من بداية الاحتراق إلى نهايتة، ثم نحدد القيمة القصوى والمتوسطة، لكن هذه الطريقة طويلة ، لذا سنستبدها بطريقة أبسط (لكن أقل دقة)، وهي أن نعتبر أن متوسط K_n هو K_n الابتدائية زائد K_n النهائية مقسومتين على ٢ ، أي:

$$K_{n,av} = \frac{K_{n,i} + K_{n,f}}{2}$$

و K_n القصوى هي أقصى قيمة من K_n الابتدائية و K_n النهائية، أي :

$$K_{n,\max} = \max\left(K_{n,i}, K_{n,f}\right)$$

$K_{n,av}$ سوف نستخدها عندما نرغب بحساب متوسط قوة الدفع ، وذلك بكتابة:

$$P_{c,av} = \left(K_{n,av}\, a\, \rho_p \frac{I_s\, g}{C_F} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

و $K_{n,\max}$ يجب أن تكون دائما أقل من $K_{n,all}$ حتى لا يحصل انهيار، كما يمكن استخدامها لحساب الضغط الأقصى:

$$P_{c,\max} = \left(K_{n,\max}\, a\, \rho_p\, \frac{I_s\, g}{C_F} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

الآن بعد أن أشرنا إلى أهمية $K_{n,av}$ و $K_{n,\max}$ نأتي لحسابهما ، وقد أشرنا إلى انا سنحسبهما من $K_{n,i}$ و $K_{n,f}$ وبما أننا نعرف $K_{n,i}$ فيلزمنا فقط حساب $K_{n,f}$ ، والتي تحسب من

$$K_{n,f} = \frac{A_{b,f}}{A_t}$$

إذن نريد حساب $A_{b,f}$ ، لن أذكر كيف سأشتق المساحة النهائية ، لكني سأشير إلى فكرة اشتقاقها إشارة ، وهي بسيطة: كل سطح قابل للاحتراق سوف يحترق بنفس السرعة، إذن ، إذا احترق سنتيمتر من السطح الجانبي الأيمن فسيحترق سنتيمتر أيضا من السطح الجانبي الأيسر وسنتييمتر من الثقب (سيزداد نصف قطر الثقب بمقدار سنتيمتر) وسنتيمتر من السطح الخارجي إن لم يكن معزول (سينقص نصف قطر السطح الخارجي سنتيمتر)، فبهذا المنطق البسيط وبمعادلات مساحة الاسطوانة والدائرة المعروفة نستطيع أن نحسب مساحة سطح الاحتراق عند كل لحظة من الاحتراق (و K_n عند كل لحظة كذلك). والمساحة النهائية هي المساحة عند آخر لحظة احتراق، وسوف تختلف معادلتها حسب طول القلب مقارنة بسمكه (مثلا للقلب الطويل المساحة النهائية ستكون مساحة السطح الداخلي والخارجي النهائيين بعد أن قل الطول مسافة معينة، وللاسطوانة القصير المساحة النهائية ستكون المساحة الجانبية النهائية بعد ازداد نصف القطر الداخلي وقل الخارجي). الآن مع النتائج دون اشتقاق:

١ ـ للقلب المحترق من جميع السطوح:

$$A_{b,f} = \begin{cases} 0.5\pi (D+d)(2l+d-D) & ,\ l > \dfrac{D-d}{2} \\ 0.5\pi \left[(D-l)^2 - (d+l)^2 \right] & ,\ l < \dfrac{D-d}{2} \end{cases}$$

٢ ـ وللقلب معزول السطح الخارجي :

$$A_{b,f} = \begin{cases} \pi\ D\ (l+d-D) & ,\ l > D-d \\ 0.5\pi \left[D^2 - (d+l)^2 \right] & ,\ l < D-d \end{cases}$$

٣ ـ وللقلب المقسم لـ N قطعة معزولة السطح الخارجي :

$$A_{b,f} = \begin{cases} \pi\ D\ (l+N\,d-N\,D) & ,\ \dfrac{l}{N} > D-d \\ N \times 0.5\pi \left[D^2 - \left(d + \dfrac{l}{N} \right)^2 \right] & ,\ \dfrac{l}{N} < D-d \end{cases}$$

نلاحظ أن كل معادلة لها قسمين ونحدد اي قيم نستخدم اعتمادا على قيم قياسات القلب.

ملاحظات: بالنسبة للقلب المحترق من جميع السطوح، مساحة الاحتراق دائما متناقصة. أما القلب معزول السطح الخارجي فمساحة الاحتراق قد تكون متزايدة أو متناقصة أو متزايدة ثم متناقصة. أيضا القلب المقسم معزول السطح الخارجي يمكن أن تكون مساحة سطح الاحتراق متزايدة أو

متناقصة أو متزايدة ثم متناقصة، والحالة الأخير تكون شبه متعادلة، وتحصل عندما يكون طول كل قطعة (l/N) يساوي $((3D+d)/2)$ ، وهذا أحد أهم الأسباب لاستخدام القلب المعزول المقطع، وهي امكانية اختيار طول القطع بحيث نحصل على مساحة احتراق شبه ثابتة أي ضغط وقوة دفع ثابتات تقريباً.

كتلة القلب هي ببساطة (للحالات الثلاث):

$$m_p g = 0.25\,\rho_p l\,\pi\,(D^2 - d^2)$$

معادلات أخرى :

الآن نعيد كتابة (وصياغة بعض المعادلات التي أخذناها في الفصل الأول):

$$I_t = m_p\, g\, I_s$$

$$P_{c,av} = \left(K_{n,av}\, a\, \rho_p \frac{I_s\, g}{C_F} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

$$F_{av} = C_f\, A_t\, P_{c,av}$$

حيث C_f تساوي قريبة من ١,٥

$$t_b = I_t / F_{av}$$

أيضا مساحة مقطع المنفث A_t تحسب ببساطة من معادلة مساحة الدائرة، أي

$$A_t = 0.25\,\pi\, D_t^{\,2}$$

حيث ρ_{case} هي كثافة مادة الغلاف (انظر الجدول في نهاية الفصل مثلاً)، و ω هو سمك الغلاف.

