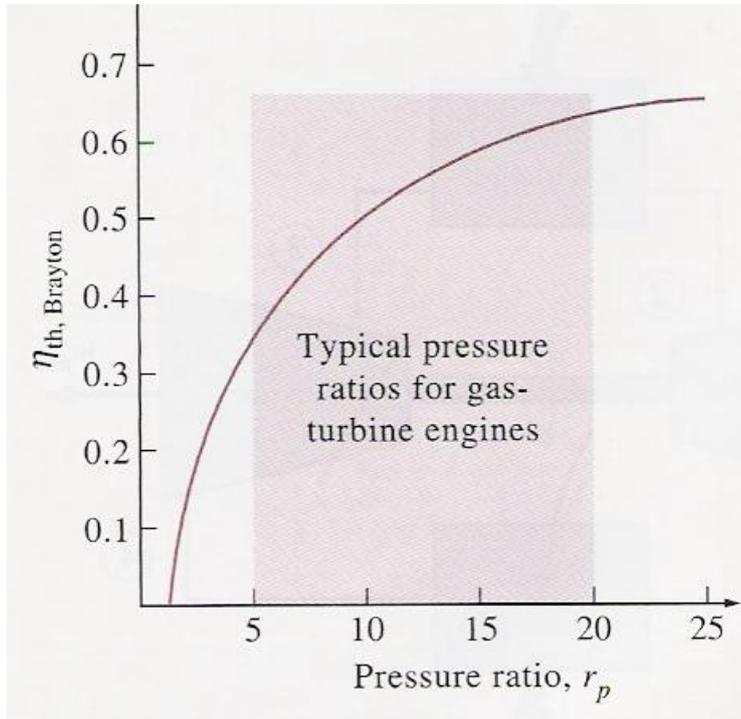


## التوربين الغازي – ضاغط الهواء Gas Turbine - Air Compressor

### الغرض الرئيسي من الضاغط Main purpose of a compressor

يقع الضاغط في المقدمة خلف مدخل الهواء . تتكون من مروحة دوارة ( على شكل مغزل ) Spinning fan مع عدد من الريش الثابتة Fixed blades مرتبة في عدة صفوف . يتم سحب الهواء إلى المحرك من محيطه باستخدام مراوح الضاغط التي تُدار من التوربين عن طريق عمود ( محور ) Shaft . يتم تسخين هذا الهواء عن طريق ضغطه ويُقاد إلى واحدة من العديد من غرف الاحتراق Combustion chambers . يمكن أن يصل الضاغط إلى ضغوط مثالية تصل إلى ٤٠ مرة أعلى من الضغط الجوي Atmospheric pressure ، وأن كفاءة التوربين الغازي Gas turbine efficiency ستزداد كلما زادت نسبة الإنضغاط Pressure ratio



الشكل ( ٣٨ ) نسبة الإنضغاط مقابل كفاءة التوربين الغازي

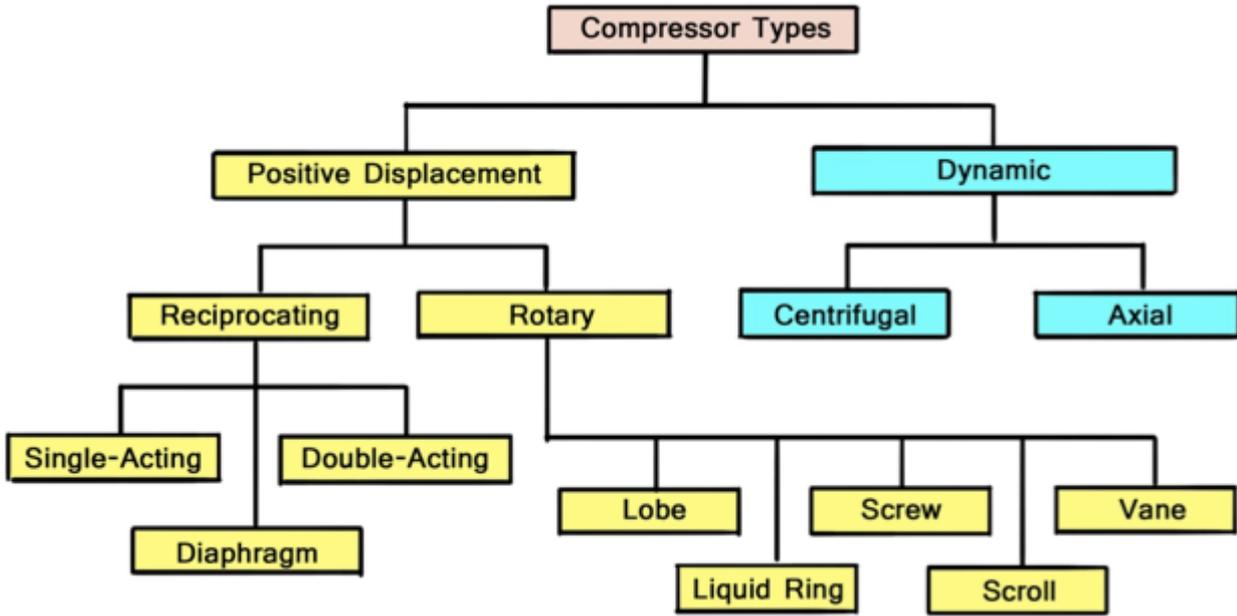
### الأنواع الرئيسية للضاغط المستخدمة في محركات التوربينات الغازية

