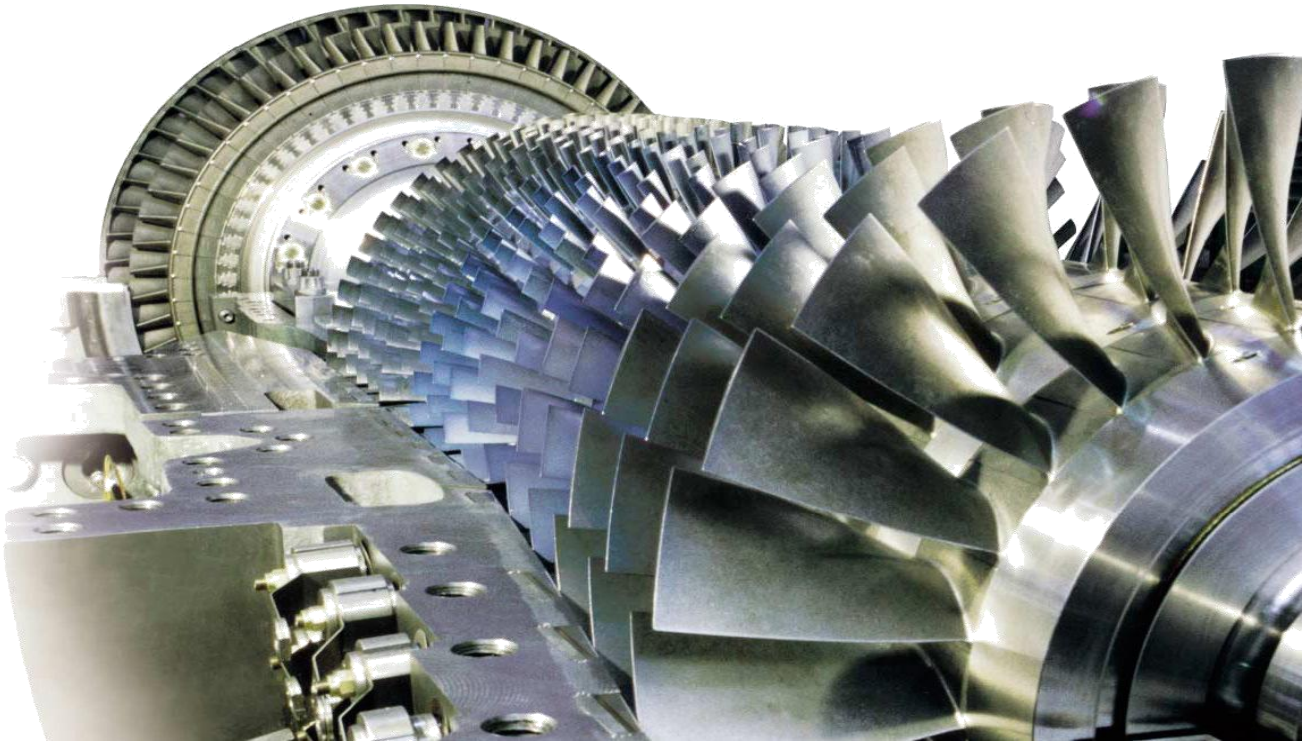
# التوربين الغازي

## تصميم وتشغيل – دورة تدريبية



# GAS TURBINE

## *Design & Operation - Training Course*


إعداد وترجمة

المهندس عدنان بهجت جليل


٢٠١٨

# إهداء

أهدي هذا العمل المتواضع ...

- إلى الرجل الذي جاهد طوال حياته ليجعلني أنعم بأفضل حياة ... إلى الذي لم يبخل عليّ يوما بشيء ... إلى الذي علمني النجاح والصبر ... إلى الذي حصد الأشواك عن دربي ليمهد لي طريق العلم ... إلى الذي أورثتني أعظم الأشياء في الحياة ، مخافة الله و التسامح و السمعة الطيبة ... إلى الذي أحمل أسمه بكل فخر ... إلى الذي أفتقده كل يوم ... والدي العزيز الحاج المرحوم بهجت جليل صالح آغا ... أتذكر الآن بعد رحيلك كل أيام شقائك و تعبك وفهمت مبتغاك ... فليتغمدك الله برحمته الواسعة .

- إلى الذي غادرنا فجأة وللأبد ، ولم نكن نعلم أن ذلك هو المشهد الأخير ... إلى الذي أحببته ملأ الدنيا وأفتقدته جدا حدا ... إلى أخي المهندس الصغير حسين ... يرحمك الله الغفور الرحيم ...

- إلى من أرضعتني الحب والحنان ... إلى رمز الحب وبلسم الشفاء ... إلى القلب الناصع بالبياض ... والدتي الحبيبة ... أطال الله عمرك بكل خير ...

- إلى رفيقة دربي في السراء والضراء ... إلى التي وقفت بجواري في أصعب أيام حياتي ... زوجتي العزيزة ... أطال الله عمرك بكل خير ...

- إلى أساتذتي الأفاضل جميعا ... ألذين علموني وأهتموا بتدريسي من مرحلة الإبتدائية وحتى تخرجي من جامعة البصرة \ كلية الهندسة \ قسم الهندسة الميكانيكية ... إلى كل من علمني حرفا ... مني كل التحية والتقدير ...

أجر هذا الكتاب عزيزي القارىء ... دعاء لوالدي ولأخي الصغير ( يرحمهما الله ) ...
وجزاك الله خيرا

# مقدمة

الحمد لله رب العالمين ، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين ، سيدنا محمد وعلى آله وأصحابه أجمعين .
من المعلوم أن الغرب في اللحظة الحضارية الآنية - يستنبت - العلم بلغاته ويخترع المخترعات ، ويخرج للعالم يوميا بمئات المصطلحات والألفاظ الجديدة حتى أنه لا يزال الكثير من المصطلحات والتسميات العلمية نلفظها باللغة الأنكليزية لعدم معرفتنا بما يكافئ أو يعادل معناها باللغة العربية أو من المحتمل عدم وجود أية ترجمة لها أصلا، وهذا ما ألاحظه وأعيشه من خلال عملي في مجال توليد الطاقة الكهربائية . وأمام هذا الوضع ، تجد اللغة العربية نفسها مضطرة إلى مواكبة هذا التطور العلمي ، وهذه المبتكرات اللغوية مصطلحيا إذ إنها مطالبة أكثر من أي وقت مضى باللحاق بالركب الحضاري الغربي ، وبمسايرة زخمه المصطلحي في شتى الميادين المعرفية والعلمية .
من خلال تجوالي في مواقع الأنترنيت العلمية ، وجدت كتابا باللغة الإنكليزية عبارة عن دورة تدريبية في مجال تشغيل وتصميم التوربينات الغازية ورحت أتصفحه بداية ، ثم غرقت في صفحاته ، ولم أتركه لأيام ، وبعدها وبعد تفكير وتدقيق ، رأيت أن أبدأ في إعداد ترجمة عربية للكتاب لما يحتويه من معلومات مفيدة جدا للعاملين من أخواني المهندسين في مجال إنتاج الطاقة الكهربائية بالمحطات الغازية التي تعمل على مبدأ دورة برايتون للتوربين الغازي ولأثراء المكتبة العلمية العربية بمثل هذه الترجمات والتي تفتقر إلى الكثير من المصادر والمراجع العلمية المهمة في مجال الهندسة النظرية و التطبيقية ، وفعلا بدأت الترجمة التي استغرقت أكثر من سبعة أشهر نظرا لإنشغالي بأعمال وظيفتي كرئيس قسم التخطيط والمتابعة في محطة كهرباء الدبس الغازية إذ كنت أعكف على ترجمة الكتاب خلال أوقات الفراغ والإجازات والعطل الرسمية .
هذا الكتاب هو ترجمة لكتاب ( GAS TURBINES DESIGN & OPERATION - Training Course ) من إعداد المهندس عبدالله زمان الميرزا الذي أعتمد على عدة مصادر مهمة تم ذكرها في نهاية الكتاب ... لذا أنا أدين له بالشكر والتقدير لجهوده المتميزة في إعداد ونشر هذا الكتاب القيم في مواقع الأنترنيت للمنفعة العامة جعله الله عز وجل في ميزان حسناته .
إن الترجمة العلمية والتقنية من اللغة الأنكليزية الى اللغة العربية وتعريب المصطلحات العلمية ليس بالأمر السهل فهي عملية وضع لغة علمية تتطلب الكثير من الدقة والوضوح ، خالية من كل لبس أو خفاء ، بعيدة كل البعد عن الإحتمالية . وبالإعتماد على مصادر ومراجع ومعاجم مختلفة تم ذكرها في نهاية الكتاب وكذلك مواقع ألكترونية مثل مترجم غوغل وموقع معاني على شبكة الأنترنيت ، فقد حاولت في هذه الترجمة قدر الإمكان إختيار أنسب المعاني للمصطلحات العلمية والنحوية التي تدل على المفهوم المراد دلالة واضحة دقيقة محددة ، وتحدد كل أبعاده وإحتمالاته مع إدراج ملاحظات توضيحية وشرح إغنائي لكل مصطلح علمي آخر ذكر في أصل الموضوع ، وأرجوا أن أكون قد وفقت في ذلك .
وأخيرا انا لا أجزم بتمام صحة الكلمات والمصطلحات العربية المعادلة للكلمات والمصطلحات الأنكليزية المذكورة في هذا الكتاب ، فقد تكون هنالك كلمات عربية معادلة ومناسبة أكثر ، لذا وبكل إحترام وتقدير أطلب من جميع الأساتذة والمختصين والمهندسين من أصحاب الخبرة وكل من يقرأ هذا الكتاب من أصحاب الخبرة أن لا يبخلوا في إبداء مقترحاتهم وملاحظاتهم التصحيحية والإغنائية وإرسالها على العنوان الإلكتروني التالي خدمة للصالح العام : Koprlo1@gmail.com أو agakoprlo@hotmail.com . والله ولي التوفيق ...

المهندس عدنان بهجت جليل
آلتون كوبري – كركوك - العراق
٢٦ \ تشرين الاول \ ٢٠١٨

# جدول المحتويات Table of Content


| الصفحة | الموضوع | |
|---|---|---|
| ٦ - ٣٣ | **نبذة عامة عن التوربينات الغازية**<br>ما هو التوربين الغازي وكيف يعمل ؟<br>الأنواع الرئيسية لمحركات الاحتراق الداخلي<br>تصنيفات التوربينات الغازية ذات القاعدة الأرضية<br>الفرق بين محرك الاحتراق الداخلي والخارجي<br>الفرق بين التوربينات الغازية والتوربينات البخارية<br>أمثلة لمحركات الإحتراق الخارجي<br>الفرق بين التوربينات الغازية والمحركات الترددية<br>التوربينات الغازية المستخدمة للطيران<br>تأثير الظروف الجوية على أداء التوربينات الغازية<br>تأثير كثافة الهواء على سيارة السباق<br>تأثير كثافة الهواء على محركات الطائرات<br>الفرق الرئيسي بين التوربينات الغازية المستخدمة لإنتاج الطاقة الكهربائية (الأرضية ) والتوربينات الغازية المستخدمة في الطائرات<br>تأريخ التوربينات الغازية ومراحل تطورها | **Gas turbines general notes** |
| ٣٤ - ٣٩ | **منظومة مدخل هواء التوربين الغازي**<br>الأجزاء الرئيسية لمدخل الهواء<br>تفعيل أو تنشيط نظام الهواء النبضي ( مثال من التوربين الغازي SIEMENS V94.2 ) | **Gas Turbine air intake system** |
| ٤٠ - ٦٧ | **ضاغط التوربين الغازي**<br>الغرض الرئيسي من الضاغط<br>الأنواع الرئيسية للضواغط المستخدمة في محركات التوربينات الغازية<br>ضاغط الطرد المركزي<br>الضاغط المحوري<br>عملية غسل الضاغط<br>الفرق بين الضواغط المحورية والطرد المركزي<br>تصميم الضاغط المحوري<br>مزايا خطوط التنفيس<br>إعتبارات التصميم الرئيسية في الضاغط محوري<br>ملاحظات توضيحية لبعض المصطلحات<br>أنواع تأثيرات الهواء أثناء عملية الإنضغاط في الضاغط المحوري<br>تأثيرات تدفق الهواء على الضاغط المحوري<br>ظاهرة إضطراب الهواء في الضاغط المحوري (إضطراب \ توقف الضاغط )<br>الأسباب الرئيسية لظاهرة إضطراب الهواء في الضاغط المحوري<br>الحماية من إضطراب الهواء في الضاغط المحوري<br>ملاحظات توضيحية | **Gas turbine compressor** |
| ٦٨ - ٩٧ | **غرف إحتراق التوربين الغازي**<br>مبادىء الإحتراق<br>ملاحظات توضيحية<br>متطلبات الإحتراق الجيد<br>العوامل المهمة لبدء الإحتراق<br>أنواع غرف الإحتراق المستخدمة في التوربين الغازي<br>الأجزاء الرئيسية لغرفة الإحتراق<br>النقاط المهمة في عملية الإحتراق<br>الأشكال المختلفة للشعلة أثناء الإحتراق<br>الشكل العام للمشعل المركب ( الهجين ) | **Gas turbine combustion chambers** |

| | |
|---|---|
| طنين أو أزيز الشعلة<br>مراحل الهواء أثناء الإحتراق<br>طرق تقليل إنبعاث أكاسيد النيتروجين الناتجة من غرف الإحتراق في التوربينات الغازية<br>طرق تقليل إنبعاث أكاسيد الكبريت الناتجة من غرف الإحتراق في التوربينات الغازية | |
| **التوربين الغازي – قسم التوربين Gas turbine – turbine section**<br>تصنيف التوربينات<br>مبادئ التوربين الدفعي وتوربين رد الفعل - أنواع مراحل التوربين<br>مرحلة الدفع<br>مرحلة رد الفعل<br>الإعتبارات أو الثوابت التصميمية الأساسية المستخدمة عند تصميم التوربين<br>الإختلافات الرئيسية بين التوربينات الدفعية وتوربينات رد الفعل<br>التكوينات المختلفة للتوربين الدفعي ( النبضي )<br>تصميم التوربين الغازي | ٩٨ - ١١٣ |
| **تقنية تبريد ريشة التوربين الغازي Gas turbine blade cooling technique**<br>طرق تبريد الريشة<br>مقارنة بين تبريد ريش التوربين بالهواء والتبريد بالماء<br>كيف يتم قياس فعالية تبريد الريشة ؟<br>تعريف التآكل والتعرية لريش التوربين الغازي | ١١٤ - ١٢٦ |
| **معلومات عامة عن أساسيات تصميم العمود الدوار للتوربين General notes in shaft design**<br>محاذاة محامل العمود الدوار<br>ملاحظات توضيحية<br>الإختلافات الرئيسية بين محور التوربين الغازي ومحور التوربين البخاري<br>السرعات الحرجة لمحور التوربين<br>الأسباب الرئيسية لإهتزاز العمود الدوار في التوربين<br>منحنى عزم الدوران والضغط و درجة الحرارة في التوربين<br>ملاحظة توضيحة | ١٢٧ - ١٣٩ |
| التوربين الغازي - وحدة بدء التشغيل Gas turbine - start up unit<br>أنواع أجهزة بدء الإدارة للتوربينات الغازية المستخدمة لإنتاج الطاقة الكهربائية | ١٤٠ - ١٤٣ |
| **أنظمة التحكم والحماية والتشغيل في التوربين الغازي Gas turbine operation, control & protections**<br>الأنواع الرئيسية لأجهزة التحكم بالسرعة \ الحمل<br>ملاحظات توضيحية<br>أنواع المنظمات ( الحواكم) المستخدمة في التوربين الغازي<br>عملية زيادة الحمل في التوربين الغازي<br>بعض العوامل التي من خلالها يتم تقدير عمر التوربين الغازي<br>تأثير درجة حرارة الهواء الداخل إلى الضاغط على القدرة الناتجة من التوربين الغازي<br>أهم الحمايات المستخدمة في التوربينات الغازية الأرضية<br>خطوات تشغيل التوربين الغازي الأرضي<br>ملاحظات توضيحية<br>توضيحات - نظامي التزامن والتباطؤ<br>التحكم في إنخفاض ( نزول) السرعة<br>لماذا منظم إنخفاض السرعة ضروري<br>الحمل المعزول | ١٤٤ - ١٦٦ |
| **طرق تحسين كفاءة التوربين الغازي Gas turbine efficiency & optimization**<br>المفاقيد في التوربين الغازي<br>ملاحظات توضيحية<br>الطرق المستخدمة لتحسين كفاءة التوربينات الغازية الأرضية | ١٦٧ - ٢٠٠ |

| | | |
|---|---|---|
| ٢٠١ - ٢٠٤ | **الملحق (A)**<br>إشارات الفشل أو الخلل في الضاغط<br>إشارات الفشل أو الخلل في التوربين<br>إشارات الفشل أو الخلل في غرفة الإحتراق | **Appendix (A)** |
| ٢٠٥ - ٢١٠ | **أشكال مختلفة** | |
| ٢١١ | **المراجع** | **References** |