المدى

بالرجوع إلى:

Simplified Method for Estimating the Flight Performance of a Rocket
http://www.nakka-rocketry.net/articles/altcalc.pdf

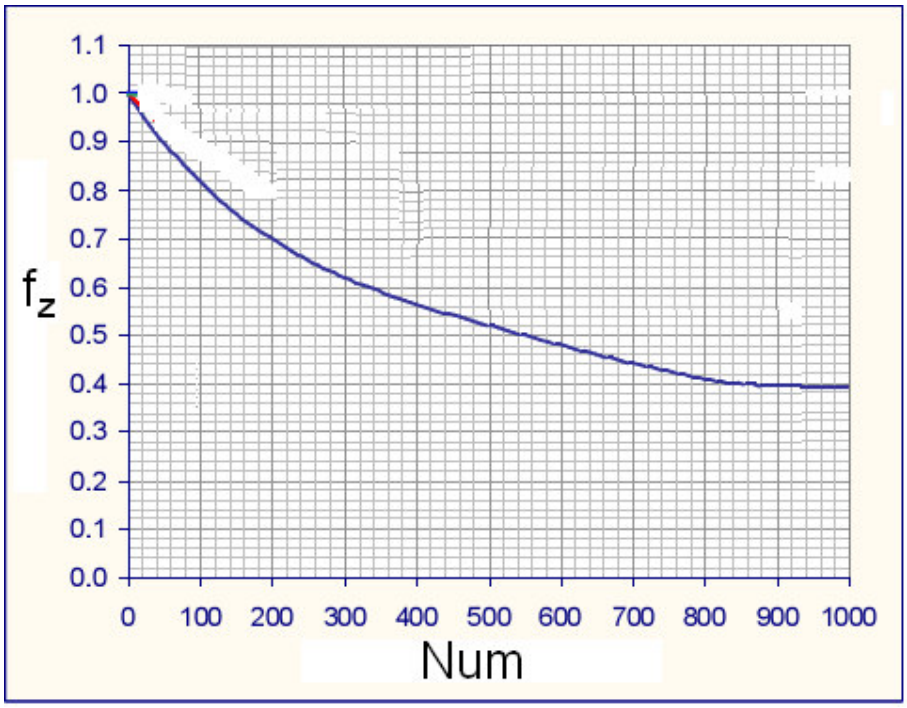
نستطيع أن نقدر مدى الصاروخ بالمعادلة التالية:

$$X = f_z \frac{F_{av}}{(m_f + m_p/2)g} \left(\frac{F_{av}}{(m_f + m_p/2)g} - g \right) t_b^{\,2}$$

حيث نحصل على معامل التصحيح f_z بحساب قيمة الرقم Num من المعادلة:

$$Num = \frac{10\, C_d\, D_{\max}^2}{m_f} \left(\frac{F_{av}}{(m_f + m_p/2)g} - g \right)^2 t_b^{\,2}$$

ثم نوجد قيمة f_z المقابلة لقيمة Num في الشكل التالي:



حيث m_f هي كتلة الصاروخ بدون الوقود، و $D_{\max}$ هي أكبر قطر خارجي للصاروخ ، و C_d هو معامل المقاومة للصاروخ ويساوي تقريباً ٠,٤ ، و g هو تسارع الجاذبية الأرضية ويساوي $\left(g = 9.8 m/s^2\right)$ ، و t_b هو زمن الاحتراق.

جدول لخواص مواد غلاف محرك الصاروخ

هذا هو الجدول الذي أشرنا إليه في بداية هذا الفصل لخواص بعض مواد غلاف محركات الصواريخ المتوافرة (مواد بعض المواسير) عند درجة حرارة الجو:

المادة	المادة بالانجليزية	نوع المادة	الاستخدام الشائع	اجهاد المطاوعة	الكثافة
				اضرب الرقم بمليون ليصبح بوحدة باسكال	بوحدة كيلوغرام لكل متر مكعب
فولاذ، قليل الكربون	Steel, low carbon	C 1010 Hot rolled tubing	استعمال عام	165.48	7860
فولاذ، قليل الكربون	Steel, low carbon	C 1010 Cold drawn seamless tubing	استعمال عام	413.7	7860
فولاذ، قليل الكربون	Steel, low carbon	C 1015 Hot rolled tubing	استعمال عام	227.535	7860
فولاذ، قليل الكربون	Steel, low carbon	C 1015 Normalized tubing	استعمال عام	241.325	7860
فولاذ، قليل الكربون	Steel, low carbon	C 1015 Cold drawn seamless tubing	استعمال عام	448.175	7860
فولاذ، قليل الكربون	Steel, low carbon	C 1025 Hot Rolled tubing	استعمال عام	310.275	7860
فولاذ، قليل الكربون	Steel, low carbon	C 1025 Normalized tubing	استعمال عام	330.96	7860
فولاذ، قليل الكربون	Steel, low carbon	C 1025 Cold drawn seamless tubing	استعمال عام	482.65	7860
فولاذ، ستانلستيل	Stainless steel	SAE 30304 tubing	في الهيدروليك	517.125	7920
فولاذ، ستانلستيل	Stainless steel	SAE 301, 1/4 hard, tubing	استعمال عام	517.125	7920