#### Main types of compressors used in gas turbine engines

بصورة عامة تُصنف الضواغط في مجموعتين رئيسيتين :

- ١- ضواغط الإزاحة الإيجابية Positive displacement compressors (التي يتم فيها زيادة ضغط الهواء عن طريق تقليص حجمه) .
- ٢- الضواغط الديناميكية ( الحركية ) Dynamic compressors (التي يتم فيها زيادة ضغط الهواء بزيادة سرعته) .

والشكل التالي يلخص تصنيف الضاغطات :



الشكل ( ٣٩ ) تصنيف الضواغط

معظم الضواغط الشائعة الإستخدام في التوربين الغازي هي :

١ - ضاغط الطرد المركزي Centrifugal Compressor .

٢ - الضاغط المحوري Axial Compressor .

لاحظ أن كلاهما من النوع الديناميكي .

لا تستخدم الضواغط الترددية في التوربين الغازي بسبب :

أ - لها مستوى إهتزاز أعلى بسبب النبضة أو الضربة Pulsation (بسبب التغيير الحاصل في الحركات من الدورانية إلى الترددية Reciprocal motion إلى الدورانية Rotary motion) .

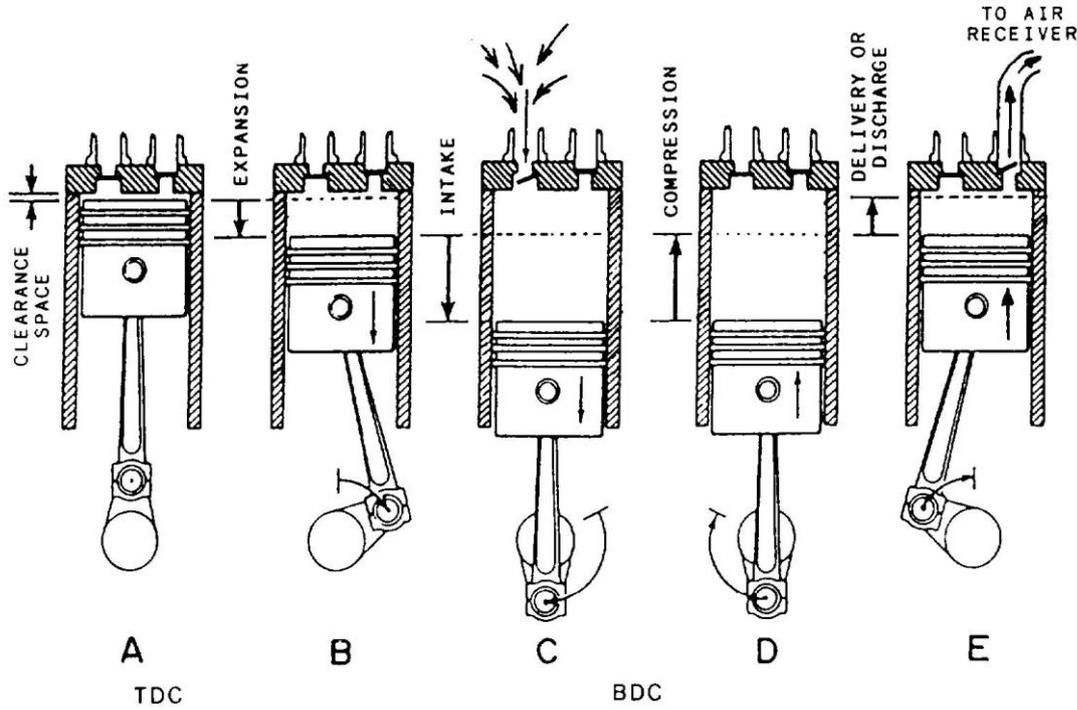
ب - تنتج ضغطا مرتفعا جدا .