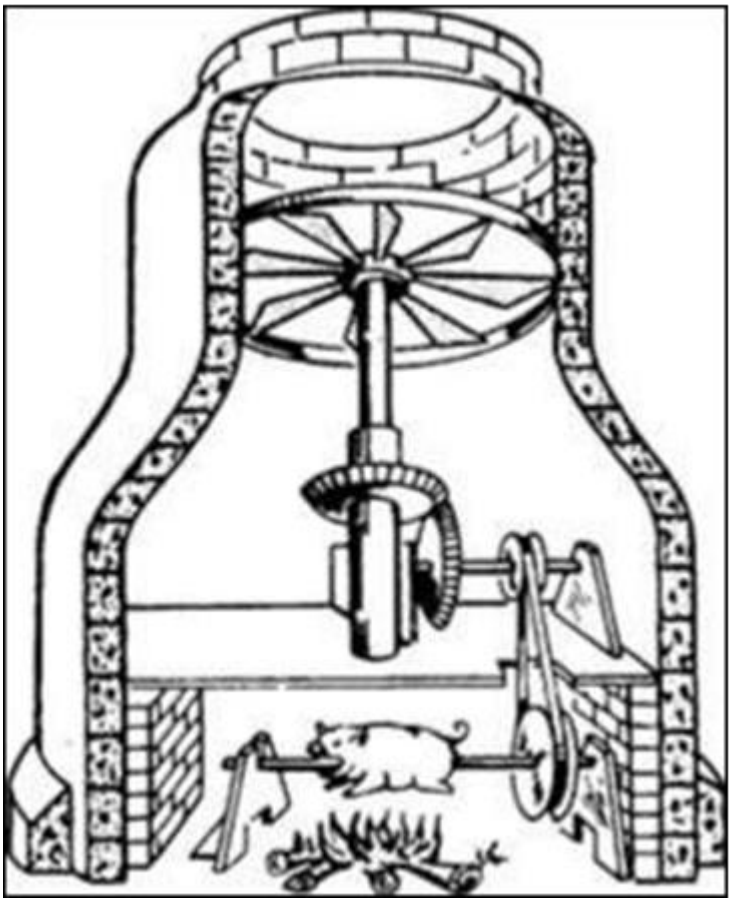
# نبذة عامة عن التوربين الغازي GAS TURBINE GENERAL NOTES

**ما هو التوربين الغازي وكيف يعمل ؟ What is the operating principal of gas turbine ?**

التوربين الغازي عبارة عن محرك احتراق داخلي Internal combustion engine ، وهو مصمم لتسريع Accelerate تدفق الغاز، الذي يستخدم لإنتاج قوة رد فعل Reactive thrust لدفع جسم ما ، أو إنتاج طاقة ميكانيكية Mechanical power لإدارة حمل ما ، يمكن توضيح مبدأ عمل التوربين الغازي في الأمثلة التالية :

**المثال الأول :**

يدخل الهواء البارد من الفتحة الموجودة في الجزء السفلي من الفرن ، حيث يختلط مع الغازات الساخنة التي تُطلق ( تتحرر ) من الإحتراق Combustion ، ستزداد درجة حرارته وبالتالي ستنخفض كثافته Density ، ثم يتحرك بإتجاه الأعلى و سوف يحل هواء بارد آخر محل الهواء الساخن بعملية مستمرة ، وذلك بسبب حركة الهواء الساخن إلى الأعلى ، فإنه سيتم إنشاء تيار هوائي طبيعي يمر عبر سلسلة من الريش Blades التي حركت و أدارت الشواية ( شيش الشوي ) وهكذا يتم توفير الطاقة للآلية الملحقة .



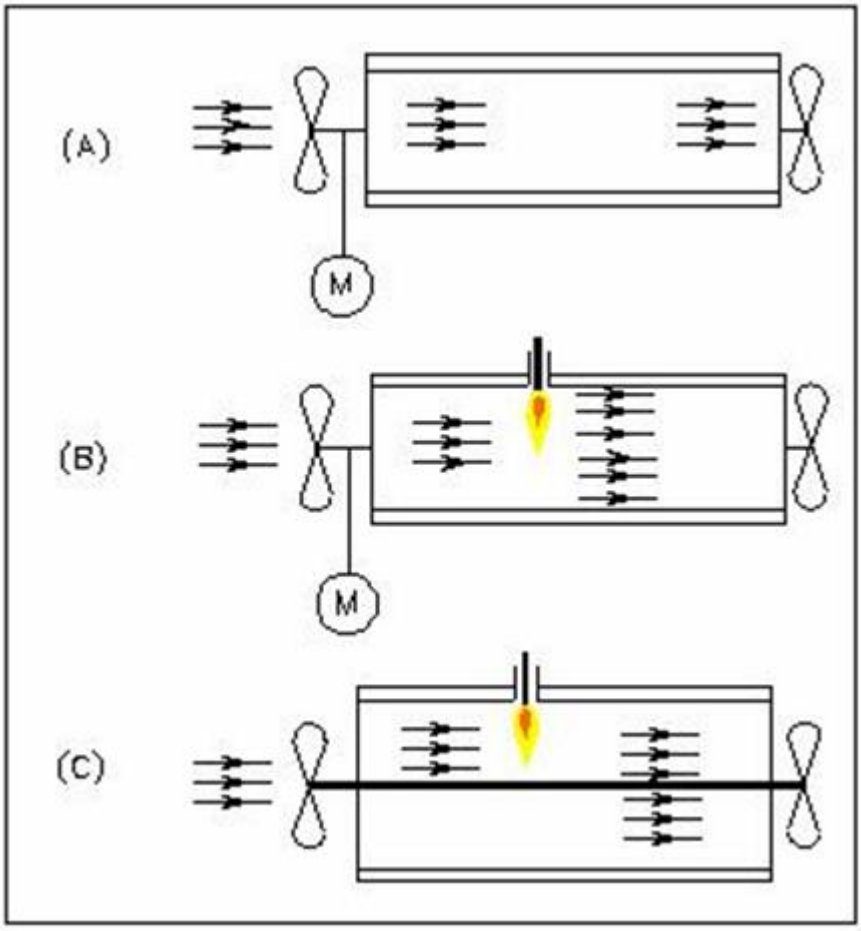
الشكل (١ ) توربين غازي من الطراز القديم 1500AD لـ BARB-Q ليس لتوليد الطاقة

**ملاحظة توضيحية :** BARB-Q باربكيو أو إختصارا (بي بي كيو BBQ) عبارة عن طريقة طبخ وآلة لتلك الطريقة . الإختلاف الرئيسي بين الباربكيو و الشواء هو أن عملية الباربكيو تتم ببطء في درجات حرارة منخفضة وغير مباشرة والطعام يكتسب نكهته من خلال الدخان ، بينما يتم الشواء بسرعة وعلى حرارة مباشرة تتراوح من الدرجات المتوسطة إلى العالية ولا ينتج الكثير من الدخان .

**المثال الثاني :**

يوضح الشكل (٢- A) مقطعا جانبيا لإسطوانة مع مروحة على كل طرف ، والآن إذا بدأت المروحة في الطرف الأيسر بالدوران بواسطة محرك كهربائي Electric motor محدود السرعة ، فسوف تسحب الهواء إلى داخل الأسطوانة مما يؤدي إلى تدوير مروحة الطرف الأيمن بنفس سرعة المروحة الأخرى ( إذا أهملنا خسائر ضغط الهواء بعد خسائر السرعة داخل الأسطوانة ) .

إذا قمنا بعمل ثقب في سطح الأسطوانة بين كل من المروحتين وأشعلنا شعلة مستمرة الشكل (٢ - B) ، فإن درجة حرارة الهواء المار عبر اللهب ستزداد وكذلك حجمه النوعي Specific volume ، وهذا سوف يسبب دوران المروحة اليمنى بشكل أسرع من المروحة اليسرى (لأن الهواء شغل مساحة أكبر من ذي قبل بعد تسخينه منذ زيادة حجمه النوعي وبالتالي سوف يزداد معدل التدفق الحجمي Volumetric flow rate ) . الآن ، إذا قمنا بفصل المحرك الكهربائي الذي يدير المروحة اليسرى وقمنا بتوصيل المروحة اليسرى بالمروحة اليمنى بواسطة عمود مع ضمان وجود شعلة مستمرة الشكل (٢. C ) ، فإن المروحة اليمنى ستنتج طاقة ميكانيكية كافية لتدوير المروحة اليسرى وحمل تطبيقي آخر .




الشكل ( ٢ ) التوربين الغازي المبسط Simplified gas turbine

الآن فكرة التوربين الغازي واضحة :

١ - المروحة اليسرى تمثل الضاغط أو المكبس Compressor

٢- المروحة اليمنى تمثل التوربين Turbine

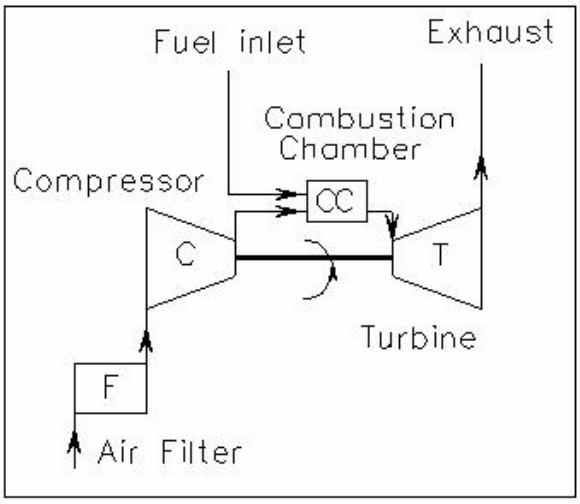
٣- الشعلة ( اللهب ) تمثل غرفة الإحتراق Combustion Chamber

٤- المحرك الكهربائي يمثل وحدة بدء التشغيل للتوربين الغازي Start up unit .

٥- حمل تطبيقي آخر يمكن أن يكون مولد كهربائي Electric generator ، أو مضخة Pump ، أو قوة دفعية Thrust propulsion كما في الطائرات Aircraft ... الخ .

٦- يوجد جزء إضافي من التوربين الغازي وهو فلتر أو مرشح الهواء Air filter لضمان دخول الهواء النظيف .

الآن إذا نظرنا إلى الشكل (٣) يمكننا أن ندرك التكوين الحقيقي للتوربين الغازي .




الشكل ( ٣ ) دورة التوربين الغازي المفتوحة open cycle gas turbine

**الأنواع الرئيسية لمحركات الاحتراق الداخلي**
**Main types of internal combustion engines**
محركات الاحتراق الداخلي الأكثر شيوعا :

**١- محركات ترددية Reiprocating engines**

هناك طريقتان تُصنف بهما المحركات الترددية وهما :

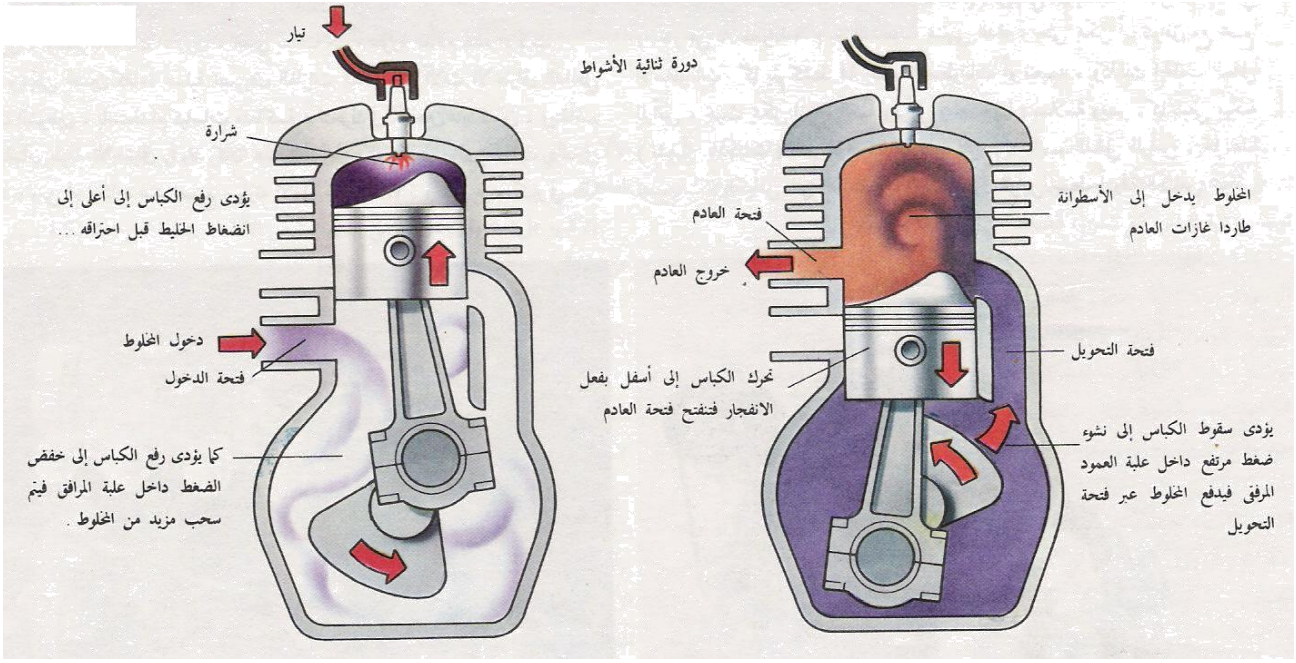
محركات الاشتعال بالشرارة (التي تحرق الكيروسين kerosene ) Spark ignition engines

محركات الاشتعال بالضغط (التي تحرق الديزل diesel ) Compression ignition engines

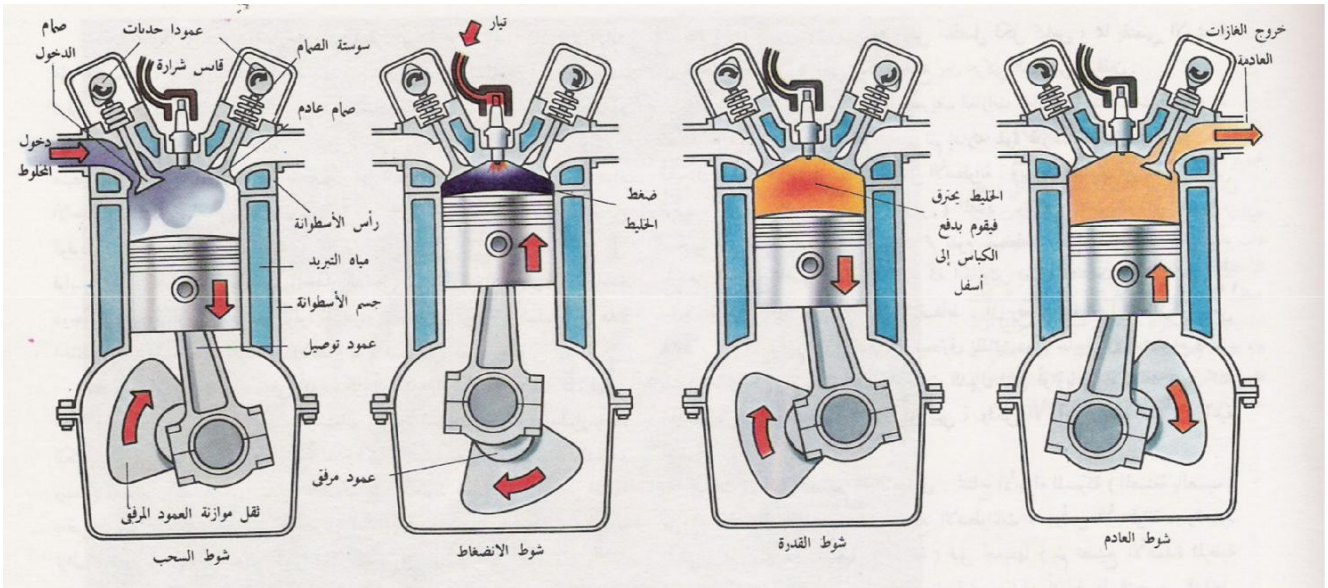
طريقة أخرى لتصنيف المحركات الترددية هي :

أ - محركات ثنائية الأشواط Two stroke engines

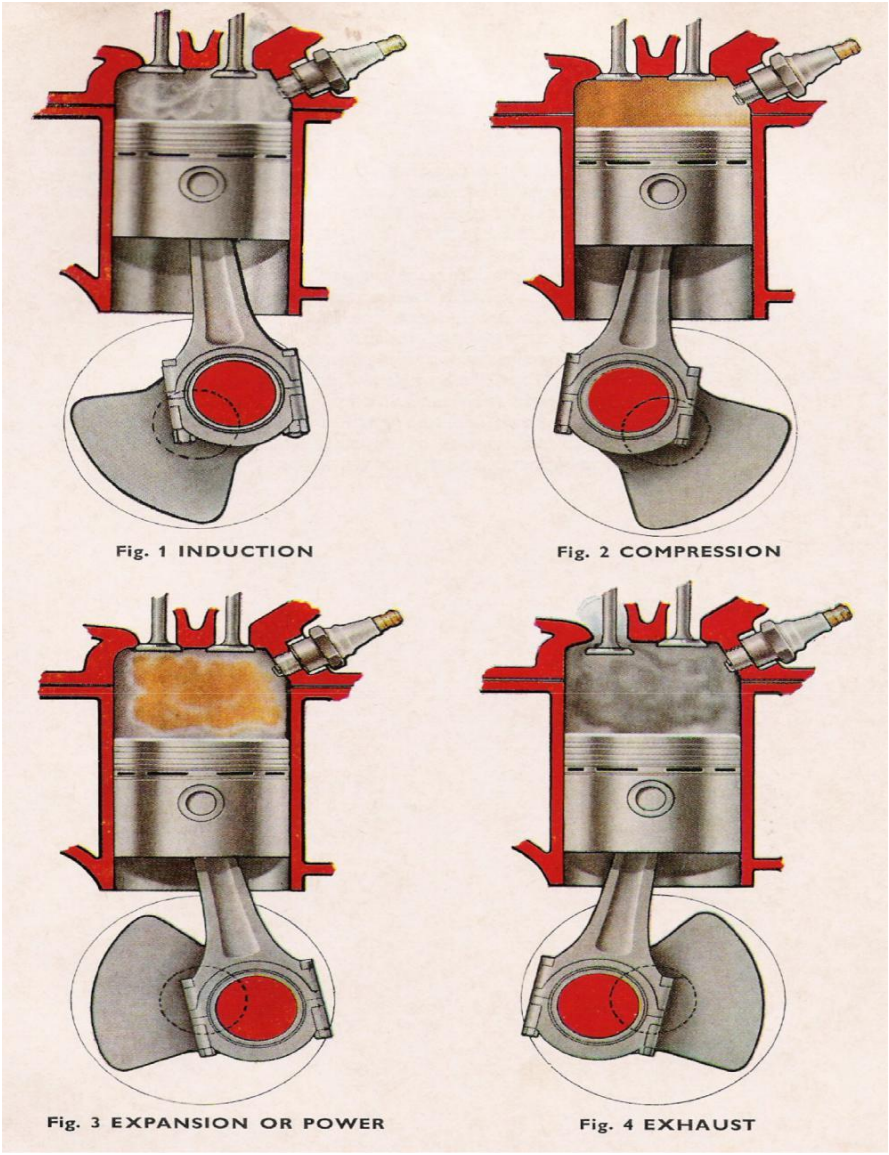
ب - محركات رباعية الأشواط Four stroke engines