7860	517.125	الطيران	AISI 4130 Normalized (MIL-T-6736) tubing	Steel, low alloy	فولاذ، ؟؟؟
7860	620.55	الطيران	AISI 4130 Cold drawn (MIL-T-6736) tubing	Steel, low alloy	فولاذ، ؟؟؟
2710	110.32	الطيران	6061-T4 drawn tubing	Aluminum alloy	سبيكة ألمنيوم
2710	241.325	الطيران	6061-T6 drawn tubing	Aluminum alloy	سبيكة ألمنيوم
2710	241.325	الطيران	6061-T6511 extruded tubing	Aluminum alloy	سبيكة ألمنيوم
2800	310.275	الطيران	2024-T3 drawn tubing	Aluminum alloy	سبيكة ألمنيوم
2800	262.01	الطيران	2024-T42 drawn tubing	Aluminum alloy	سبيكة ألمنيوم
2800	455.07	الطيران	7075-T6 (ww-T-700) drawn tubing	Aluminum alloy	سبيكة ألمنيوم
2800	386.12	الطيران	7075-T73 (ww-T-700) drawn tubing	Aluminum alloy	سبيكة ألمنيوم
1450	41.37	أنابيب ماء	Rigid pipe, schedule 40	Polyvinyl chloride (PVC)	بي في سي (بلاستيك)
?????	35.1645	أنابيب الصرف الصحي	Rigid pipe	Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)	أي بي أس (بلاستيك)
-	-			Paperboard	كرتون

وهذا جدول لسمك بعض من مواسير الفولاذ (وقد تختلف من بلد لآخر)

القطر بالإنش	0.5	0.8	1	1.3	1.5	2	2.5	3	3.5	4
السمك بالمليمتر	1.1	1.2	1.4	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	2.1	2.1

للتحويل من مليمتر إلى متر نضرب بـ ٠,٠٠١

أما للتحويل من إنش إلى متر فنضرب بـ ٠,٠٢٥٤ ، لكن لا أنصح بهذا فالقطر المذكور بالإنش هو تقريبي، لذا الأفضل استعمال قيمة القطر الحقيقي .

4
خطوات التصميم

الآن نبدأ بأهم موضوع في هذا الكتاب وهو التصميم.

لنفرض أنه توفر لدينا ماسورة معينة (فولاذية أو ألمنيوم أو بلاستيكية حتى)، وأنه توفر لدينا وقود معين. الآن نريد أن نتعلم طريقة لتصميم محرك صاروخ من هذه المواد المتوفرة بأفضل مواصفات ممكنة. مثلا تعطي أكبر مدى ممكن مع كتلة رأس كبيرة نسبياً.

خطوات التصميم:

١ – نحدد صفات الوقود المتوفر عندنا، أي الكثافة ρ_p ودرجة حرارة الاحتراق T_c ومعاملي الاحتراق a و n والدفعة النوعية للوقود I_s.

٢ – نحدد صفات الماسورة المتوفرة عندنا، أي القطر D' وسمك الجدار ω واجهاد المطاوعة σ_y والكثافة ρ_c .

٣ – نأخذ قيمة كبيرة نسبياً لمعامل الأمان S (٢,٥ مثلا) ونحسب أقصى صغط مسموح به P_{all} وأقصى نسبة مساحة مسموح بها $K_{n,all}$ ، أي:

$$P_{all} = \frac{2\omega\sigma_y}{D'S}$$

$$K_{n,all} = \frac{C_F\left(P_{c,all}\right)^{1-n}}{I_s\, g\, a\, \rho_p}$$

حيث g هو تسارع الجاذبية الأرضية (ويساوي $\left(g = 9.8 m/s^2\right)$) ، ونعتبر C_F تساوي ١,٥ (أو قيمة ثابتة أخرى قريبة (حسب نوع الوقود)).

٤ – نجرب قيمة لقطر المنفث D_t ، ونحسب مساحة عنق المنفث A_t

$$A_t = 0.25\pi D_t^{\,2}$$

٥ – نجرب قيمة للقطر الداخلي لثقب قلب الوقود d بحيث تكون أكبر من $\left(1.4D_t\right)$ (حتى لا يحصل حت كبير للوقود من الغاز المتدفق).

٦ – نجرب قيمة لنسبة المساحة الابتدائية $K_{n,i}$ بشرط أن تكون أقل من $K_{n,all}$

٧ – نحسب المساحة الابتدائية لسطح الاحتراق من المعادلة

$$A_{b,i} = K_{n,i}\, A_t$$

٨ – نقدر القطر الخارجي للقلب D (بـ $0.95D'$ مثلاً) ، ثم نختار أحد أشكال القلب التي ذكرناها ونحسب طول القلب l و المساحة النهائية لسطح الاحتراق $A_{b,f}$ ، من المعادلات التالية:

أ - للقلب المحترق من جميع السطوح :

$$l = \frac{A_{b,i} - 0.5\pi(D^2 - d^2)}{\pi(d + D)}$$

$$A_{b,f} = \begin{cases} 0.5\pi(D+d)(2l+d-D) & , \ l > \dfrac{D-d}{2} \\ 0.5\pi\left[(D-l)^2-(d+l)^2\right] & , \ l < \dfrac{D-d}{2} \end{cases}$$

ب - وللقلب معزول السطح الخارجي :

$$l = \frac{A_{b,i} - 0.5\pi(D^2-d^2)}{\pi d}$$

$$A_{b,f} = \begin{cases} \pi\ D\ (l+d-D) & , \ l > D-d \\ 0.5\pi\left[D^2-(d+l)^2\right] & , \ l < D-d \end{cases}$$

جـ - وللقلب المقسم معزول السطح الخارجي، نختار قيمة لعدد القطع N (٢ أو ٣ او ٤ او ....) :

$$l = \frac{A_{b,i} - N\times 0.5\pi(D^2-d^2)}{\pi d}$$

$$A_{b,f} = \begin{cases} \pi\ D\ (l+N\,d-N\,D) & , \ \dfrac{l}{N} > D-d \\ N\times 0.5\pi\left[D^2-\left(d+\dfrac{l}{N}\right)^2\right] & , \ \dfrac{l}{N} < D-d \end{cases}$$

وإن حصلنا على طول موجب نتابع.