ج - مع زيادة حجم التوربين الغازي ، يجب زيادة حجم الضاغط الترددي وسيطلب قدرة أكبر بسبب أجزائه الثقيلة .

د - إنها توفر أو تجهز تدفق هواء قليل مقارنة بضواغط الطرد المركزي أو المحوري Centrifugal or Axial compressors .

هـ - تشتمل على الكثير من الأجزاء المتحركة Moving parts (المكابس pistons ، أذرع الربط أو التوصيل Connecting arms ، عمود المرفق أو الكرنك Crank shaft ، صمامات السحب والتفريغ ( التصريف ) (Intake & Discharge valves) .

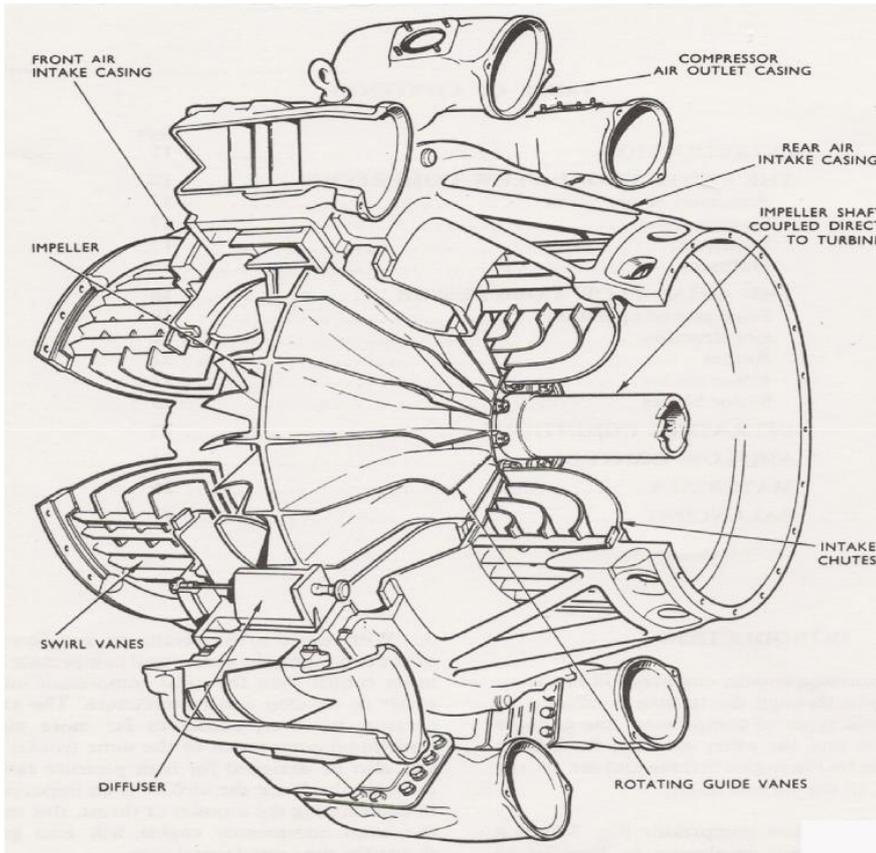
- و- غير فعال نسبيا (Relatively inefficient) (٢٠٪ - ٤٥٪) .
- ز - إستهلاك عالي للقدرة High power consumption .
- ح - متطلبات صيانتها عالية لأحتوائها على أجزاء متحركة أكثر مقارنة بأنواع الضواغط الأخرى .
- ي - جيد لتطبيقات هواء الخدمة Service air .