الشكل ( ٤ ) محرك ترددي ثنائي الأشواط 2- Stroke Reciprocating Engine



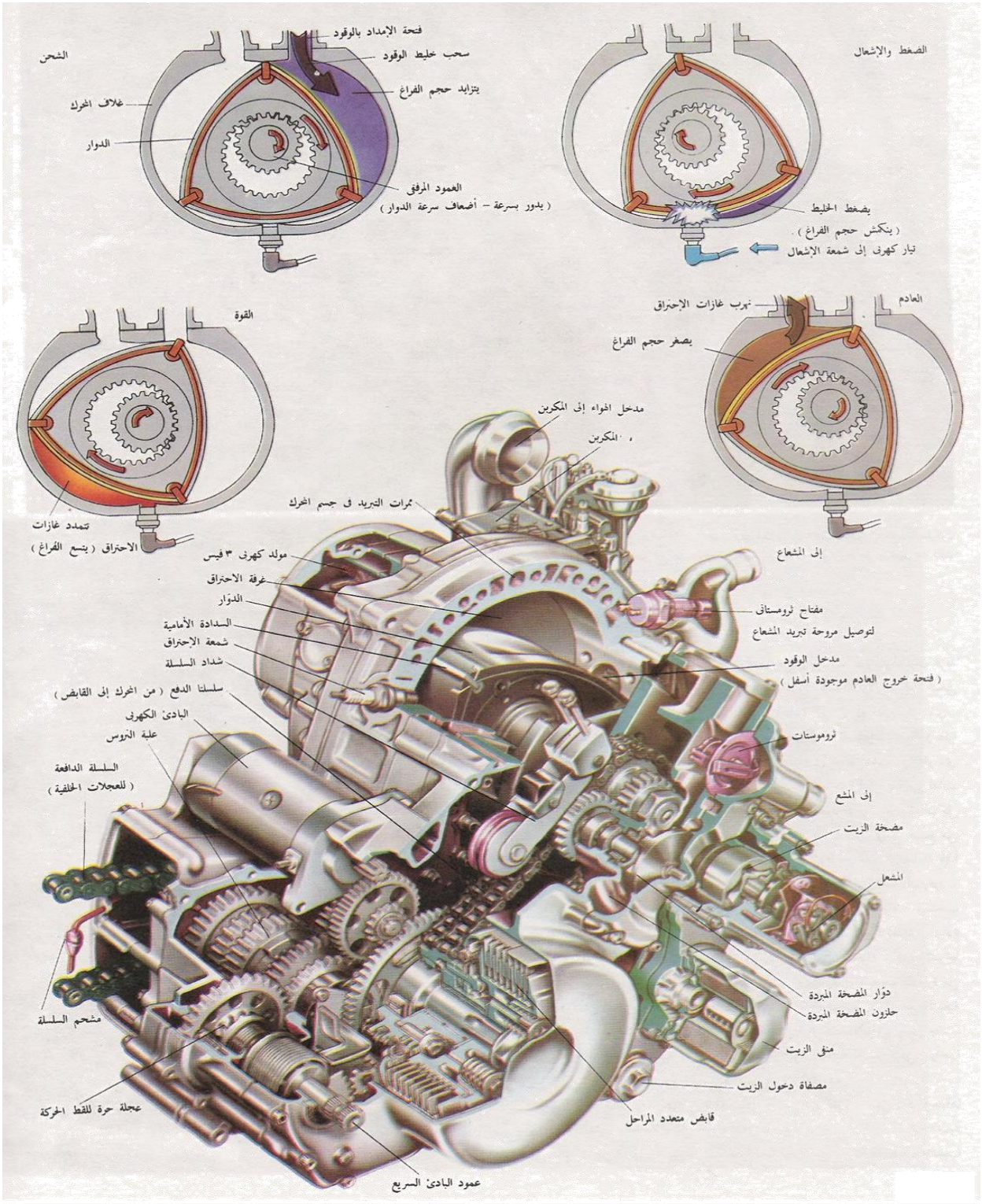

الشكل ( ٥ ) محرك ترددي رباعي الأشواط 4- Stroke Reciprocating Engine




الشكل ( ٦ ) محرك ترددي رباعي الأشواط 4- Stroke Reciprocating Engine

**٢- محرك المكبس الدوار ( محرك وانكل )  Rotary Pistons Engine (Wankel Engine)**

في محرك وانكل ، يكون المكبس Piston على شكل مثلث Triangular shape ، ويُنتج حركة دورانية Rotating motion بدلا من الحركة الترددية Reciprocal motion كما هو الحال في المحركات الترددية.
المزايا الرئيسية لمحرك وانكل هي وزنه المنخفض للغاية مقارنة مع طاقته الإنتاجية والمستوى المنخفض للضوضاء والإهتزاز . أما عيوبه الرئيسية فهي الإستهلاك العالي للوقود وإرتفاع مستوى التلوث Pollution مقارنة بالمحركات الترددية .
بصورة عامة ، من الصعب جدا (ولكن ليس من المستحيل) صناعة وإنتاج محرك دوار يستجيب للوائح وقوانين الإنبعاثات في الولايات المتحدة U.S. emissions regulations . يمكن أن تكون تكاليف التصنيع أعلى ، خاصة لأن عدد هذه المحركات المنتجة ليست عالية مثل عدد المحركات المكبسية ( الترددية ) . المحرك الدوار يستهلك عادة وقود أكثر من المحرك المكبسي لأن الكفاءة الديناميكية الحرارية Thermodynamic efficiency للمحرك يتم تقليلها من خلال الشكل الطويل لغرفة الاحتراق Combustion chamber ونسبة الإنضغاط Compression ratio الواطئة .




الشكل ( ٧ ) محرك وانكل Wankel Engine

### ٣- التوربينات الغازية Gas turbines

يمكن تصنيف التوربينات الغازية على النحو التالي :

أ - التوربين الغازي الذي ينتج طاقة ميكانيكية لإدارة ( تحريك ) حمل ما Load (قاعدة أرضية land base) .

ب - التوربين الغازي الذي ينتج قوة الدفع Thrust (propulsion) المستخدمة لتحريك الطائرات .

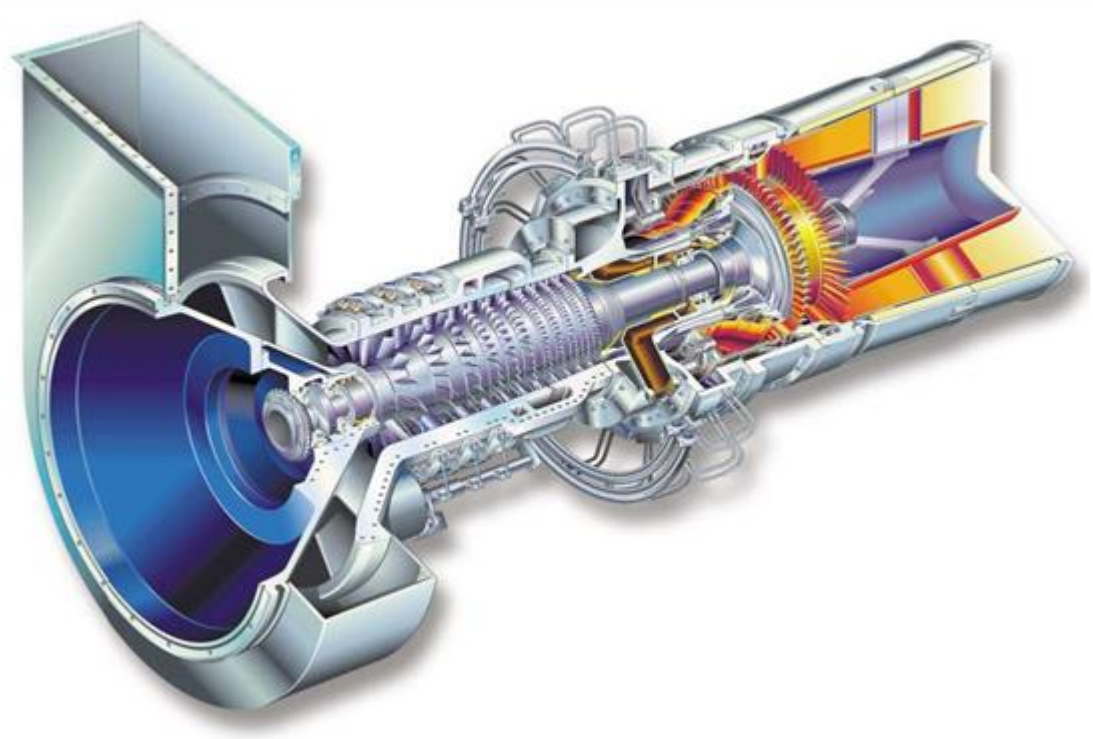
ج - دورة مفتوحة أو دورة مغلقة أو دورة مركبة Open cycle or closed cycle or combined cycle .

**تصنيفات التوربينات الغازية ذات القاعدة الأرضية**

**١- التوربينات الغازية ذات الدورة المفتوحة Open cycle gas turbines :**

أ - التوربين الغازي أحادي المحور Single shaft gas turbine

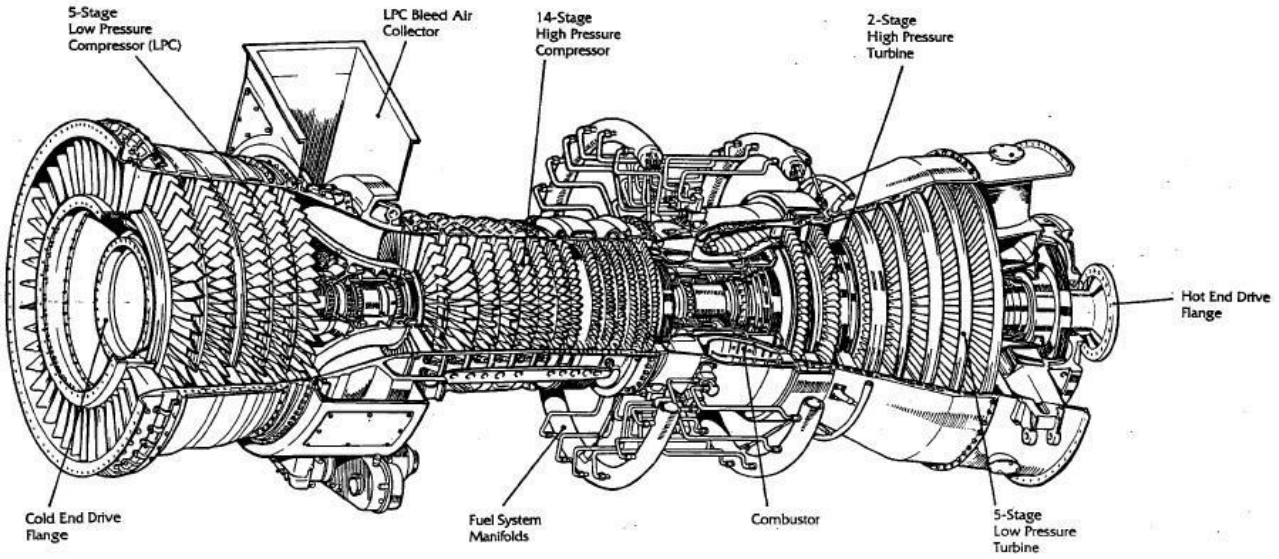
أنه أبسط تكوينات ( تشكيلات ) التوربينات الغازية ذات القاعدة الأرضية حيث يتم توصيل الضاغط والتوربين عن طريق نفس المحور و بالتالي يعملان بنفس السرعة الدورانية .



الشكل ( ٨ ) توربين غازي نوع GE ذات قاعدة أرضية

ب - التوربين الغازي مزدوج المحاور Twin spool gas turbine

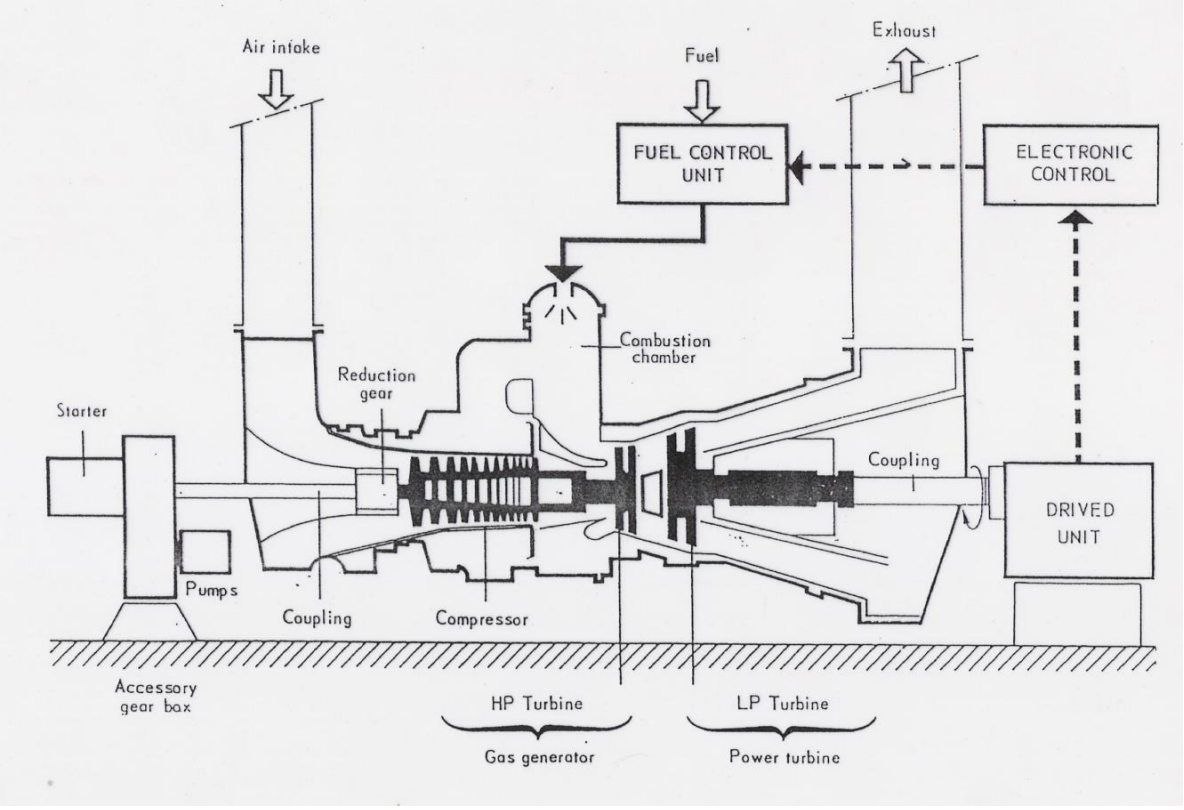
يعتبر هذا النوع من التكوينات الأكثر تعقيدا في التوربينات الغازية ، في هذا المحرك هناك أثنين من أعمدة الدوران ( المحاور ) متحدة المركز Concentric shafts ، الأول هو محور الضغط الواطىء والآخر هو محور الضغط العالي وكلا المحوران يدوران بسرعتين مختلفتين ، والمزايا الرئيسية لهذا التكوين هو أن عزم بدء التشغيل Start up torque المطلوب لتشغيل وإدارة الماكنة يتم تقليله إلى الحد الأدنى مقارنة بأحادي المحور مع نفس الحمل نظرا لأن فقط عمود الضغط العالي بحاجة إلى الدوران ، وكذلك يتم تقليل إضطراب أو عدم إستقرارية ضغط الضاغط Compressor surge إلى الحد الأدنى في هذا التكوين ، وكذلك يكون أقصر و أصغر وأخف وزنا من المحرك أحادي المحور وله عدد أقل من خطوط النزف Blow off lines ، العيب الرئيسي لهذا التكوين هو التعقيد الإضافي للتصميم والتكلفة الإضافية .