٩ – نحسب نسبة النهائية $K_{n,f}$

$$K_{n,f} = \frac{A_{b,f}}{A_t}$$

ونسبة المساحة القصوى $K_{n,\max}$

$$K_{n,\max} = \max\left(K_{n,i}, K_{n,f}\right)$$

إن كانت $\left(K_{n,\max} < K_{n,all}\right)$ نتابع

١٠ – نحسب كتلة الوقود m_p والدفعة الكلية للمحرك I_t ومتوسط الضغط $P_{c,av}$ ومتوسط قوة الدفع F_{av} وزمن الاحتراق، من المعادلات التالية:

$$m_p g = 0.25\,\rho_p l\,\pi(D^2-d^2)$$

$$I_t = m_p\ g\ I_s$$

$$P_{c,av} = \left(K_{n,av}\,a\,\rho_p\,\frac{I_s\,g}{C_F}\right)^{\frac{1}{1-n}}$$

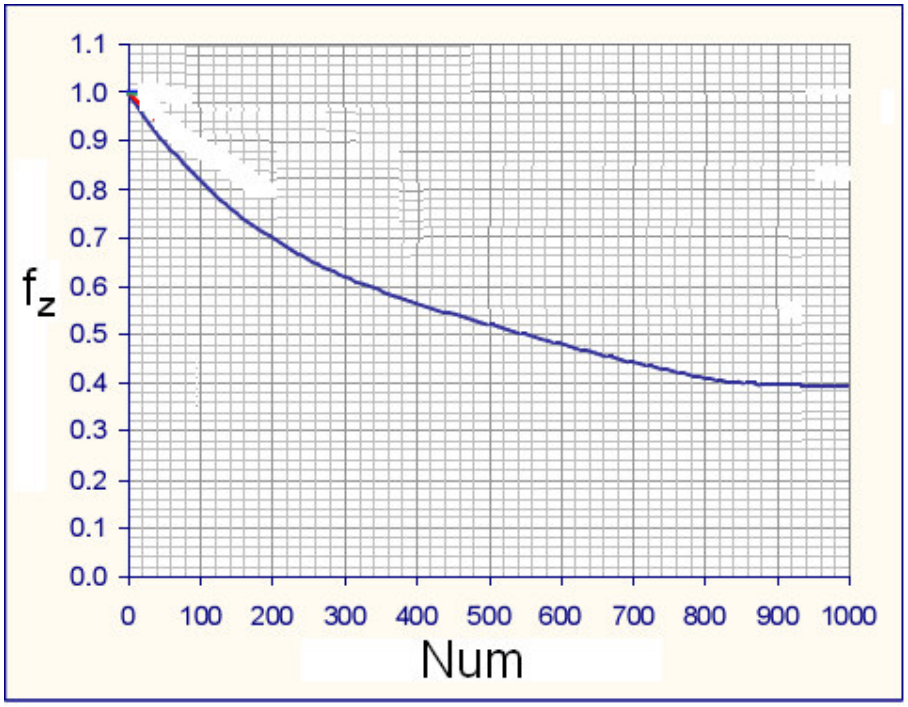
$$F_{av} = C_f\ A_t\ P_{c,av}$$

$$t_b = I_t / F_{av}$$

١١ – نختار قيمة لكتلة الصاروخ دون وقود m_f توافق هدفنا من التصميم، ونعتبر $C_d \approx 0.4$ ونعتبر القطر الأقصى $D_{\max}$ يساوي تقريباً $\left(1.1D'\right)$(أو قيمة أخرى)، ونحسب الرقم Num من المعادلة

$$Num = \frac{10\, C_d\, D_{\max}^2}{m_f}\left(\frac{F_{av}}{(m_f + m_p/2)g} - g\right)^2 t_b{}^2$$

ثم نوجد قيمة معامل التصحيح f_z المقابلة لقيمة Num من الشكل التالي:



ثم نحسب المدى X من المعادلة التالية:

$$X = f_z \frac{F_{av}}{(m_f + m_p/2)g}\left(\frac{F_{av}}{(m_f + m_p/2)g} - g\right) t_b{}^2$$

١٢ – نقدر طول غلاف المحرك بـ ١,٢ ضعف طول القلب ، وكتلة المنفث والسدادة (والذيل!) بـ ١,٢ كتلة الغلاف، إذن طول المحرك هو

$$l_{motor} = 1.2 \times l$$

وكتلة رأس الصاروخ تصبح :

$$m_{head} = 1.44 \rho_c \pi D' \omega l$$

وهي قيم تقديرية غير دقيقة أبدا والهدف منها هو أن تساعدنا على اختيار أفضل تصميم من بين التصاميم الناتجة.

بعد أن نفعل هذا نكون قد حصلنا التصميم الأول، وقد يكون ناجح أو فاشل. الآن نعيد من نقطة ٤ لقيم جديدة لـ ($K_{n,i}$ d D_t وشكل القلب و N (للقلب المقسم)) ، فلو أردنا تجريب ثلاث قيم لـ D_t وثلاث قيم لـ d وثلاث قيم لـ $K_{n,i}$ وأشكال القلب الثلاث وثلاث قيم لـ N فمجموع مرات إعادة حساب الحل ووضع تصاميم جديدة هي ١٣٥ مرة !

بعد القيام بهذا ننظر إلى التصاميم الناتجة نختار أفضل المقبولات. الأفضلية نقدرها تقدير، مثلاً أن يكون المدى كبير وطول المحرك معقول وكتلة الرأس كبيرة نسبياً، ،هكذا.

لكن الآن تبرز مشكلة ، فنحن أشرنا إلى أنه قد يلزمنا إعادة الحل ١٣٥ مرة ، أي مئات العمليات الحسابية، فكيف سنقوم بهذا ؟! الجواب هو أن نجعل الحاسوب يقوم بهذا، وذلك بإحدى طريقتين:

١ – أن نحول خطوات التصميم السابقة إلى برنامج يقوم بهذه العملية. وأي مبرمج مبتدأ يستطيع القيام بهذا.