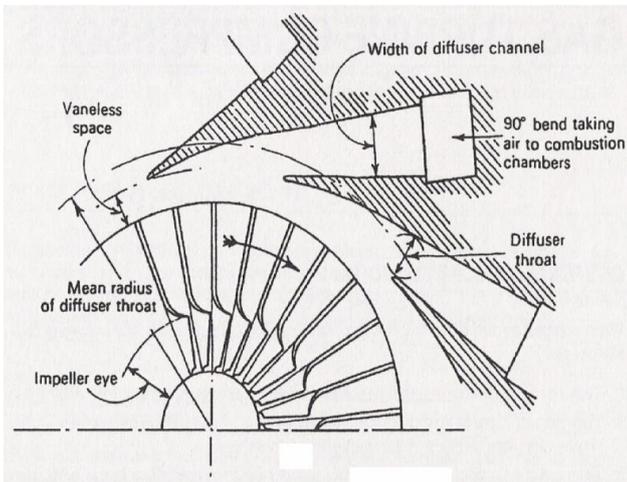
الشكل ( ٤٠ ) ضاغط ترددي Reciprocating Compressor

### ضاغط الطرد المركزي Centrifugal Compressor

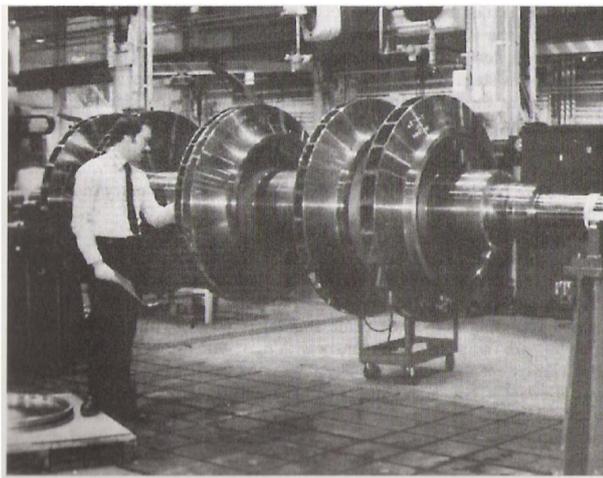
ضاغط الطرد المركزي هو عبارة عن ضاغط ديناميكي ، فهو يزيد من ضغط الهواء عن طريق تسريعه ( تعجيله ) ، يدخل الهواء إلى ضاغط الطرد المركزي في وسط الدافعات الدوارة للضاغط (الدافعات المروحية Impellers) ويخرج عن طريق قوة الطرد المركزي إلى تصريف الضاغط Compressor discharge الذي يقع في قوس غلاف الضاغط (إتجاه تصريف تدفق الهواء يكون عمودي على محور الدوران) . يتم الحصول على تسريع Acceleration للهواء من خلال عمل واحد أو أكثر من الدافعات الدوارة ؛ هواء التصريف أو التفريغ يكون خالي من النبضات Pulsation .



الشكل ( ٤١ ) ضاغط الطرد المركزي Centrifugal Compressor



الشكل ( ٤٣ ) ناشرة ضاغط الطرد المركزي  
Centrifugal Compressor Diffuser



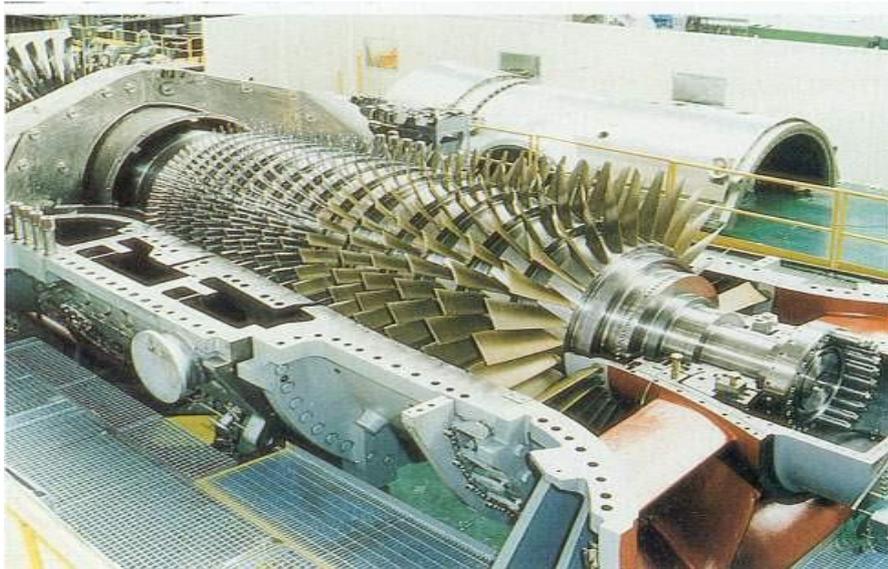
الشكل ( ٤٢ ) ضاغط الطرد المركزي متعدد المراحل  
Multistage Centrifugal Compressor