الشكل ( ٩ ) التوربين الغازي مزدوج المحاور

**٢- مولد الغاز وتوربين القدرة Gas generator & power turbine**

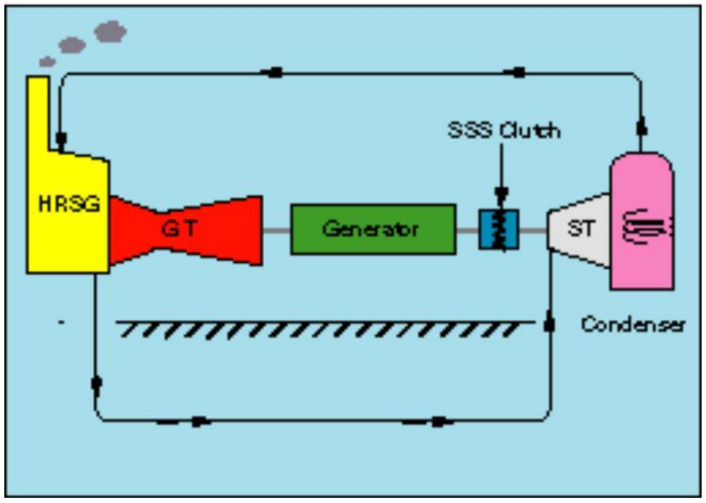
في هذا التكوين ، يتم إستخدام التوربين الغازي كمولد غاز ، حيث يوفر التوربين الغازي تيارا من الغازات الساخنة التي تدير توربين القدرة والذي بدوره يدير الحمل .

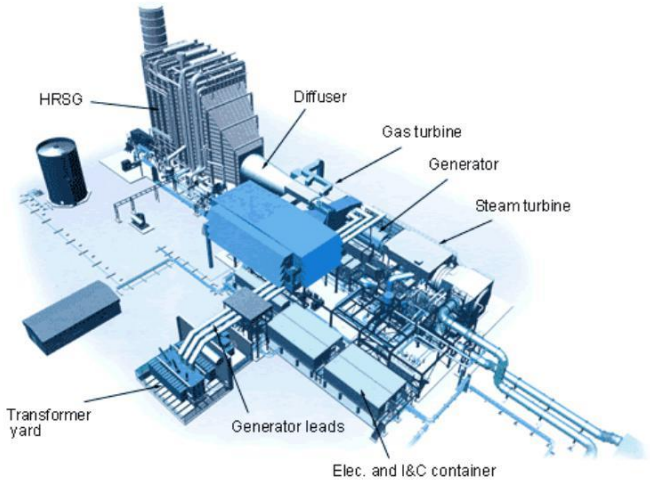



الشكل ( ١٠ ) تكوين مولد الغاز مع توربين القدرة

### ٣- التوربينات الغازية ذات الدورة المركبة Combined cycle gas turbines

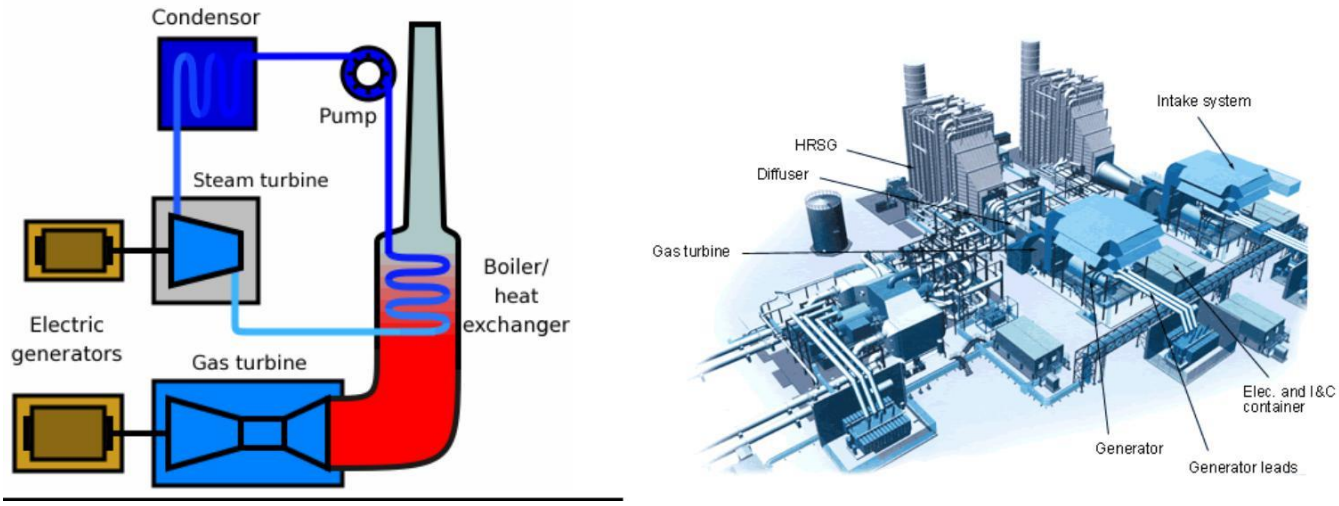
أ - دورة مركبة ( مدمجة ) أحادية المحور ( العمود ) (توجد التوربينات البخارية Steam turbines والغازية على نفس المحور عبر قابض التحويل الذاتي التزامني Synchro self shifting clutch ) .




الشكل ( ١١ ) دورة مركبة أحادية المحور

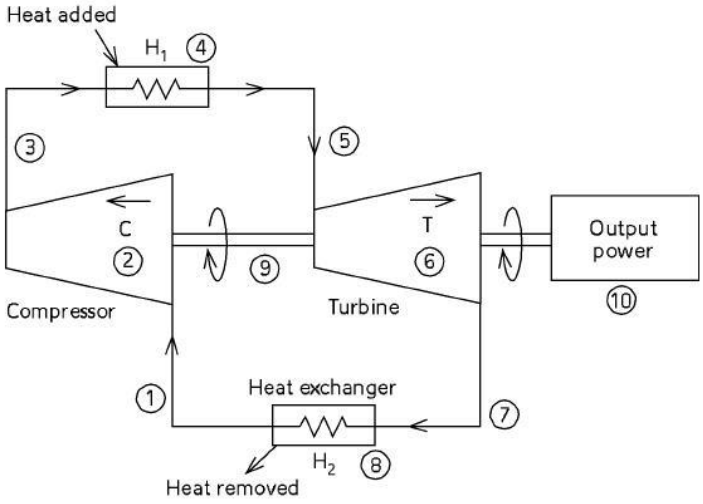
ب - دورة مركبة ثنائية المحور Two shaft combined cycle




الشكل ( ١٢ ) دورة مركبة ثنائية المحور

## ٤- التوربينات الغازية ذات الدورة المغلقة Closed cycle gas turbines

التوربينات الغازية ذات الدورة المغلقة ليست شائعة مثل الدورات المفتوحة ، في هذه المحركات ، مائع التشغيل Working fluid الخارج من التوربين يمر عبر عملية طرح حرارة Heat rejection process ثم إعادة تدوير الكسب ( الناتج ) Gain كمدخل للضاغط Compressor ، ومن أمثلة موائع التشغيل المستخدمة في هذه الدورات هي الهيدروجين Hydrogen والهليوم Helium .




الشكل ( ١٣ ) التوربينات الغازية ذات الدورة المغلقة

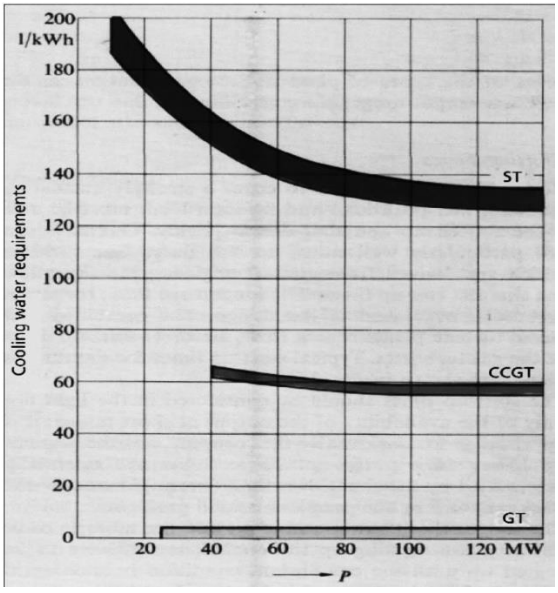
**الفرق بين محرك الاحتراق الداخلي والخارجي**

**Difference between Internal & external combustion engine**

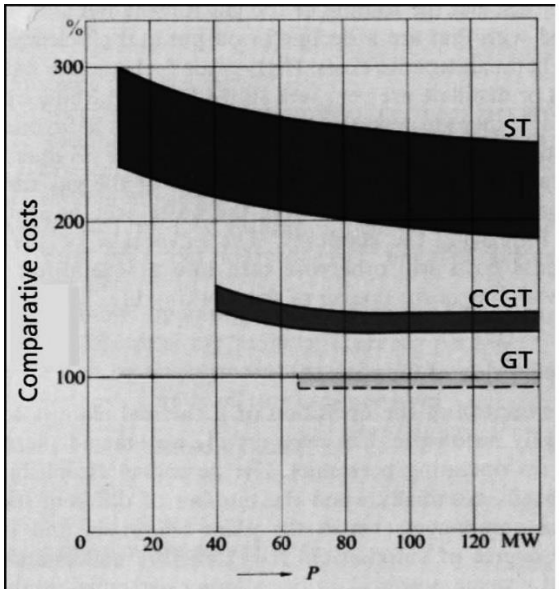
| ت | محرك الاحتراق الخارجي | محرك الاحتراق الداخلي |
|---|---|---|
| ١ | تتم عملية إضافة الحرارة Heat addition خارج المحرك . | تتم عملية إضافة الحرارة داخل المحرك . |
| ٢ | القدرة على حرق أي نوع من الوقود . | يتطلب حرق الوقود السائل أو الغازي Liquid or gaseous fuel . |
| ٣ | الاحتراق الكامل مضمون . | لا يمكن الإستفادة من كل طاقة الوقود . |
| ٤ | أقل تلوث Pollution بما أن الإحتراق الكامل . | مزيد من التلوث بسبب الإحتراق غير الكامل . |
| ٥ | في الغالب دورة مغلقة Closed cycle (أفضل لغرض الإصلاح والتحكم في خصائص مائع التشغيل) . | في الغالب دورة مفتوحة Open cycle . |
| ٦ | انخفاض معدل الحرارة Heat rate (أكثر كفاءة Efficiency ) . | معدل حرارة أعلى (أقل كفاءة) . |

**الفرق بين التوربينات الغازية والتوربينات البخارية**

**Difference between gas turbines & steam turbines**




الشكل (١٤) متطلبات المياه في مختلف محطات توليد الطاقة




الشكل (١٥) تكلفة نصب وتركيب محطات دورات التوربين الغازية والبخارية والمركبة Combined

| ت | التوربينات البخارية | التوربينات الغازية |
|---|---|---|
| ١ | محرك إحتراق خارجي . | محرك إحتراق داخلي . |
| ٢ | أكثر تعقيدا & ويتطلب المزيد من الأجهزة والمعدات المساعدة Auxiliaries . | بسيطة وتحتوي على ملحقات مساعدة أقل بكثير. |
| ٣ | بدء التشغيل Start up يستغرق وقتا طويلا . | بدء التشغيل يستغرق وقتا أقل بكثير . |
| ٤ | كفاءة أعلى (معدل حرارة أقل) . | كفاءة أدنى ( معدل حرارة أكثر ) . |
| ٥ | تكلفة التنصيب و التركيب مكلفة للغاية . | تكلفة التنصيب و التركيب رخيصة بالمقارنة . |
| ٦ | يتطلب مساحة كبيرة (المزيد من الأعمال المدنية Civil works ) . | يمكن بناءها في أي مكان ولا يتطلب مساحة كبيرة ( أعمال مدنية أقل ) . |
| ٧ | غير قابل للنقل Portable . | التوربينات الغازية المتنقلة متوفرة . |
| ٨ | تعتمد بقوة على المياه (لا يمكن بناءها بعيدا من مصدر مياه كبير) . | بعض التكوينات لا تستخدم الماء على الاطلاق |
| ٩ | حالة الطقس لها تأثير قليل على أداء الوحدة Unit Performance (الضغط الفراغي للمكثف Condenser vacuum pressure في فصل الشتاء) | تتأثر بشدة بحالة الطقس . |
| ١٠ | يتطلب وقت طويل للتنصيب والتركيب Installation . | وقت التنصيب والتركيب أقصر . |
| ١١ | مستوى ضوضاء Noise level أقل . | مستوى ضوضاء أعلى . |
| ١٢ | التوربينات البخارية ليست مرنة بقدر التوربينات الغازية (لا يمكن إضافة دورات إضافية) . | أكثر مرونة ولها تكوينات Configurations مختلفة . |
| ١٣ | حياة طويلة ( عمر تشغيلي طويل ) إذا تم تطبيق صيانات جيدة Good maintenance . | حياة أقصر . |
| ١٤ | سعة Capacity أكبر بكثير لكل وحدة تصل إلى ١٨٠٠ ميغاواط ( MW ) . | سعة أقل لكل وحدة تصل إلى ٣٤٠ ميغاواط في الدورة المفتوحة Open cycle . |
| ١٥ | إنخفاض تكلفة التشغيل Operating cost بسبب إنخفاض معدل الحرارة . | إرتفاع تكلفة التشغيل بسبب إرتفاع معدل الحرارة . |
| ١٦ | إنخفاض درجة حرارة التشغيل Operating temperature. | إرتفاع درجة حرارة التشغيل . |
| ١٧ | يمكن إستخدام أي نوع من الوقود Fuel . | تعتمد في الغالب على الغاز الطبيعي Natural gas أو الديزل Diesel . |
| ١٨ | تغيير الحمل Load بطيء بالمقارنة . | تغيير الحمل سريع جدا . |

**أمثلة لمحركات الإحتراق الخارجي Examples of external combustion engines**

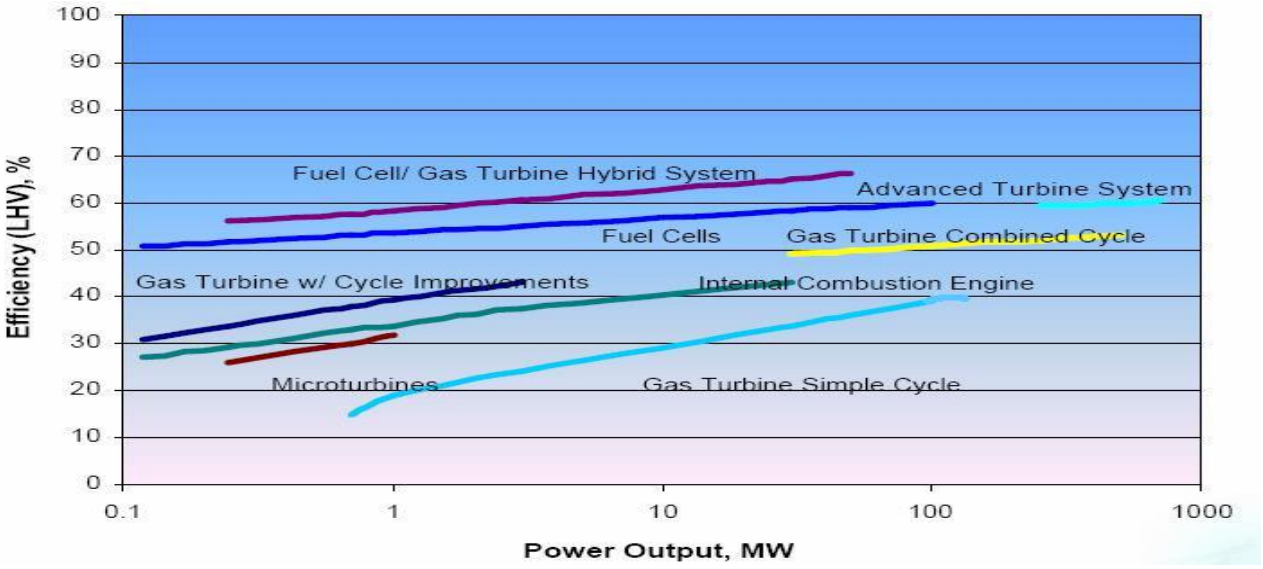
الأمثلة الأكثر شهرة لمحركات الإحتراق الخارجي هو :

١- التوربين البخاري steam turbine
٢- محرك ستيرلنغ Stirling engine

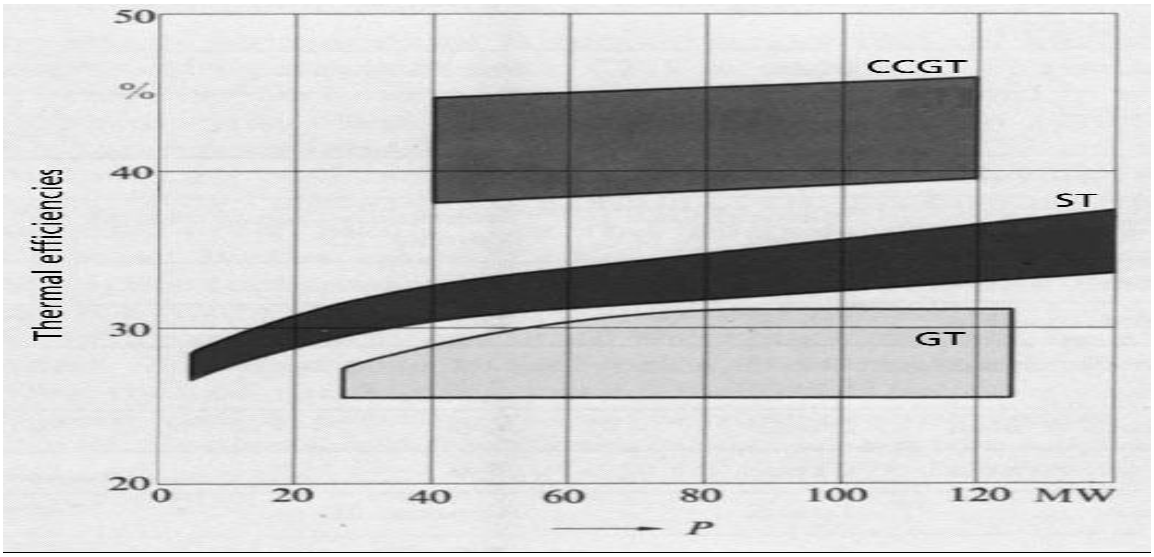
**الفرق بين التوربينات الغازية والمحركات الترددية**