٢ – أن نقوم بهذه الحسابات بواسطة برنامج إكسل. وهذا ما قمت به. وفي الفصل التالي سنشرح كيف نصمم بواسطة ملف الإكسل المرفق مع هذا الكتاب.

لكن للعلم الطريقة الأولى (البرمجة) أفضل من استعمال ملف الإكسل، فبامكاننا القيام بعدد خيالي من تجريبات التصاميم دون الحاجة لتعديل البرنامج،وميزات أخرى. فأتمنى ممن لديه معرفة بالبرمجة أن يقوم بعمل هذا البرنامج.

٥
التصميم بواسطة ملف الإكسل المرفق

لنفرض أنه توفر لدينا ماسورة معينة (فولاذية أو ألمنيوم أو بلاستيكية حتى)، وأنه توفر لدينا وقود معين. الآن نريد أن نتعلم طريقة لتصميم محرك صاروخ من هذه المواد المتوفرة بأفضل مواصفات ممكنة. مثلا تعطي أكبر مدى ممكن مع كتلة رأس كبيرة نسبياً. وذلك باستخدام ملف الإكسل.

خطوات التصميم:

١ – نحدد صفات الماسورة المتوفرة عندنا، قطر الماسورة وسمك جدار الماسورة واجهاد المطاوعة وكثافة مادة الماسورة . (الجدول الموجود في نهاية الفصل الثالث قد يفيدنا في تحديد آخر اجهاد المطاوعة والكثافة) ، ندخل هذه القيم في مكانها المبين في ملف الإكسل (مظلل بالأسود).

٢ – نحدد صفات الوقود المتوفر عندنا، أي كثافة الوقود ودرجة حرارة الاحتراق ومعاملي الاحتراق a و n والدفعة النوعية للوقود Is ، ندخل هذه القيم في مكانها المبين في ملف الإكسل (مظلل بالأسود).

٤ – نختار قيمة منطقية لكتلة الصاروخ بدون الوقود mf ، وندخلها في مكانها المخصص. (مظلل بالأسود)

٣ - ونقدر Cf بقيمة ثابتة قريبة من ١,٥ (أنا سآخذها ١,٥) (وهي من صفات الوقود تقريباً). ومعامل الأمان بقيمة محتاطة (٢,٥ مثلاً). وبامكاننا تغير هذه القيم في الملف إن كان عندنا قيم أدق(وهي مظللة باللون الأحمر) .

٥ – نقدر معامل المقاومة الهوائية Cd بحوالي ٠,٤ (نستطيع تغيرها إن كان عندنا قيمة أدق، وهي مظللة باللون الأحمر).

٦ – نقدر السمك الأقصى للصاروخ بـ 1.1 ضعف سمك الماسور، وقطر السطح الخارجي لقلب الوقود بـ ٠,٩٥ ضعف قطر الماسورة. ونستطيع تعديلها إن أردنا ، وهي مظللة باللون الأحمر.

الآن نكون قد انتهينا من إدخال القيم الموجودة في أعلى صفحة الملف ، بقي قيمة واحدة يجب إدخالها وهي عدد قطع القلب المقسم N ، وهي موجودة في أعلى الجدول الأخضر في الخلية C173 (ومظللة بالأسود)، ندخل عدد القطع التي نرغب بها.

الآن الملف يقوم بالحسابات ، الجدول الأول (الرصاصي) هو للقلب المعرض للاحتراق من جميع السطوح، والجدول الثاني (الأزرق) للقلب المعزول السطح الاسطواني الخارجي ، والجدول الثالث (الأخضر) هو للقلب المقسم إلى N قطعة ومعزول السطح الاسطواني الخارجي

الآن ننظر إلى النتائج، وأكثر شيء يهمنا هو آخر ثلاث أعمدة ، وهي المدى والقيمة التقديرية لطول المحرك ولكتلة رأس الصاروخ. (أيضا هناك نتائج أخرى مهمة مثل زمن الاحتراق وكتلة الوقود).

بالنظر إلى النتائج في الأعمدة الثلاث الأخيرة نختار أفضل تصاميم ممكنة . ونسجل معطيات أفضل نتيجة أو نتائج توصلنا إليها. أي نسجل القيم التي ادخلناها في الخطوات الستة السابقة، بالإضافة إلى قطر عنق المنفث وقطر ثقب القلب والضغط الأقصى وطول القلب وكتلة الوقود والدفعة الكلية ومتوسط قوة الدفع وزمن الاحتراق و المدى والقيمة التقديرية لطول المحرك ولكتلة رأس الصاروخ.

الآن نغير عدد قطع القلب المقسم، ونعيد اخذ المعطيات للتصميم أو التصاميم التي تعجبنا في الجدول الثالث (الأخضر).
أيضا نستطيع تغير قيمة كتلة الصاروخ بدون وقود ، وإعادة أخذ المعطيات مرة أخرى.

وبهذا نكون قد حصلنا على أفضل تصميم ممكن للماسورة والوقود المتوفرين عندنا. نستطيع أن نعيد الحل لماسورة أخرى ووقود آخر لوضع تصاميم أخرى.

لنأخذ مثال:

لنفرض أنه طلب منا تصميم صاروخ مداه أكثر من عشر كيلومترات وكتلة رأسه أكبر من ٢ كيلوغرام وطول محركه أقل من ٧٠ سنتميتر، (وهذا ما نسميه متطلبات التصميم).
لنفرض الآن أننا بحثنا عن المواد المتوفرة ، فوجدنا مواسير ٣ انش بسمك جدرار ١,٨ مليمتر. وأننا تمكنا من صنع وقود سكر-نترات البوتاسيوم (انظر الكتاب الأول في هذه السلسلة).
الآن لنفرض أننا بحثنا عن اسم المادة المصنوعة منها المواسير فوجدنا أنها مصنوعة من الفولاذ قليل الكربون نوع (C1015 Hot rolled) ، بالرجوع إلى الجداول في المراجع او الانترنت (مثل الجدول في الفصل الثالث من هذا الكتاب)، سنجد ان اجهاد المطاوعة لهذه المادة هو $(227\,MPa)$ وأن الكثافة هي $(7860\,Kg/m^3)$.
الآن لنفرض أننا قسنا قطر الماسورة فكانت ٨ سنتيمتر (التسمية ٣ انش هي تقريبية!).