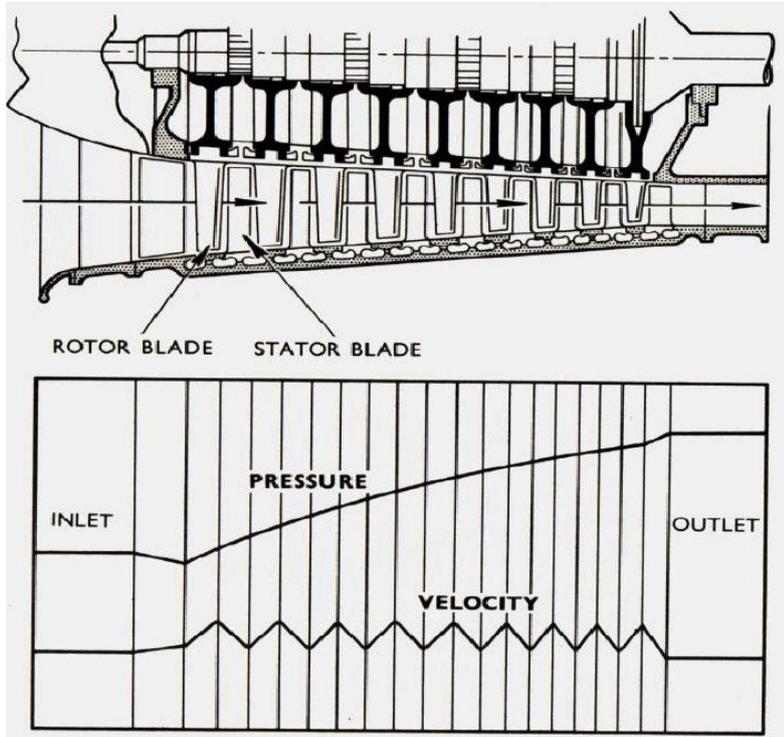
الشكل ( ٤٤ ) ضاغط الطرد المركزي متعدد المراحل

### الضاغط المحوري Axial compressor

جميع توربينات الغاز الحديثة عالية الإنتاج تستخدم ضواغط التدفق المحوري ، ومبادئ التشغيل موضحة في الشكل (٤٦) . يدخل الهواء إلى اليسار ويتم تسريعه بواسطة مجموعة من الريش الدوارة Rotary blades . يترك الهواء المجموعة الأولى من الريش الدوارة ويدخل مجموعة من الريش الثابتة Stationary blades ، حيث يتباطأ الهواء وتتحول طاقته الحركية Kinetic energy إلى طاقة ضغط Pressure energy . تتكرر هذه العملية من خلال الكثير من المراحل التي تعتمد على الضغط النهائي المطلوب . ( يكون إتجاه التدفق موازيا لإتجاه الدوران ) .



الشكل ( ٤٥ ) ضاغط محوري للتوربين الغازي سيمنز SEMENS – V94.2 والمراحل الستة الأولى مطلية بالألمنيوم

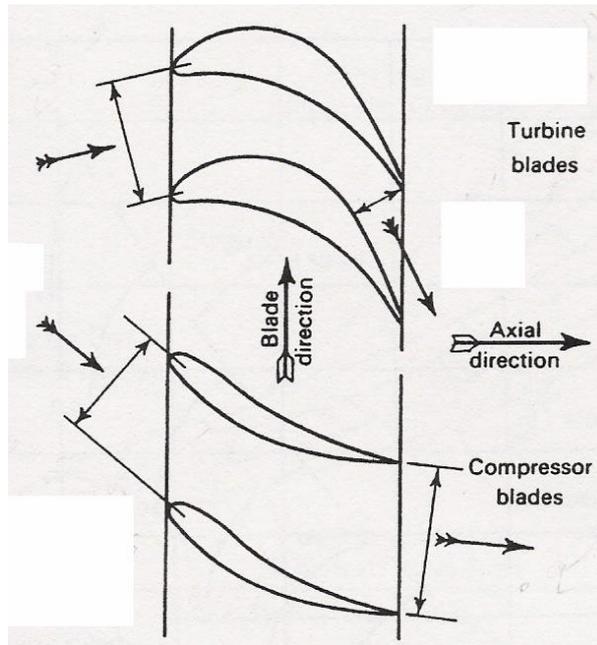


الشكل (٤٦) منحنيات  
السرعة - الضغط للضاغط المحوري  
pressure & speed curves

بالرجوع إلى الشكل (٤٦) :