**difference between gas turbines & reciprocating engines**

| ت | التوربينات الغازية | المحركات الترددية |
|---|---|---|
| ١ | أصغر بكثير في الحجم والوزن . | حجم و وزن أكبر . |
| ٢ | كفاءة واطئة في المدى المتوسط ولكن كفاءة أعلى لمدى من الطاقة > ١٠ ميكاواط . | كفاءة أعلى للمدى المتوسط فقط (١-١٠ ميكاواط) . |
| ٣ | وقت بدء التشغيل Startup أطول . | يتم إدخال المحرك في العمل بسرعة كبيرة جدا . |
| ٤ | تتأثر بشكل كبير بحالة الطقس . | لا تتأثر بحالة الطقس . |
| ٥ | غالية جدا . | رخيصة بالمقارنة . |
| ٦ | انخفاض طاقة الإهتزاز Vibration energy بسبب حركتها الدورانية المباشرة Rotary motion . | يتطلب أساس قوي ومعزز لمواجهة ومقاومة قوة عدم الاتزان الناتجة عن الحركة الترددية Reciprocating motion . |
| ٧ | أكثر سلاسة More smooth (انخفاض مستوى الإهتزاز والضوضاء Lower vibration level & noise ) | يُنتج عنها مستوى أعلى من الاهتزاز والضوضاء . |
| ٨ | مُفضل لتطبيقات السرعة العالية - عزم الدوران المنخفض High speed - Low torque Applications . | عملي لتطبيقات السرعة الواطئة - عزم الدوران المرتفع (لا يمكن إستخدامها في السرعة العالية) |
| ٩ | إستهلاك أعلى للوقود . | إستهلاك أقل للوقود . |
| ١٠ | مفيدة في التطبيق ( الإستعمال ) والتي تحتاج أوطأ نسبة طاقة الى حرارة . | مفيدة في التطبيق ( الإستعمال ) والتي تحتاج أعلى نسبة طاقة الى حرارة . |
| ١١ | ضغط الوقود المجهز أعلى . | ضغط الوقود المجهز أوطأ . |
| ١٢ | التوربينات الغازية التي تستخدم ( تحرق ) الوقود الثقيل Heavy fuels غير شائعة ( غير مألوفة ) . | القدرة على حرق الوقود الثقيل . |
| ١٣ | تستهلك المزيد من الوقود عندما تكون في وضع الدوران البطيء Idling (عمل ضاغط) . | إستهلاك الوقود يتناسب مع القدرة المنتجة Power output . |
| ١٤ | إستهلاك Consumption أفضل للوقود في الأحمال الثابتة بدلا من الأحمال المتذبذبة . | يمكن تشغيله بحمل متغير ولكن مع إستهلاك جيد للوقود . |
| ١٥ | يتطلب إنخفاض تكلفة الصيانة Maintenance cost . | يتطلب تكاليف صيانة أعلى (المزيد من الأجزاء المتحركة Moving parts) . |
| ١٦ | إنتاج طاقة أعلى بكثير (يصل إلى ٢٥٨ ميغاواط كقاعدة أرضية Land base) . | إنتاج طاقة محدود (حتى ١٥ ميغاواط) . |
| ١٧ | درجة حرارة عادم التوربين Turbine exhaustعالية بحيث يمكن أن تستخدم لإنتاج بخار بجودة عالية . | درجة حرارة عادم المحرك منخفضة نسبيا وبالتالي هناك حاجة لإحتراق وقود إضافي لإنتاج بخار بجودة عالية . |
| ١٨ | كل عملية Process تحدث في قسم ( مقطع ) section منفصل . | جميع العمليات الأربعة (الحث ، الإنضغاط ، التمدد أو القدرة ، العادم) (Induction ، Compression ، Power or Expansion ، Exhaust ) تحدث في قسم واحد (المكبس Piston) . |
| ١٩ | يستخدم المشعل Igniter مرة واحدة فقط خلال عملية التعجيل أو التسريع Speed up . | هناك حاجة إلى إستخدام المشعل في كل أوقات التشغيل . |




الشكل ( ١٦ ) مقارنة بين محركات الإحتراق الداخلي




الشكل ( ١٧ ) مقارنة بين كفاءة الدورات المختلفة

يستخدم التوربين الغازي كمحرك رئيسي Prime mover في محطات القدرة Powers stations ، الدفع البحري Marine propulsion ، الطائرات العمودية ( الهليكوبتر Helicopters) والدبابات Tanks .

تُستخدم التوربينات الغازية لتوليد الطاقة الكهربائية Electric power generation بعدة طرق مختلفة :

١- تستخدم خلال وقت حمل الذروة Peak load .
٢- توفير قدرة أو طاقة إحتياطية Stand-by power .
٣- توفير مصدر قدرة Power source لبدء التشغيل المظلم ( بدء التشغيل الذاتي Black start ) .
٤- العمل كوحدات توليد حمل أساس Base load (مؤخرا فقط بسبب التحسين في تصميمها والذي ينتج عنه كفاءة أعلى وأيضاعند إستخدامها في دورات مركبة Combined cycles ) .

التوربين الغازي لا يستخدم في السيارات بسبب :

١- أنها مكلفة للغاية .
٢- يستهلك التوربين الغازي كمية كبيرة من الوقود في حالة التباطؤ ( الدوران البطيء Idling ) بسبب عمل الضاغط الإضافي .
٣- التوربين الغازي غير مناسب لتطبيقات الأحمال المتغيرة ، فإذا كان التوربين الغازي يعمل بنسبة ٦٠٪ من حمله التصميمي ، فإنه يستهلك حوالي ٨٠٪ من الوقود المستخدم في حالة التحميل الكامل .
٤- وقت بدء تشغيل التوربين الغازي أطول من وقت بدء تشغيل المحركات الترددية .

التوربينات الغازية أكثر تكلفة من المحركات الترددية بسبب :

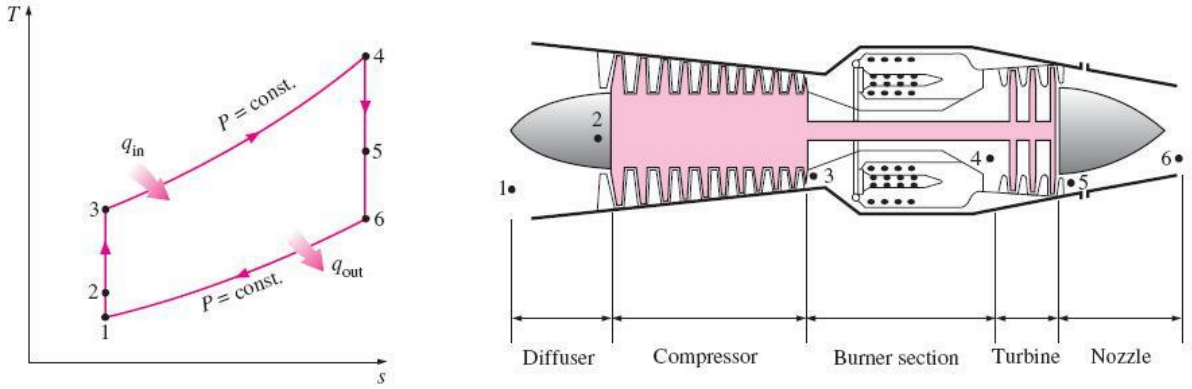
١- يتم تصنيع التوربين الغازي بعملية التشكيل Forming والتي تكون مكلفة أكثر من عملية التشغيل الميكانيكي Machining .
٢- تتعرض التوربينات الغازية لدرجة حرارة عالية جدا ، لذلك فهي مصنوعة من سبائك النيكل والكوبلت Nickel & Cobalt Alloy التي تكون باهظة الثمن وأغلى بكثير من الفولاذ ( الصلب Steel ) .

**سؤال :** لماذا لا يتم تصنيع المحركات الترددية من نفس المواد التي تُصنع منها التوربين الغازي على الرغم من تعرضها لنفس درجة الحرارة العالية جدا ( حرارة الإحتراق داخل أسطوانة المكبس Piston cylinder ) ؟

أ - لأن الطريقة التي يعمل بها المحرك الترددي توفر تبريدا أفضل ، عندما يدخل مزيج الهواء والوقود إلى المكابس الساخنة بعد شوط العادم exhaust stroke ، فإنها سوف تُبرّد المكبس لأن درجة حرارة المزيج أقل بكثير من كتلة المكبس والمحرك على الرغم من إنتهاء عملية الإحتراق وأنه تم كليا إستخدام كل الهواء المسحوب إلى داخل أسطوانة المكبس (حتى يتم تحقيق أعلى درجة حرارة للوقود) .

ب - كذلك تتعرض كتلة المكبس والمحرك للحرارة على فترات قصيرة (تسخين نبضي Pulse heating) بسبب أشواط المحرك الإستطرادية Excursive (الحث أو الدخول ، الإنضغاط ، القدرة ، العادم) . إضافة إلى ذلك ، يتم تبريد المحركات الترددية بالهواء والماء ويتم تزييتها بزيت ( بارد نسبيا ) مما يحسن عملية التبريد الإجمالية ويجعل متوسط درجة حرارة المحرك حوالي ٤٤٠ درجة مئوية (C° ) . بينما في التوربينات الغازية ، يتعرض التوربين إلى درجة حرارة عالية جدا طوال فترة التشغيل وتقنيات التبريد المستخدمة لتبريد ريش التوربين Turbine blades تعتمد على الهواء فقط لأن تصميم ريش تُبرد بالماء تكون باهظة الثمن ويجب أخذ التكلفة الإضافية بنظر الإعتبار ( معامل انتقال الحرارة بالحمل Convection heat transfer coefficient للسوائل أكبر بكثير منه للغازات ) .

## التوربينات الغازية المستخدمة للطيران Aircraft gas turbine

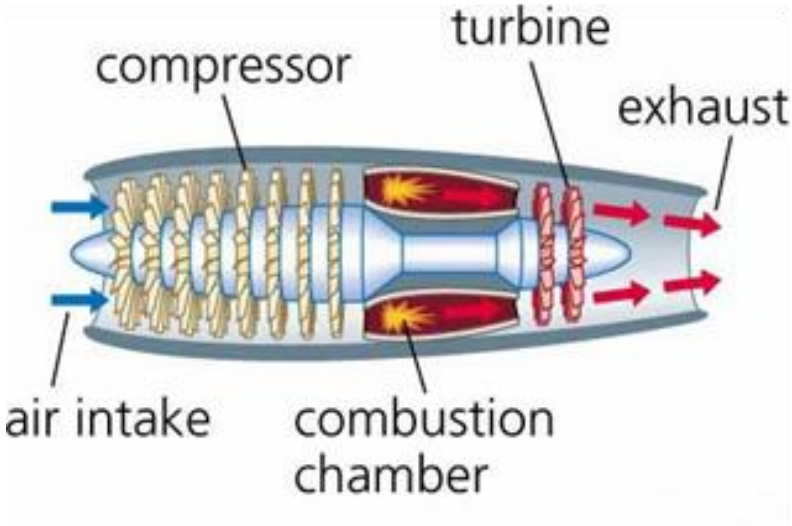



الشكل ( ١٨ ) محرك توربيني نفاث Turbojet Engine

معظم التوربينات الغازية الشائعة التي تستخدم في الطائرات الهوائية التوربينية النفاثة هي :

١- محرك توربيني نفاث ( توربوجيت Turbojet Engine ) :

الفكرة الأصلية للتوربوجيت ، هو أنه أبسط أشكال التوربين الغازي ويعتمد على عادم الغاز الساخن عالي السرعة لتوفير قوة الدفع Thrust . مساوئها اليوم هي مستويات الضوضاء العالية نسبيا واستهلاك الوقود .




الشكل ( ١٩ ) محرك توربيني نفاث Turbojet Engine

٢- المحرك التوربيني المروحي ( توربوفان Turbofan Engine ) :

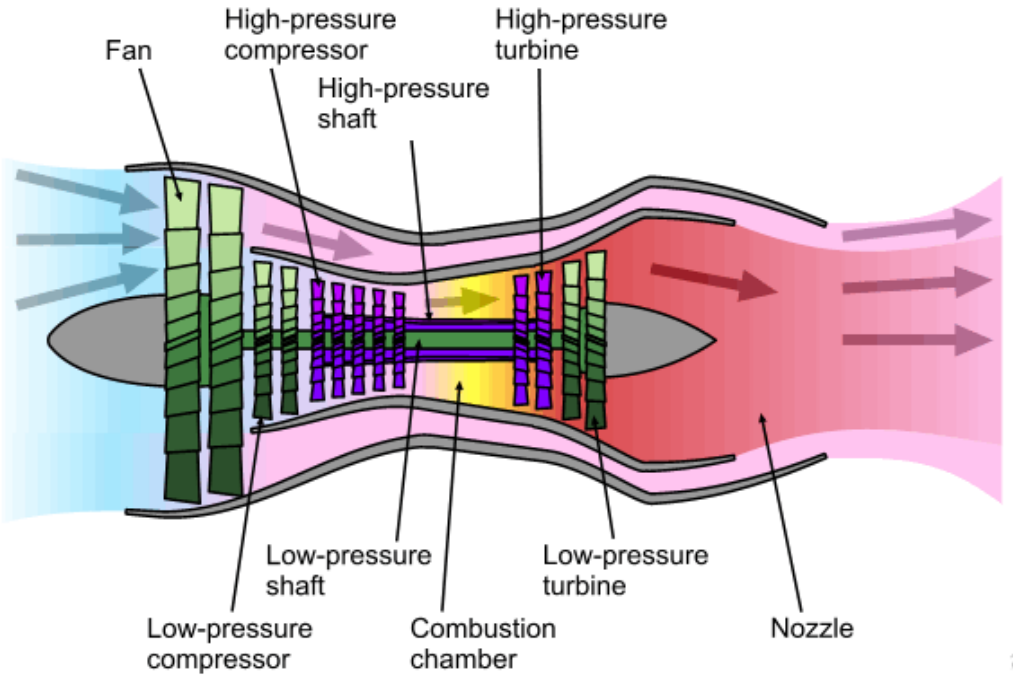
المحرك التوربيني المروحي أو المحرك المروحي النفاث يعتمد على مبدأ أنه بالنسبة لنفس القدرة ، فأن حجم أكبر من الهواء بطيء الحركة سينتج قوة دفع أكبر من ما ينتجه حجم صغير من الهواء سريع الحركة (المروحة تسهم في تعزيز دفع الطائرة دون حرق مزيد من الوقود مما يقلل الإستهلاك النوعي للوقود ) . محرك تربوفان هو الأكثر إستخداما في دفع أو تسيير الطائرات .

هناك نوعان رئيسيان من محركات التوربوفان :

النوع الأول : محركات توربوفان منخفضة الإلتفافية Low - bypass turbofan Engines .

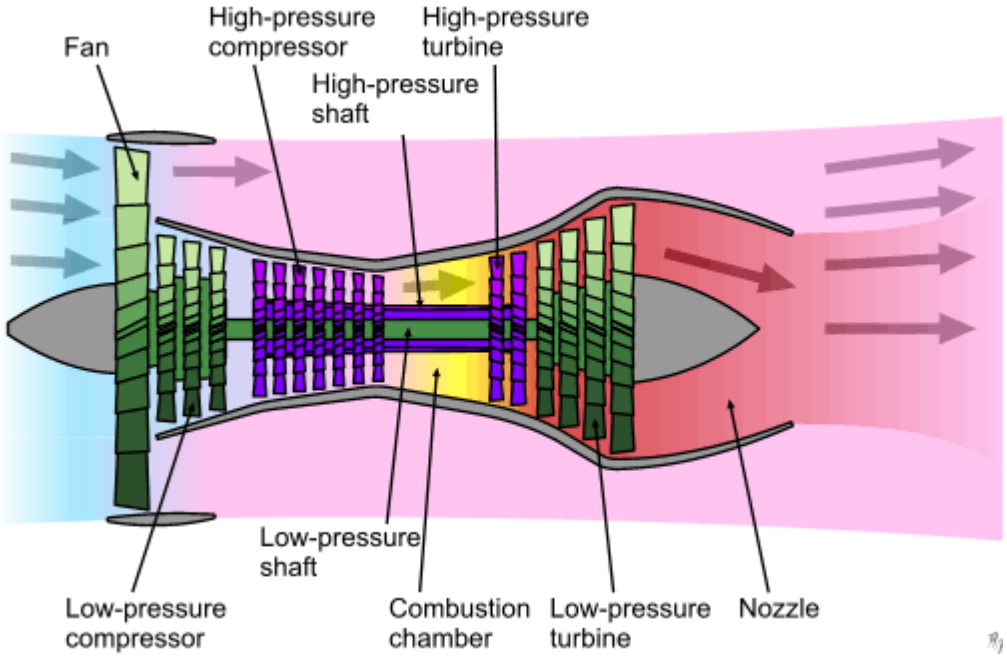
أ - في المحرك التوربيني المروحي الإلتفافي Bypass ، ينقسم تدفق الهواء المضغوط جزئيا ، بعضه إلى الجزء المركزي ( مولد الغاز أو قلب المحرك Gas generator or core ) ، وبعضه إلى الغلاف المحيط Surrounding casing ( الممر الجانبي Bypass duct ) .