الآن ندخل كل هذه القيم في مكانها المناسب في ملف الإكسل (الخلايا المظللة بالأسود) بعد تحويلها إلى الوحدات المبينة في الملف:
قطر الماسورة: ٠,٠٨ متر (للتحويل من سنتيمتر إلى متر قسمنا على ١٠٠)
سمك جدار الماسورة: ٠,٠٠١٨ متر (للتحويل من سنتيمتر إلى متر قسمنا على ١٠٠)
اجهاد المطاوعة ٢٢٧٠٠٠٠٠٠ باسكال (للتحويل من MPa إلى باسكال ضربنا بمليون)
كثافة مادة الماسورة ٧٨٦٠ كيلوغرام لكل متر مكعب

أما بالنسبة للوقود ، فوقود (نترات البوتاسيوم- سكر) بنسبة وزنية (٦٥% -٣٥%) له الصفات التالية (ضمن نسبة مساحة K_n من ١٠٠ إلى ٤٠٠ ، وهذا متحقق في هذا المثال، أما إن كانت الـ K_n أكبر من ٤٠٠ فيجب التأكد من صحة هذه القيم أو البحث عن قيم جديدة). صفات الوقود:
درجة حرارة الاحتراق: ١٦٢٠ كلفن
كثافة: ١٨٣٠ كيلوغرام لكل متر مكعب
معامل سرعة الاحتراق n : 0.4
معامل سرعة الاحتراق a : ٠,٠٠٠٠٣ بوحدة $(m/s/Pa^{0.4})$
الدفعة النوعية I_s : ١٣٠ ثانية
ندخل هذه القيم في مكانها المناسب من ملف الإكسل في الخلايا المظللة بالأسود.

أما C_F فهو لهذا النوع من الوقود يكون قريب من ١,٥ ، لذا ندخلها في مكانها المناسب المظلل بالأحمر (أو نبحث عن قيمة أدق وستكون قريبة).

في الملف قدرت القطر الخارجي للقلب بـ ٠,٩٥ ضعف قطر الماسورة، وبامكاننا تعديل هذا المعامل في الخلية (وهي مظللة بالأحمر). أيضا قدرت أقصى قطر للصاروخ بـ ١,١ ضعف القطر الخارجي للماسورة، وبامكاننا تعديل هذا المعامل او القيمة في الخلية (وهي مظللة بالأحمر). أيضا قدرت معامل المقاومة Cd بـ ٠,٤ وبامكاننا تعديله إن كان لدينا قيمة أدق (وستكون قريبة).

الآن نريد تجريب قيمة لكتلة الصاروخ دون وقود. بما أننا طلبنا أن تكون قيمة كتلة رأس الصاروخ أكبر من ٢ كيلومتر، فنستطيع أن نجرب قيمة ٥ كيلوغرامات لكتلة الصاروخ دون وقود mf (انتبه أن كتلة الصاروخ دون وقود لا تعني كتلة الرأس، هي تعني كتلة الرأس والمحرك دون وقود والذيل ...)، إذن ندخل إلى الخلية المناسبة المظللة بالأسود كتلة الوقود ٥ كيلوغرام.

الآن بقي إدخال رقم أخير وهو يخص القلب المقسم فقط، وهو عدد القطع القلبية، وهو الخلية المظللة بالأسود في بداية الجدول الثالث (الأخضر) ، ورقم الخلية هو C173 . فلنجرب أن ندخل الرقم ٣ (ثلاث قطع قلبية). ونؤكد أن هذا الرقم خاص بالجدول الثالث ولا يؤثر على الجدولين الأول والثاني (الرصاصي والأزرق).

الآن انتهينا من ادخال المعلومات، وقام ملف الإكسل بالحسابات، فكل ما علينا هو النظر في النتائج لاختيار التصاميم الناجحة والموافقة للشروط (متطلبات التصميم)، وللتذكير هذه المتطلبات كانت :

١ – المدى أكبر من ٨٠٠٠ متر (أي أكبر من ٨ كيلومتر)
٢ – طول المحرك أقل من ٠,٧ متر(أي أكبرمن ٧٠ سنتمتر)
٣ – كتلة الرأس أكبر من ٢ كيلوغرام.

إذن ننظر إلى عمود المدى وعمود الطول التقديري للمحرك وعمود الكتلة التقديرية لرأس الصاروخ في الجداول الثلاث في الملف، حيث الجدول الأول (الرصاصي) هو للوقود المحترق من جميع السطوح(قطعة واحدة)، والجدول الثاني (الأزرق) هو للوقود المعزول السطح الخارجي (قطعة واحدة)، والجدول الثالث (الأخضر) هو للوقود المعزول السطح الخارجي المقسم لعدد القطع الذي أدخلناه، وهو ٣ للتجربة الأولى. ننقل أهم مواصفات التصاميم الناجحة إلى جدول جديد كما في الجدول التالي. ثم نعيد للجدول الأخضر لـ ٢ قطعة (ندخلها في مكانها المظلل بالأسود في بداية الجدول) ، ثم نأخذ أهم مواصفات التصاميم الناجحة ونضعها في الجدول جديد، ونعيد لـ ٤ قطع ثم ٥ ثم ٦ وأكثر إن شئنا. نضع كل المواصفات المهمة للتصاميم المحققة للمتطلبات -او التي تكاد أن تحقق المتطلبات إن شئنا- في جدول جديد ، مثل الجدول التالي:

شكل القلب	قطر عنق المنفث	قطر ثقب القلب (الوقود)	طول القلب (الوقود)	كتلة الوقود	الدفعة الكلية	زمن الاحتراق	المدى	قيمة تقديرية لطول المحرك	قيمة تقديرية لكتلة رأس الصاروخ
	متر	متر	متر	كيلوغرام	نيوتن.ثانية	ثانية	متر	متر	كيلوغرام
جميع السطوح محترقة	0.032	0.045	0.41	2.20	2796	0.6	8474	0.49	2.5
السطح الخارجي معزول	0.032	0.049	0.49	2.42	3081	1.5	9760	0.59	2.0
خارجي معزول- عدد القطع ٣	0.024	0.034	0.37	2.42	3079	2.3	9584	0.43	2.8
خارجي معزول- عدد القطع ٣	0.024	0.041	0.43	2.54	3232	1.5	10540	0.51	2.3
خارجي معزول- عدد القطع ٢	0.024	0.033	0.43	2.88	3667	1.9	12797	0.51	2.4

خارجي معزول- عدد القطع ٢	0.024	0.041	0.37	2.15	2742	1.7	8010	0.44	2.7
خارجي معزول- عدد القطع ٢	0.032	0.049	0.49	2.64	3361	1.7	11177	0.58	2.0
خارجي معزول- عدد القطع ٤	0.024	0.034	0.43	2.90	3690	2.1	12893	0.52	2.3
خارجي معزول- عدد القطع ٤	0.024	0.041	0.38	2.24	2860	1.7	8588	0.46	2.7
خارجي معزول- عدد القطع ٤	0.024	0.041	0.50	2.92	3723	1.4	13230	0.60	2.0
خارجي معزول- عدد القطع ٤	0.024	0.049	0.45	2.20	2807	1.1	8438	0.54	2.2
خارجي معزول- عدد القطع ٤	0.032	0.045	0.40	2.18	2781	2.1	8130	0.48	2.5
خارجي معزول-عدد القطع ٥	0.024	0.036	0.36	2.43	3101	2.5	9664	0.44	2.8
خارجي معزول- عدد القطع ٥	0.024	0.034	0.50	3.38	4300	1.9	16393	0.61	1.9
خارجي معزول- عدد القطع ٥	0.024	0.041	0.48	2.63	3350	1.5	11162	0.54	2.3
خارجي معزول- عدد القطع ٦	0.024	0.034	0.44	2.91	3712	2.2	12986	0.52	2.3

ملاحظة : طول الوقود في الجدول لحالة القلب المقسم هو مجموع أطوال القلوب وليس طول كل قلب، أما طول كل قلب فنحسبه بقسمة الطول على عدد قطع القلب.

الآن نستطيع أخذ قيمة أخرى لكتلة الصاروخ دون وقود(mf) وندخلها في مكانها المناسب، ونعيد الخطوات السابقة من البداية لنحصل على جدول جديد. لكن لن أفعل هذا حتى لا يطول الشرح.

الآن نقارن بين التصاميم في الجدول السابق ، ونختار الذي يرضينا أكثر(وليس بالضرورة ذو اكبر مدى، فقد يكون من الأفضل أن نأخذ ذو أقل زمن احتراق حتى نضمن عدم انهيار المحرك وأمور أخرى).

إذن هذه هي طريقة وضع التصميم بواسطة ملف الإكسل، أيضا بامكانك التجريب لمواسير أخرى لتحصل على تصاميم لصواريخ أخرى بمواصفات أخرى، أيضا بامكانك التجريب لنوع وقود آخر. المهم أن تعوض القيم الصحيحة في الخلايا المظللة بالأسود (والأحمر).

بسم الله الرحمن الرحيم

هذا الملف مرفق مع كتاب "التصميم الأولي لمحركات المراوح" لعزيز من التوضيح راجع الفصل الخامس من الكتاب

مهم : يسمح بأن فقط بالتعديل على الخلايا باللون الأسود، وهو الذي تحت هذه الكتابة بالإضافة إلى الخانة الموجودة في بداية الجدول الأخضر (تحت)

تستخلص تغيير الخلايا باللون الأحمر إن كان عندك قيم أخرى

الخانة المدخلة	الوحدة المستخدمة	ملاحظات
قطر المانيورة	متر	0.08
سمك جدار المانيورة	متر	0.0018
اجهاد المقاومة	باسكال	227,000,000
كثافة مادة المانيورة	كغ/ م3	7,860
درجة حرارة الاختراق	كلفن	1620
معامل الامان		2.5
كثافة الوقود	كغ/ م3	1630
n		0.4
a		0.00003
Is		130
Cf		1.5
Pc,at		4080000
Kn,all		198.6682673
الفطر الحرج للطب D		0.076
...		
mf		5
Cd		0.6
Dmax		0.088

الخانة المستخدمة	الوحدة	ملاحظات
الطريقة		
كثيلو نوارم		
متر		أكبر قطر للمنزلوق ومنفرضه بسلوي فطر المحرك مضروب بـ 1.1

أدا لحين لها مسحيحة

يجب التاكد من أن هذه القيم مسموحة بالنسبة للوقود التي تتعامل معها (هي Kn مسموحة)

الدفعة للوقود

قيمة تقديرية أو أي تصلح لمعظم انواع الوقود

مثلا

Kn أقصى

اعتيادها لسوي 0.95

القيمة	الوحدة المستخدمة	ملاحظات
5	كيلو نوارم	
0.6		
0.088	متر	أكبر قطر للمنزلوق ومنفرضه بسلوي فطر المحرك مضروب بـ 1.1