ب - يعمل مولد الغاز كنفاث توربيني Turbojet بينما تتسارع الكتلة الأكبر من الهواء الجانبي Bypass air نسبيا ببطء أسفل الممر لتوفير قوة الدفع البارد Cold stream thrust . تُمزج قوتا الدفع البارد والحار لإعطاء كفاءة دفع Propulsive efficiency أفضل ، مستويات ضوضاء أقل ، وتحسين إستهلاك الوقود .




الشكل ( ٢٠ ) محرك توربوفان منخفض الإلتفافية

النوع الثاني : محركات توربوفان عالية الإلتفافية High-bypass turbofan engines



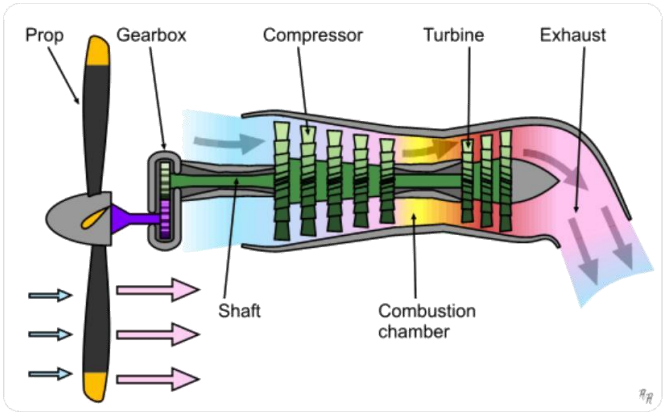

الشكل ( ٢١ ) محرك توربوفان عالي الإلتفافية

أ - في توربوفان عالي الإلتفافية ، بقدر سبعة أو ثمانية أضعاف كمية الهواء تتجنب المرور خلال اللب Core أو المركز . ويحقق حوالي ٧٥ ٪ من قوة دفعها من الهواء الجانبي أو الإلتفافي ، وهو مثالي لطائرات النقل دون سرعة الصوت Subsonic transport aircraft .

ب - إن توربوفان منخفض الإلتفافية ، حيث ينقسم الهواء تقريبا بالتساوي بين مولد الغاز والممر الجانبي ، تتناسب بشكل جيد مع الإستخدام العسكري عالي السرعة High-speed .

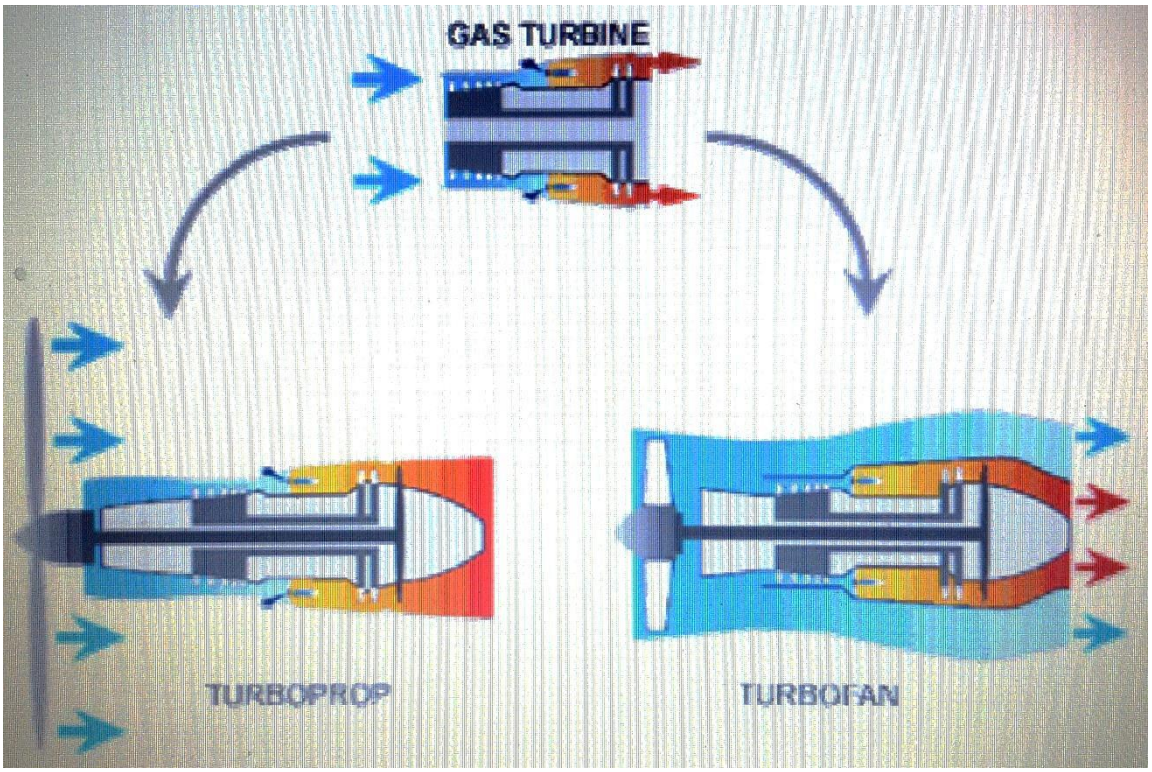
٣- المحرك المروحي التوربيني (المحرك النفاث ذو المروحة ) التوربوبروب Turboprop Engine :

كما يُفهم من أسمه ، يستخدم التوربوبروب المروحة Propeller لنقل القدرة التي تنتجها . يتم إدارة المروحة من خلال جهاز أو مسنن تقليل السرعة Reduction gear بعمود من توربين القدرة Power turbine ، بإستخدام طاقة الغاز التي من شأنها أن توفر قوة الدفع في النفاث التوربيني Turbojet . تستخدم المحركات المروحية التوربينية بشكل عام في الطائرات الصغيرة أو البطيئة ودون سرعة الصوت .



الشكل ( ٢٢ ) المحرك المروحي التوربيني (المحرك النفاث ذو المروحة ) Turboprop Engine

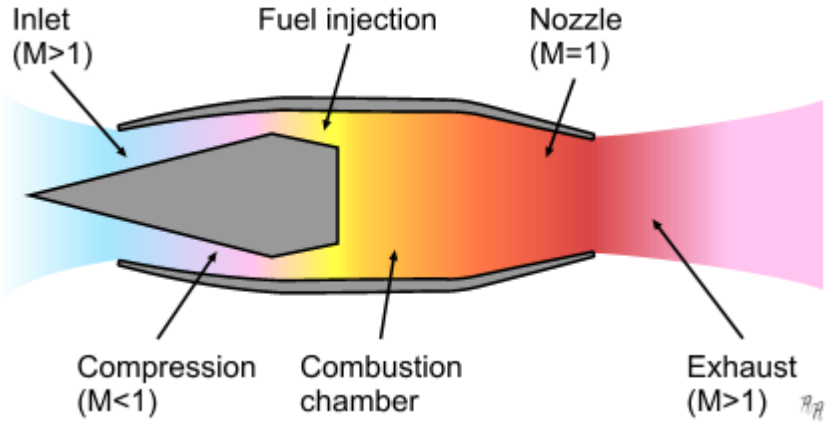
المحرك المروحي التوربيني و المحرك التوربيني النفاث : نفس المفهوم




الشكل ( ٢٣ ) مقارنة بين محركات التوربوبروب والتوربوفان

٤- محرك نفاث تضاغطي Ramjet Engine

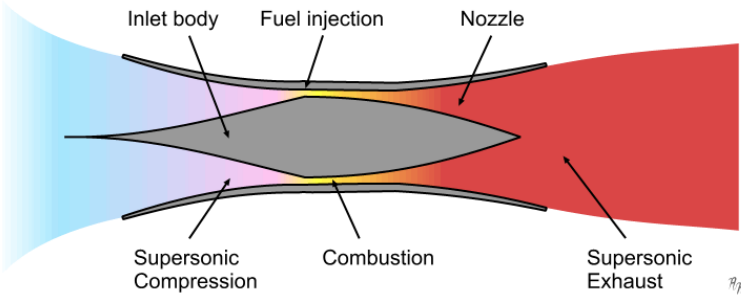
هو نوع من المحركات النفاثة Jet engine . لا يحتوي على أجزاء متحركة (رئيسية) ويمكن أن يكون مفيدا بشكل خاص في التطبيقات التي تتطلب محركا صغيرا وبسيطا للإستخدام عالي السرعة ؛ مثل الصواريخ . في هذا المحرك ، وبسبب سرعة الطيران العالية ، فإن ضغط كباس Ram الهواء يكون كافيا لتوفير الهواء المضغوط Compressed air اللازم للدفع .




الشكل ( ٢٤ ) محرك نفاث تضاغطي Ramjet Engine

٥- محرك نفاث فرطي Scramjet Engine :

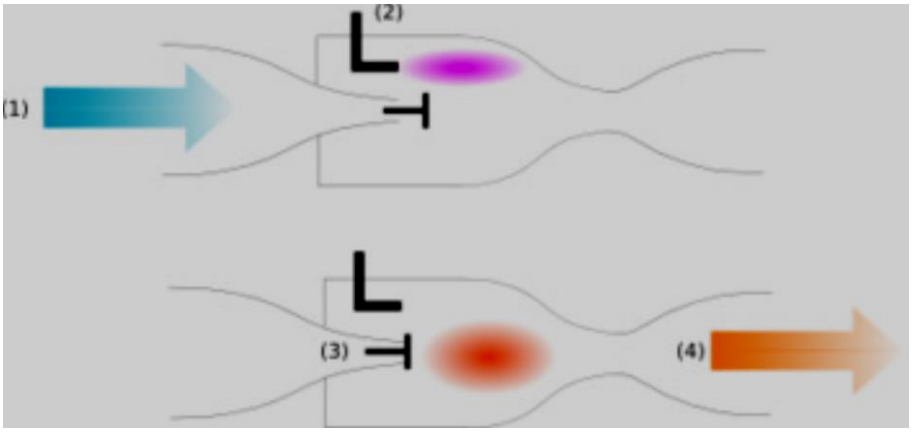
المحرك النفاث الفرطي محرك نفاث تضاغطي ذو إحتراق فوق صوتي Supersonic Combustion Ramjet ، يختلف عن المحرك النفاث التضاغطي حيث يحدث تدفق الهواء وحرق مزيج الهواء و الوقود خلال المحرك بسرعة تفوق سرعة الصوت Supersonic speed . هذا يسمح للمحرك بتحقيق سرعات أكبر من السرقة التقليدية لمحرك النفاث التضاغطي التي تبطئ الهواء القادم إلى سرعة دون سرعة الصوت قبل دخول غرفة الاحتراق . تعمل هذه المحركات في سرعات تبدأ من رقم ماخ ( ماخ = ٥ ) Mach number (M= 5) ، و ما يُعرف بمدى السرعات فرط الصوتية Hypersonic speed . (١ ماخ = سرعة الصوت ، أي ما يعادل ١١٧٠,٤ كم \ ساعة عند مستوى سطح البحر) .



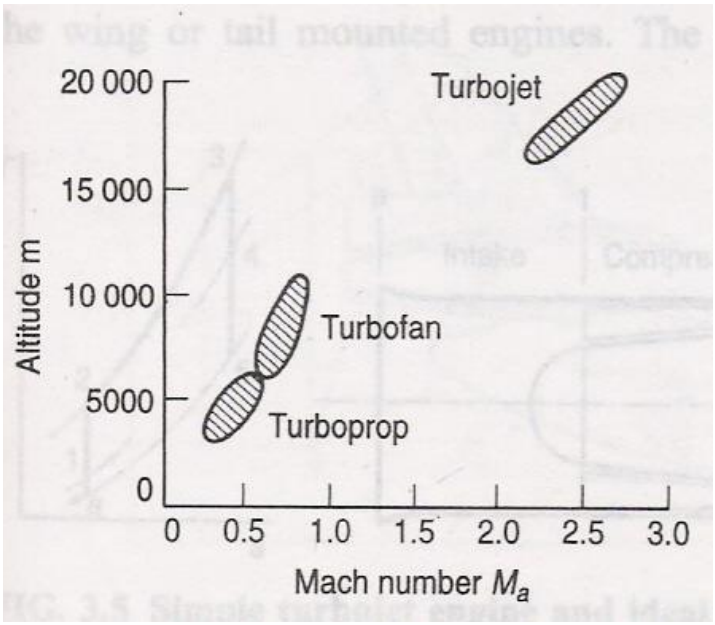

الشكل ( ٢٥ ) محرك نفاث فرطي Scramjet Engine

٦- محرك نفاث نبضي Pulse jet engine :

المحرك النفاث النبضي يعتبر أقدم أنواع المحركات النفاثة وأبسطها فهو عبارة عن محرك إحتراق داخلي بسيط يحدث فيه الإحتراق على شكل نبضات Pulses والجهد الدفعي هو المنفث أو النفاث Jet .
تشتمل المحركات النموذجية على مدخل هواء Air intake مزود بصمام أحادي الإتجاه One-way valve ، وغرفة إحتراق Combustion chamber ، وأنبوب عادم Exhaust pipe . هذا المحرك لا يصلح لطائرات الركاب ، فهو ينطلق كالصاروخ .
و تتلخص فكرته في أن الهواء يدخل من فتحة أمامية ذات صمام أحادي الإتجاه ، ثم يختلط بالوقود وينفجر عن طريق المشعل ، فيغلق صمام المقدمة وتتولد طاقة دفع من الإنفجار . بعد اندفاع الغاز المحروق المتمدد إلى الخلف ، ينفتح صمام المقدمة فيدخل هواء جديد ، وتتكرر العملية .




الشكل ( ٢٦ ) مخطط محرك نفاث نبضي ، الجزء الأول من الدورة : كمية الهواء (١) ، مختلطة بالوقود (٢) . الجزء الثاني : يتم إغلاق الصمام (٣) ويؤدي مزيج الوقود والهواء المشتعل (٤) إلى دفع الطائرة .




الشكل ( ٢٧ ) عدد أو رقم ماخ Mach number لمختلف محركات الطائرات

**تأثير الظروف الجوية على أداء التوربينات الغازية**

معادلة الغاز المثالي للحالة : $P = \rho * R * T$

P = ضغط الغاز بوحدة (كيلوباسكال) (KPa) ، T = درجة حرارة الغاز بوحدة (K كلفن Kelvin) (K = 273 + °C ) ؛ R = ثابت الغاز Gas constant بوحدة (كيلو جول \ كغم كلفن) (KJ / Kg K) ؛

ρ = كثافة الغاز Gas density بوحدة ( كغم \ م ٣ ) ($Kg/m^3$) .

التوربين الغازي هو دورة مفتوحة ، ويستخدم الهواء المحيط Ambient air كمائع تشغيل Working fluid ، ولكنه يتأثر بشدة بالظروف المحيطة والتي هي :

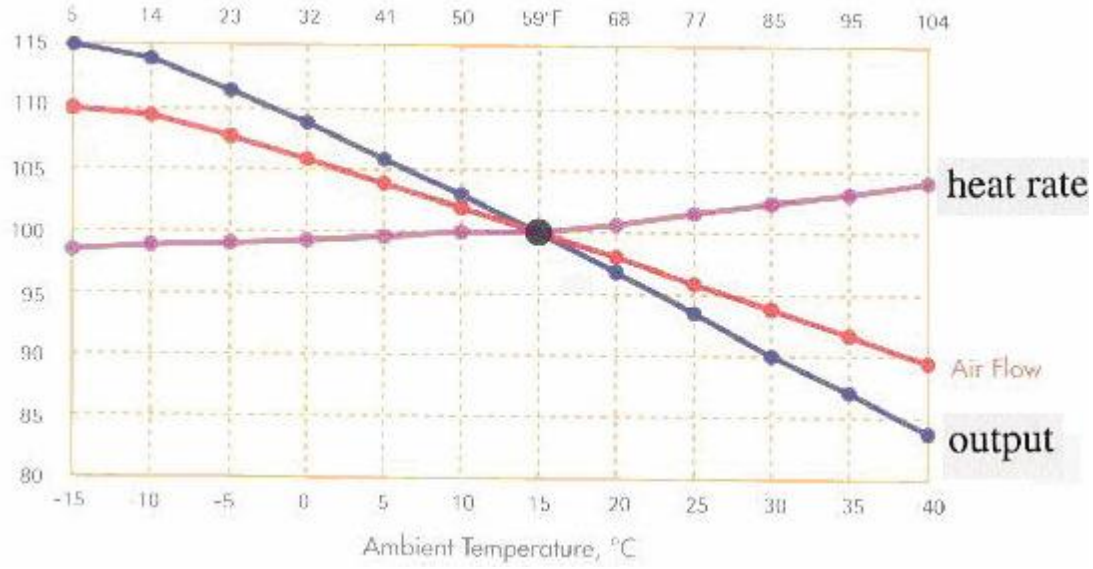
١- درجة الحرارة المحيطة Ambinet temperature :

درجة الحرارة المحيطة تمثل درجة حرارة مدخل الضاغط Compressor inlet في التوربين الغازي ، إذا انخفضت درجة الحرارة ، فإن كثافة الهواء سوف تزداد ، وبالتالي سوف يتم ضغط هواء ثقيل بواسطة الضاغط الذي سيزيد من معدل التدفق الكتلي Mass flow rate ، علما أن متطلبات الشغل للضاغط ستزداد أيضا .

عندما يدخل الهواء الكثيف المضغوط إلى قسم التوربين ، فإنه سيُحدث تمددا Expansion إضافيا والمزيد من الشغل المُنتج من التوربين .

إذن بصورة عامة يمكن القول :

عندما تنخفض درجة حرارة مدخل الضاغط ، تزداد كثافة الهواء ، ستزداد القدرة المنتجة من التوربين ولكن سيزداد شغل الضاغط ، كما سيزداد التدفق الكتلي للوقود إلى التوربين ليعالج الزيادة في التدفق الكتلي للهواء وشغل التوربين الإضافي .




الشكل ( ٢٨ ) تأثير درجة الحرارة المحيطة على أداء التوربين الغازي Gas turbine performance

٢- الضغط المحيط Ambient pressure :

مع زيادة الضغط المحيط ، ستزداد كثافة الهواء وستحدث نفس النتيجة في النقطة السابقة أعلاه .

٣ - الرطوبة النسبية Relative humidity :

معظم الناس الذين لم يدرسوا الفيزياء أو الكيمياء يجدون صعوبة في تصديق أن الهواء الرطب Humid air أخف أو أقل كثافة من الهواء الجاف Dry air ، كيف يمكن أن يصبح الهواء أخف إذا أضفنا بخار الماء Water vapor إليه ؟

لمعرفة لماذا يكون الهواء الرطب أقل كثافة من الهواء الجاف ، نحتاج إلى التحول إلى واحدة من قوانين الطبيعة التي اكتشفها الفيزيائي الإيطالي أمادو أفوغادرو Amadeo Avogadro في أوائل القرن التاسع عشر . حيث وجد أن حجما ثابتا من الغاز ، على سبيل المثال متر مكعب واحد ، عند نفس درجة الحرارة والضغط ، سيكون له دائما نفس عدد الجزيئات Molecules بغض النظر عن الغاز الموجود في الحاوية Container .
تخيل متر مكعب من الهواء الجاف تماما . يحتوي على حوالي ٧٨٪ من جزيئات النيتروجين Nitrogen ، التي تحتوي كل منها على وزن جزيئي Molecular weight يبلغ ٢٨ (ذرتان بوزن ذري Atomic weight يبلغ ١٤) . ٢١٪ أخرى من الهواء هي جزيئات الأوكسجين ، التي تحتوي كل منها على وزن جزيئي يبلغ ٣٢ (ذرتان ذات وزن ذري ١٦) . والنسبة المئوية الأخيرة هي خليط من الغازات الأخرى ، التي لا داعي للقلق بشأنها .
الجزيئات حرة في التحرك داخل أو خارج المتر المكعب من الهواء الموجود لدينا . إن ما اكتشفه أفوغادرو يقودنا إلى الاستنتاج بأنه إذا أضفنا جزيئات بخار الماء إلى هذا المتر المكعب من الهواء ، فإن بعضا من جزيئات النيتروجين والأوكسجين ستتركها . تذكر أن العدد الإجمالي للجزيئات في المتر المكعب من الهواء يبقى كما هو .
جزيئات الماء ، التي تحل محل النيتروجين أو الأوكسجين ، لها وزن جزيئي قدره ١٨ (ذرة أوكسجين واحدة ذات وزن ذري ١٦ ، واثنتان من ذرات الهيدروجين Hydrogen ذات وزن ذري ١) . هذا الوزن أخف من وزن كل من النيتروجين والأوكسجين . وبعبارة أخرى ، فإن إستبدال النيتروجين والأوكسجين ببخار الماء يقلل من وزن الهواء في المتر المكعب . أي تقل الكثافة .
قد نقول أن الماء أثقل أو أكثف من الهواء ، وهذا صحيح أن الماء السائل أثقل أو أكثر كثافة من الهواء ، لكن الماء الذي يجعل الهواء رطبا ليس سائلا بل إنه بخار الماء ، وهو غاز أخف من النيتروجين أو الأوكسجين .

٤ - كثافة الهواء Air density :

بزيادة كثافة الهواء ، سوف يزداد التدفق الكتلي للهواء عن طريق الضاغط وستحدث نفس النتيجة في الفقرة الأولى . إن كثافة الهواء تعتمد على درجة حرارته وضغطه وكمية بخار الماء في الهواء .

**تأثير كثافة الهواء على سيارة السباق Racing car :**

الهواء الأكثر كثافة أو الثقيل سوف يبطئ الأجسام التي تتحرك من خلاله أكثر لأن الجسم يجب أن يتحرك ، في الواقع ، إلى جانب جزيئات أكثر أو أثقل . مقاومة الهواء هذه تسمى السحب Drag ، والتي تزداد بكثافة الهواء.
الهواء البارد والكثيف يبطئ سيارة السباق بسبب زيادة قوة السحب ، لكن بعض سيارات السباق تربح من الهواء الكثيف . إن السيارات المصممة من العجلات الخاصة بالسباقات تشبه أجنحة الطائرة Airplane wings التي يدفعها الهواء إلى الأسفل على المسار ، مما يزيد من ثباتها حول المنحنيات . يدفعها الهواء الأكثر كثافة للأسفل بقوة .

**تأثير كثافة الهواء على محركات الطائرات Aircraft engines :**

إن محرك الطائرة تتأثر بإنخفاض كثافة الهواء بثلاث طرق : (١) تقل قوة الرفع Lifting force على أجنحة الطائرة أو المحور الدوار للمروحية ( الطائرة العمودية ) Helicopter ، ( ٢ ) تقل القدرة الناتجة من المحرك ، ( ٣ ) تقل قوة الدفع للمروحة Propeller أو المحور الدوار Rotor أو المحرك النفاث Jet engine . هذه الخسائر في الأداء Performance أكثر من أن يتم تعويض إنحفاض السحب على الطائرة في الهواء الأقل كثافة .
يستخدم الطيارون الرسوم البيانية أو الآلات الحاسبة لمعرفة كيف ستؤثر درجة حرارة وضغط الهواء في وقت ومكان معينين على كثافة الهواء وبالتالي على أداء الطائرة . بشكل عام ، لا تأخذ هذه الحسابات الرطوبة بعين الإعتبار لأن تأثيراتها أقل بكثير من غيرها .
عندما تكون كثافة الهواء منخفضة ، تحتاج الطائرات إلى مدارج Runways أطول للإقلاع والهبوط Take off and land ولا ترتفع بسرعة عندما تكون كثافة الهواء عالية .

٥- الإرتفاع Elevation :
كل زيادة ( ١٠٠ متر ) في الإرتفاع العمودي Altitude ، (١ ٪ ) من قدرة التوربين الغازي سوف تنخفض بسبب زيادة الإرتفاع و إنخفاض كثافة الهواء .

**الفرق الرئيسي بين التوربينات الغازية المستخدمة لإنتاج الطاقة الكهربائية (الأرضية ) والتوربينات الغازية المستخدمة في الطائرات**

**Main deference between land base gas turbines & gas turbine used in aircrafts**

| ت | توربين غازي لإنتاج الطاقة الكهربائية GT for power generation | توربين غازي للطيران GT for Aircraft |
|---|---|---|
| ١ | يمكن أن يكون لها أي شكل . | يجب أن يكون ذو شكل ديناميكي هوائي ( أيروديناميكي Aerodynamic ) أو أنسيابي لتقليل الإعاقة أو السحب . |
| ٢ | يتطلب تنقية الهواء Air filtration . | لا توجد فلترة للهواء (لتجنب إنسداد ما) |
| ٣ | مرنة Flexible لأي نوع . | يمكن إستخدام غرفة إحتراق Combustion chamber نوع العلبة Can فقط . |
| ٤ | يتم تثبيت الغلاف والإطار Casing & frame على الأرض . | يجب أن تُصمم لتحمل مستوى إهتزاز عالي High vibration level |
| ٥ | الوزن والحجم Weight & size ليس مهما . | الوزن والحجم مهم جدا في التصميم Design . |
| ٦ | يمكن أن يُحرق الغاز الطبيعي أو زيت الوقود Natural gas or fuel oil . | لا يمكن حرق أي وقود (وقود سائل Liquid fuel فقط) . |
| ٧ | التوربين مصمم للتعامل مع شغل الضاغط والقدرة الميكانيكية الإضافية للحمل (عمود القدرة Shaft power ، القدرة الكهربائية Electric power) | تم تصميم التوربينات للتعامل مع المروحة Fan و شغل الضاغط فقط عندما يتم تعجيل أو تسريع جزء من الطاقة في فوهة ( منفث Nozzle ) لتوفير قوة الدفع Thrust . |
| ٨ | الهدف هو إنتاج القدرة الميكانيكية Mechanical power . | الهدف هو إنتاج قوة الدفع . |
| ٩ | حجم التوربين والضاغط أكبر . | حجم التوربين والضاغط أصغر بكثير . |
| ١٠ | يمكن إضافة أي تعديل للدورة Cycle modification . | لا يمكن إضافة تعديل للدورة (الوزن) . |

**ملاحظة توضيحية :** Mach number عدد أو رقم ماخ يمثل النسبة بين السرعة المحلية لمائع ما وسرعة الصوت في نفس ذلك المائع ، فنقول أن الطائرة تحلق بسرعة (ماخ-١ ) إذا كانت سرعتها مساوية لسرعة الصوت ، وأنها تحلق بسرعة (ماخ-٢) إذا كانت سرعتها ضعف سرعة الصوت ، وهكذا . سمي هذا الرقم نسبة إلى الفيزيائي والفيلسوف النمساوي إرنست ماخ Ernst Mach .

الشكل ( ٢٩ ) التوربين الغازي رولز رويس Rolls Royce المستخدم في الطائرة النفاثة Jet aircraft

**تأريخ التوربينات الغازية ومراحل تطورها**

جرت أولى محاولات تطوير التوربينات الغازية في أوائل القرن العشرين ، مع القيام بأعمال رائدة في ألمانيا . أكثر التوربينات الغازية الناجحة هي Holzwarth الذي سمي على أسم مطورها هانز هولزوارث Hans Holzwarth الذي طور سلسلة من النماذج بين عامي ١٩٠٨ و ١٩٣٣. أولى التطبيقات الصناعية Industrial application للتوربين الغازي تم تنصيبها في منشأة لإنتاج الصلب ( الفولاذ ) Steel works في مدينة هامبورن ، ألمانيا Hamborn , Germany ، في عام ١٩٣٣.

أ - أول تصميم ناجح للتوربين الغازي gas turbine قام به الكثير من الرواد في نفس الوقت ، أحد هؤلاء هو السير فرانك ويتل (انكلترا Sir Frank Whittle ( England الذي وصف بالرسم أول توربين غازي في عام ١٩٣٠ ولكن في نفس العام سجلت براءات إختراع مماثلة في ألمانيا وإيطاليا . في نيسان عام ١٩٣٧ ، طوّر ويتل محرك توربين غازي يعمل والذي أستعمل لدفع أول طائرة توربينية نفاثة ناجحة في بريطانيا ، أستند عمله في وقت مبكر على نظرية دفع الغاز على مساهمات معظم الرواد الأوائل في هذا المجال .

ب - بعد الحرب العالمية الثانية ، أصبح المحرك النفاث Jet engine هو الأسلوب الأكثر شيوعا لتوليد طاقة الطائرات ، وبالتالي تم تطويرالتوربينات الغازية بسرعة لتوليد القدرة الكهربائية Electric power .

ج - إن السبب في ظهور التوربين الغازي في وقت متأخر قياسا للأنواع الأخرى من محركات الاحتراق الداخلي Internal combustion engines هو صعوبة إيجاد أو العثور على مواد الأجزاء المتحركة Working parts materials ، وخاصة ريش التوربين Turbine blades ، ، كما يجب أن تتحمل درجات حرارة عالية للغاية ناتجة عن حرق الغاز دون إنصهار Melting أو ضعف Weakening .

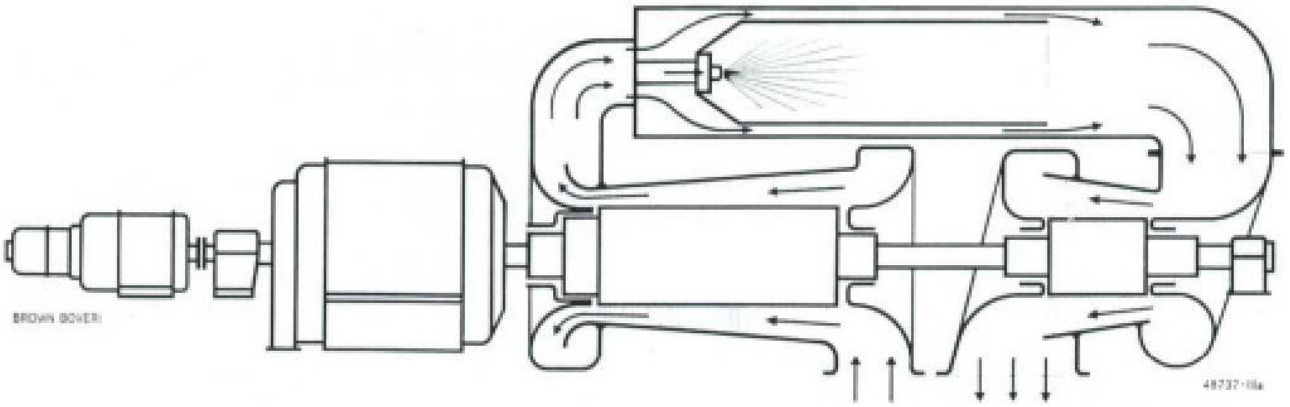
الشكل ( ٣٠ ) السير فرانك ويتل Sir Frank Whittle

فيما يلي ملخص لتأريخ التوربينات الغازية :

١٩٣٥ : جيندراسيك ، هنغاريا : أول محرك توربيني غازي تجديدي Regenerative gas turbine engine.

١٩٣٦ : شركة أليس تشالمرز للتصنيع الأمريكية Allis Chalmers Manufacturing شيدت توربين غازي من إنتاج شركة براون – بوفيري السويسرية Brown – Boveri (BBC) سعة ( ٦٠٠ كيلواط KW ) لحقول النفط الأمريكية U.S. oil fields .
١٩٣٩ : قامت شركة (BBC) بتنصيب أول توربين غازي بحري Marine gas turbine في السفينة الفرنسية آتوس French ship Athos
١٩٣٩- ١٩٤١ : أول رحلة جوية لطائرة نفاثة : ١٩٣٩ في ألمانيا ، ١٩٤٠ في إيطاليا ، وفي ١٤ مايو ١٩٤١ في إنجلترا في طائرة تجريبية نوع ( Gloster E / 28 ) بأول محرك طيران ويتل Whittle flight engine نسبة إلى أسم المهندس الأنكليزي فرانك ويتل Frank Whittle .
١٩٤٠ : قامت شركة Escher – Wyss CO. السويسرية ، بسويسرا ببناء أول محطة للطاقة Power plant سعة ( ٢٠٠٠ كيلواط ) بدورة مغلقة Closed – cycle مع التبريد البيني والتجديد ( إعادة التوليد ) Inter cooling and regeneration . الهواء كمائع تشغيل Air as working fluid .
١٩٤١ : قامت شركة (BBC) ، بسويسرا ، بتشييد أول قاطرة توربينية غازية Gas turbine locomotive مع مجدد Regenerator .
١٩٤٨ : شركة بوينغ Boeing Company في أمريكا ، صنعت أول محرك توربيني غازي صغير سعة ( ١٧٥ حصان hp ) .
١٩٤٨ : قامت شركة (BBC) ببناء محطة الطاقة سعة ( ١٣٠٠٠ كيلواط ) في Beznau بسويسرا ، أول محطة توربين غازي مع التبريد البيني والتجديد ثم أضافت في عام ١٩٤٩ ، وحدة بسعة ( ٢٧٠٠٠ كيلواط ) تعمل على نظام التسخين غير المباشر لإشعال وقود الفحم Coal – fired indirect heating .
١٩٤٩ : قامت محطة هيوي Huey Station التابعة لشركة أوكلاهوما للغاز والكهرباء Oklahoma Gas & Electric CO. ، بتشغيل أول محطة دورة مشتركة Combined cycle plant ، توربين غازي مع توربين بخاري من إنتاج شركة جنرال إليكتريك General Electric (GE) وأنتجت ( ٣٥٠٠ كيلواط ) .
١٩٤٩ : قام فريق من شركة ( GE ) وشركة لوكوموتف الأمريكية ( Alco ) American Locomotive Company ببناء أول قاطرة ( محرك ) توربينية غازية أمريكية تنتج ( ٤٨٠٠ حصان ) .
١٩٥٠ : أول سيارة تدار أو تعمل بالتوربين الغازي من قبل شركة روفر Rover CO. في بريطانيا .
١٩٥٢ : شركة ( GE ) \ شركة أي آي باسو للغاز الطبيعي El Paso Natural Gas (EPNG) : أول ضاغط Compressor يعمل بالتوربين الغازي على خطوط أنابيب الغاز الطبيعي Natural gas pipelines .
١٩٥٣ تعاونت شركة ( GE) مع شركة إكسون موبيل الأمريكية Exxon Mobil Corporation(Eastern States Standard Oil) (Esso) لبناء أول مصفاة Refinery تعمل بالتوربين الغازي بإستخدام التوليد المشترك Cogeneration .
١٩٥٣ شركة وستنغهاوس الكتريك Westinghouse Electric CO. تبني أول محطة أمريكية لتوليد الطاقة بالتوربين الغازي مع التبريد البيني والتجديد .
١٩٥٣ : أول رحلة طيران تجارية Commercial flight لطائرة الركاب البريطانية VISCOUNT متوسطة المدى بمحرك مروحي توربيني Turboprop engine نوع Rolls – Royce DART تم تصميمه وتصنيعه من قبل شركة رولز رويس المحدودة Rolls-Royce Limited .
١٩٥٤ أول رحلة طيران تجارية لطائرة الركاب البريطانية COMET بمحرك نفاث ( دفع نفاث ) Jet propulsion engine نوع Dehavilland GHOST jet engine من إنتاج شركة دي هافيلاند للمحركات de Havilland Engine Company.
١٩٥٤ : محرك GT – 302 سعة ( ٣٧٠ حصان ) نوع ( firebird I ) من إنتاج شركة جنرال موتورز General Motors Company (G.M.) ، أول سيارة أمريكية تعمل بالتوربين الغازي .
١٩٥٥ - ١٩٥٩ : محركات نوع G.M. Allison GT 304-305 ، مع أولى المسترجعات الدوارة Rotary regenerators .