ملاحظة: ظهور كلمة #VALUE! أو #N/A في أي سجل معناه أن التصميم في تلك السطر مرفوض

الاختراق على جميع السطوح

تحكم على جودة المصروف الناتج من هذا

قطر على المعلقة	مساحة مقطع على المعلقة	قطر الطب (الوقود)	مساحة مقطع الطب (الوقود)	مساحة سطح الاختراق الابتدائية	مساحة سطح الاختراق النهائية	(النهاية) Kn (أو قيمة الاختراق)	طول (الوقود) الطب	Kn الابتدائية	مساحة مقطع الاختراق الابتدائية	مساحة سطح الاختراق النهائية	(النهاية) Kn,f (أو قيمة الاختراق)	(القصور) Kn,max	متوسط (Kn) وتربيعها ان كانت Kn,max الحد الأقصى	متوسط Kn,av الحد	الحد الأقصى Kn,all	معامل تصحيح الحدي	عدد تأثير المقاومة	زمن الاختراق	متوسط الدفعة الفعلية	الدفعة الفعلية الثانية	كفاءة الوقود	الطول الحركة	قيمة تقديرية أقل دفعة أساس المصروف	قيمة تقديرية أعلى دفعة أساس المصروف
Dt	At	d	Abl	I	Abf	Kn,f	Kni	Kn	Abi	I	Kn,f	Kn,max	Kn,av	Kn,all	fz	Num	tb	F,av	mp	Pc,max	Pc,av	I_motor	X	m_head
الوحدات :	متر مربع	متر	متر مربع						متر مربع															
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX					0.005024	100	0.0112	0.00005024	0.008	1			#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	2														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	3														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	4														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	5														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	6														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	7														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	8														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	9														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	10														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	11														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	12														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	13														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	14														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	15														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	16														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	17														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	18														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	19														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	20														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	21														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	22														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	23														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	24														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	25														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	26														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	27														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	28														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	29														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	30														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	31														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	32														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	33														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	34														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	35														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	36														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	37														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	38														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	39														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	40														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	41														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	42														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	43														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	44														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	45														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	46														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	47														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	48														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	49														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	50														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	51														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	52														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	53														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	54														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	55														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	56														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	57														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	58														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	59														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	60														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	61														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	62														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	63														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	64														

قطع قلبية عددها 3 (بإمكانك تغير هذا الرقم إلى عدد القطع القلبية التي تريد بها)

السطح الاسطواني الخارجي ممنوع من الاختراق

تحكم على جودة المصروف الناتج من هذا

قطر على المعلقة	مساحة مقطع على المعلقة	قطر الطب (الوقود)	مساحة مقطع الطب (الوقود)	مساحة سطح الاختراق الابتدائية	مساحة سطح الاختراق النهائية	(النهاية) Kn (أو قيمة الاختراق)	مومرج الطول الطب	Kn الابتدائية	مساحة مقطع الاختراق الابتدائية	مساحة سطح الاختراق النهائية	(النهاية) Kn,f (أو قيمة الاختراق)	(القصور) Kn,max	متوسط (Kn) وتربيعها ان كانت Kn,max الحد الأقصى	متوسط Kn,av الحد	الحد الأقصى Kn,all	معامل تصحيح الحدي	عدد تأثير المقاومة	زمن الاختراق	متوسط الدفعة الفعلية	الدفعة الفعلية الثانية	كفاءة الوقود	الطول الحركة	قيمة تقديرية أقل دفعة أساس المصروف	قيمة تقديرية أعلى دفعة أساس المصروف
Dt	At	d	Abl	I	Abf	Kn,f	Kni	Kn	Abi	I	Kn,f	Kn,max	Kn,av	Kn,all	fz	Num	tb	F,av	mp	Pc,max	Pc,av	I_motor	X	m_head
الوحدات :	متر مربع	متر	متر مربع						متر مربع															
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX					0.005024	100	0.0112	0.00005024	0.008	1			#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	2														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	3														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	4														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	5														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	6														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	7														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	8														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	9														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	10														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	11														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	12														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	13														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	14														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	15														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	16														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	17														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	18														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	19														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	20														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	21														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	22														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	23														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	24														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	25														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	26														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	27														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	28														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	29														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	30														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	31														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	32														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	33														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	34														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	35														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	36														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	37														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	38														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	39														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	40														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	41														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	42														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	43														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	44														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	45														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	46														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	47														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	48														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	49														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	50														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	51														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	52														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	53														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	54														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	55														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	56														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	57														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	58														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	59														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	60														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	61														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	62														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	63														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	64														

السطح الاسطواني الخارجي ممنوع من الاختراق

تحكم على جودة المصروف الناتج من هذا

قطر على المعلقة	مساحة مقطع على المعلقة	قطر الطب (الوقود)	مساحة مقطع الطب (الوقود)	مساحة سطح الاختراق الابتدائية	مساحة سطح الاختراق النهائية	(النهاية) Kn (أو قيمة الاختراق)	طول (الوقود) الطب	Kn الابتدائية	مساحة مقطع الاختراق الابتدائية	مساحة سطح الاختراق النهائية	(النهاية) Kn,f (أو قيمة الاختراق)	(القصور) Kn,max	متوسط (Kn) وتربيعها ان كانت Kn,max الحد الأقصى	متوسط Kn,av الحد	الحد الأقصى Kn,all	معامل تصحيح الحدي	عدد تأثير المقاومة	زمن الاختراق	متوسط الدفعة الفعلية	الدفعة الفعلية الثانية	كفاءة الوقود	الطول الحركة	قيمة تقديرية أقل دفعة أساس المصروف	قيمة تقديرية أعلى دفعة أساس المصروف
Dt	At	d	Abl	I	Abf	Kn,f	Kni	Kn	Abi	I	Kn,f	Kn,max	Kn,av	Kn,all	fz	Num	tb	F,av	mp	Pc,max	Pc,av	I_motor	X	m_head
الوحدات :	متر مربع	متر	متر مربع						متر مربع															
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX					0.005024	100	0.0112	0.00005024	0.008	1			#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	2														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	3														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	4														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	5														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	6														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	7														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	8														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	9														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	10														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	11														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	12														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	13														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.0112	0.00005024	0.008	14														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00832873	165.778845	0.0112	0.00005024	0.008	15														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00667636	132.889422	0.0112	0.00005024	0.008	16														
0.00005024	0.008	0.0112	0.0005024	XXX	0.00998109	198.668267	0.