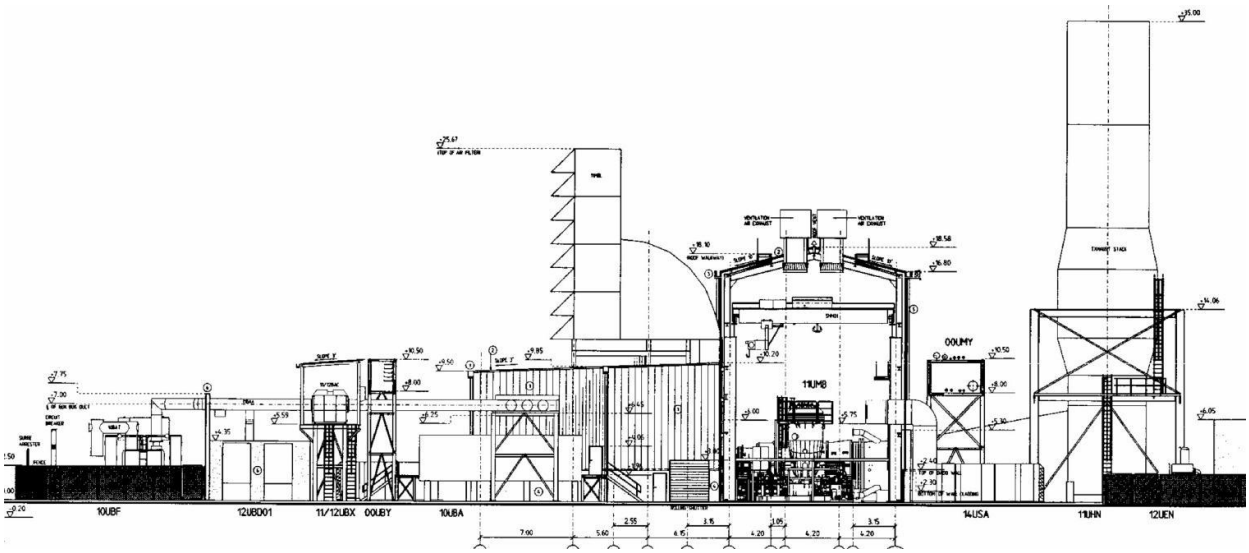
١٩٦٣- ١٩٦٨ : قامت شركة فورد Ford بتشغيل مركبة بتوربين غازي سعة (٣٠٠ حصان ) ، كما طورت شركة كرايسلر Chrysler محرك موديل CR-2A بسعة ( ١٤٠ حصان ) .
١٩٦٣ : أول طائرة حوّامة Hovercraft تعمل بالتوربين الغازي فوق القنال الإنكليزي ، بحر المانش English channel .
١٩٧٩ : أول إستخدام للطريق ( الخط) السريع Highway من قبل شركة Greyhound Lines, Inc. بواسطة حافلة غريهاوند Greyhound bus تعمل بالتوربين الغازي ، وجرار مع مقطورة Tractor-trailer يعمل بالتوربين الغازي مع التجديد ، بإستخدام محرك نوع Allison GT 404 - 4 سعة ( ٣٠٠ حصان ) ، برعاية وزارة الطاقة الأمريكية U.S. Department of energy .




الشكل ( ٣١ ) أول محطة توليد طاقة كهربائية عامة بالتوربين الغازي Utility GT Power Plant سعة ( ٤ ميكاواط MW ) في مدينة نوشاتيل بسويسرا شيدت من قبل شركة (BBC) سنة ١٩٣٩ ( بموافقة شركة ألستوم باور الفرنسية Alstom Power ) .

## نظام مدخل أو مأخذ الهواء للتوربين الغازي Gas Turbine Air Intake System

تستهلك التوربينات الغازية كتلة كبيرة من الهواء فمثلا لتوربين غازي سعة ( ١٢٥ ميكا واط MW ) يكون تدفق مدخل الضاغط ( ٤٣٨ كيلوغرام من الهواء في الثانية kilograms / second ) عند درجة حرارة محيطية ( ٥٠ درجة مئوية °C) وبالتالي يتطلب تصميم دقيق لنظام السحب أو المدخل لضمان أن تكون الخسائر الإحتكاكية في الحد الأدنى ، وأن يتم إبقاء ضجيج أو دوي الهواء الداخل ضمن حد مقبول .




الشكل ( ٣٢ ) منظر جانبي للتوربين الغازي الأرضي نوع سيمنز (SIEMENS-V94.2)

الشكل ( ٣٣ ) بيت فلاتر أو مرشحات مدخل الهواء Air intake filter house من الداخل يظهر عناصر تصفية الهواء قبل وبعد التثبيت ( التركيب ) والثقب وراء كل فلتر هو لخروج الهواء المصفى

**الأجزاء الرئيسية لمدخل الهواء :**

أ - بيت مرشحات سحب أو مدخل الهواء Air intake filter house

عادة يتم تصميم بيت المرشحات ليكون له شكل كبير وذلك للتأكد من أن إنخفاض الضغط عبره سيُقلل إلى أدنى حد ( كل انخفاض في الضغط بمقدار ١٠ ميلي بار mbar سيقلل قدرة التوربين بنسبة ١٪ ) ، ويحتوي على فلاتر هواء Air filters وريش توجيه مدخل الهواء Air entrance guide vanes والأبواب الانزلاقية Implosion doors .

ب - عنصر الفلتر Filter element

يجب أن يتم ترشيح وتصفية الهواء الداخل إلى الضاغط من أي غبار أو مخلفات ( رواسب ) قد تدخل وتسبب تلوثا مما يقلل من كفاءة ريش الضاغط Compressor blades efficiency ، وإستخدام سلسلة من المرشحات بدلا من مرشح كبير واحد يعتبر أكثر عملية نظرا لأن تعقيدات التصميم والتنصيب Design & Erection يتم تقليله ، أيضا يزداد إنخفاض الضغط في مدخل الهواء ، ويمكن بسهولة إزالة مجموعة من المرشحات الصغيرة بدلا من إزالة مرشح كبير .

الشكل ( ٣٤ ) بيت مرشحات سحب أو مدخل الهواء Air intake filter house

الشكل ( ٣٥ ) يمكن رؤية خطوط الهواء المضغوط لتنظيف أو تطهير المرشحات Filters purging ومنفذ الهواء النبضي Pulse air outlet . ضغط مجمع الهواء النبضي Pulse air header pressure هو ( ٧,٥ بار bar ) و كل نبضة بضغط ( ٣ بار ) .

ج - كاتم الصوت لمدخل الهواء Air intake silencer

نظرا للسرعة العالية لدخول الهواء إلى بيت مرشحات مدخل الهواء ، سيتم إنتاج مستوى ضوضاء كبير ويجب إستخدام كاتم الصوت لخفض مستوى الضوضاء . يحتوي كاتم الصوت على حواجز ممتصة للصوت Sound absorbent baffles وهذه الحواجز وهي عبارة عن صفائح تكون مغطاة بألواح مثقبة ومعبئة بصوف معدني Mineral wool ذو مقاومة عالية الجودة للحرارة والرطوبة ، هذا الصوف المعدني مغطى بألياف زجاجية Glass fiber تعطي حماية ميكانيكية إضافية للمادة الماصة .

د - نظام تنظيف عنصر التصفية Filter element purging system

عندما يمر الهواء عبر عناصر التصفية ( التنقية ) لفترة طويلة ، تصبح المرشحات ( الفلاتر ) متسخة وبالتالي يزداد هبوط الضغط Pressure drop عبرها ، للتغلب على الزيادة السريعة في إنخفاض الضغط يتم اللجوء إلى إما إستبدال عناصر المرشحات بعناصر جديدة أو تنظيف وتطهير Purging مرشحات الهواء .

نظام تنقية الفلتر عبارة عن هواء مضغوط Compressed air يتم توفيره من ضاغط هواء منفصل ، إذا أنخفض الضغط عبر أي من المرشحات الخام Raw filters إلى أكثر من الحد الطبيعي ، سيبدأ هذا الضاغط بالعمل و توفير هواء مضغوط لتنظيف هذه المرشحات .

الهواء المضغوط سوف يُطلق عن طريق ثقوب صغيرة على الخطوط الهوائية الموجودة خلف كل مرشح ، وهناك صمامات لولبية (صمامات كهرومغناطيسية Solenoid valves ) تعمل للتحكم في إطلاق أو تحرير هذا الهواء المضغوط .

تتم عملية تحرير الهواء المضغوط عن طريق النبض Pulsing ، لذلك في بعض الأحيان قد يتم تسمية نظام تنظيف المرشحات باسم نظام الهواء النبضي Pulse air system ، وقد تستغرق عملية التطهير الكاملة ٨٤ نبضة (مدة ٣٠ دقيقة) وستبدأ عملية التنظيف من أعلى مدخل الهواء إلى الأسفل أو القاع لتجنب إمتصاص الغبار مرة أخرى عن طريق المرشحات الخام العلوية .

**تفعيل أو تنشيط نظام الهواء النبضي ( مثال من التوربين الغازي SIEMENS V94.2 ) :**

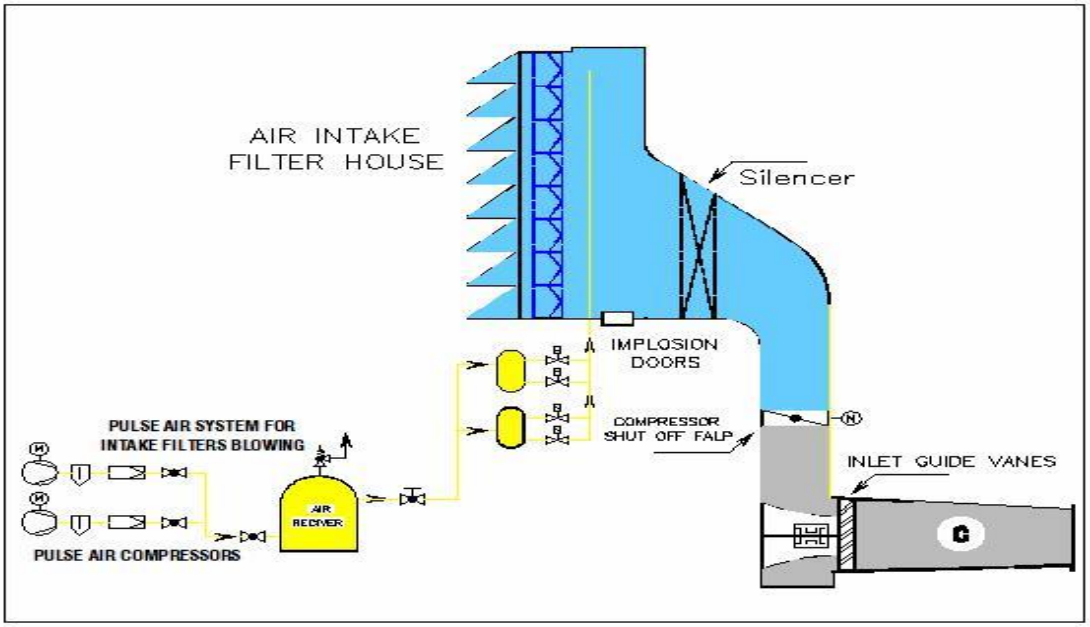
يهدف نظام الهواء النبضي إلى تنظيف الفلاتر المتسخة وللقيام بذلك هناك طريقتان لتفعيل هذا النظام وهما :

أ – إشارة Signal إنخفاض الضغط العالي عبر المرشحات الخام .

أثناء تحميل التوربين الغازي ، سيقوم نظام التحكم Control system بمراقبة إنخفاض ضغط بيت مرشحات مدخل الهواء عبر أثنين من متحسسات الضغط Pressure sensors :

المتحسس الأول لقياس ضغط الهواء قبل وبعد المرشحات الخام (هذا المتحسس ينشط نظام الهواء النبضي).

المتحسس الثاني لقياس انخفاض ضغط الهواء عبر بيت مرشحات مدخل الهواء (لا يعمل هذا المتحسس على تنشيط نظام الهواء النبضي ويرتبط بحماية التوربين الغازي فقط) .

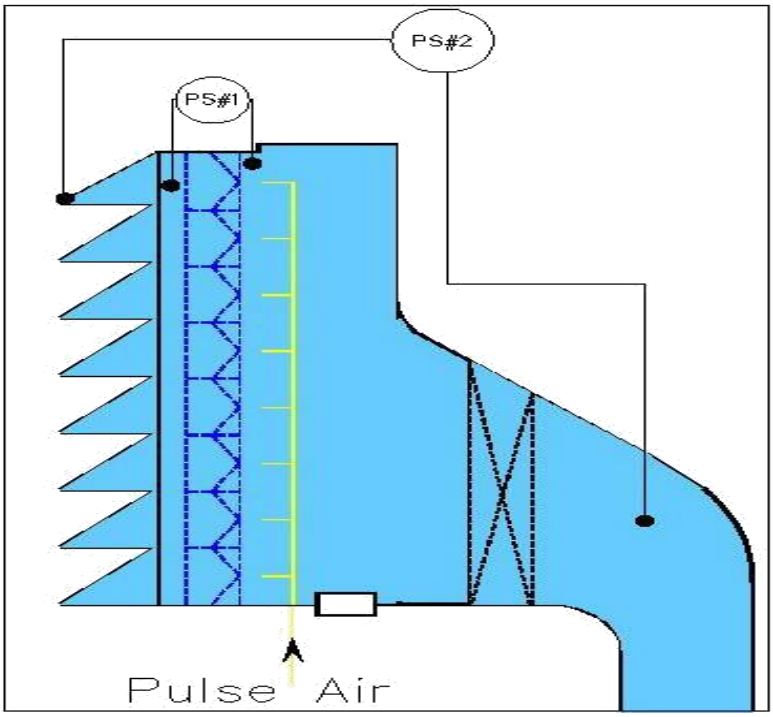



الشكل ( ٣٦ ) تخطيط بياني لنظام الهواء النبضي Pulse air system

إذا أشار المتحسس الثاني إلى إنخفاض ضغط عالي جدا ، ستبدأ عملية التوقف الإضطراري للتوربين الغازي بالخطوات التالية :

١- مع زيادة إنخفاض ضغط مدخل الهواء ، ينخفض ضغط الهواء بعد كاتم الصوت ، وهذا سينشأ منطقة فراغ موضعي Local vacuum .
٢- بسبب الفراغ داخل بيت تصفية مدخل الهواء ، سيتم شفط الأبواب الانزلاقية Implosion doors (٤ إلى ٦ أبواب) إلى الداخل .
٣- هناك مفتاح تحديد Limit switch على كل باب فعند بلوغ أي باب وضع الفتح الكامل ، هذا يعني أن مفتاح التحديد سيرسل إشارة فتح Open signal والتي ستبدأ بإيقاف التوربين الغازي لحمايته من التشغيل مع بيت تصفية مدخل هواء مسدود . تم تصميم الأبواب الإنزلاقية للتأكد من أن الضغط داخل بيت تصفية الهواء مُعادل للضغط الجوي Atmospheric pressure لتجنب تلف مدخل الهواء .

عادة ، إذا كان التوربين الغازي تحت الحمل ، سيتم تنشيط نظام الهواء النبضي فقط بسبب إشارة إنخفاض الضغط .




الشكل ( ٣٧ ) متحسسات الضغط المستخدمة في بيت تصفية مدخل الهواء

ب - إشارة الرطوبة النسبية العالية High relative humidity للهواء المحيط Ambient air (الرطوبة > ٨٠٪) .

يوجد متحسس للرطوبة على مدخل بيت تصفية مدخل الهواء لقياس الرطوبة المحيطة Ambient humidity ، إذا أرتفعت الرطوبة إلى ٨٠٪ ، ستذهب إشارة لتنشيط نظام الهواء النبضي ، وقد تستغرق عملية التطهير الكاملة ١٦٨ نبضة (مدة ساعة واحدة) ، وهذا لضمان التصفية الجافة Dry filter وتجنب التكثيف Condensation الذي قد يؤدي إلى إنسداد الفلاتر أثناء تشغيل التوربين الغازي .

نظام الهواء النبضي عادة ينشط عن طريق متحسس الرطوبة فقط عندما تكون الوحدة معطلة ( لا تحميل Off load ) ، ومتحسس إنخفاض الضغط سوف لن يتحسس أي إنخفاض ضغط لأن الهواء لا يدخل داخل بيت التصفية بسرعة عالية (لا فرق أو إختلاف بالضغط) .