أ - ريش متحركة لتسريع الهواء .  
 ب - ريش ثابتة تبطئ الهواء وبالتالي تغير الطاقة الحركية للهواء إلى طاقة ضغط .  
 ج - سرعة التصريف Discharge velocity يجب أن تساوي سرعة السحب Suction velocity .  
 يختلف تصميم ريش الضاغط عن ريش التوربين ، حيث يكون الشكل الجانبي لريش الضاغط مائلة ومتباعدة Divergent profile والتي تعمل كناشرة Diffuser لزيادة ضغط الهواء ، في حين أن ريش التوربين لها شكل جانبي متقارب Convergent profile والتي تعمل كفوهة أو منفث Nozzle لأن التوربين يخفض ضغط الهواء عن طريق تغيير طاقة ضغطه إلى طاقة حركية . الرجوع إلى الشكل (٤٧) .

الشكل (٤٧) الشكل الجانبي لريش  
التوربين والضاغط



لاحظ أن ريش الضاغط تتعرض إلى إجهاد عالي High stress ولكن بدرجة حرارة أقل بينما غرفة الاحتراق Combustion chamber تعاني من ارتفاع درجة الحرارة ولكن مع إجهاد أقل نسبياً .  
في الضاغط المحوري ، تصميم الريش المتحركة ذات أهمية لتوفير شكل إنسيابي ( ديناميكي هوائي Aerodynamic ) مع الحد الأدنى من الخسائر ، كما يجب أن يكون خلوصية Clearance طرف ( قمة ) الريشة Blade tip أقل قدر ممكن لتحسين كفاءة الريشة المتحركة وللمنع التسرب من جهة طرف الريشة .  
وعادة تكون خلوصية الريش المتحركة للضاغط ( ٧ ملمتر mm ) لتقليل خسائر أطراف الريش Blade tip losses .

أثناء الجو الرطب ، قد تحدث الرطوبة العالية فقط في المراحل الست الأولى من الضاغط لأن الهواء يُسخن بسرعة وقد يحدث تكثف Condensate . للتغلب على ضرر التقر Pitting damage لريش الضاغط ، يتم طلاء المراحل الست الأولى بصبغة الألومنيوم Aluminum pigment .

قد يحتوي الهواء الداخل إلى ضاغط الهواء على غبار أو أوساخ Dust or dirt (حتى لو كان يمر من خلال منظومة مدخل أو سحب الهواء Air intake system) وهذا الغبار أو الملوثات Contaminations سوف تلتصق بريش الضاغط والتي ستؤثر على أداء الضاغط Compressor performance بسبب :

أ- سوف تقل كفاءة مرحلة الضاغط Compressor stage efficiency لأن تراكم الأوساخ على الريشة المتحركة سوف يسبب تغير في زاوية تصريف الريشة بمقدار ( ٧ ° درجات ) والذي سيؤدي إلى تغيير اتجاه سرعة الخروج Output velocity direction إلى المرحلة التالية وبالتالي تقليل كفاءة الريشة .

ب - عندما تلتصق الأتربة أو الغبار على ريش الضاغط فإنها ستشكل نقاطاً ساخنة Hot spots ، تذكر أن ريش الضاغط ستُسخن أثناء تشغيل الضاغط بسبب الاحتكاك الناتج عن الدوران العالي . سوف تولد الأوساخ أو الأتربة نقاط ذات درجة حرارة عالية على الريشة لكونها ذات موصلية حرارية Thermal conductivity مختلفة عن الصلب Steel (يتم تصنيع ريش الضاغط من معدن الصلب أو الفولاذ) ، لذلك فإن هذه البقع الساخنة سوف تنتج إجهادات حرارية Thermal stresses على الريشة والتي ستؤدي إلى فشل الريشة إذا لم يتم إزالة الأوساخ أو غسلها .

ج- قد ينتج عن الأوساخ المترسبة على ريش الضاغط اضطراب Turbulence في تدفق الهواء ، تولد إهتزاز وزيادة في درجة حرارة التصريف Discharge temperature مما يؤدي إلى تقليل كفاءة الريشة Blade efficiency .

معظم ضواغط التوربينات الغازية لها وحدة غسل يتم فيها غسل ريش الضاغط بمزيج من الماء الخالي من المعادن والأملاح Demineralized water ومادة خاصة لإزالة أي أوساخ أو غبار على ريش الضاغط ، ويمكن إجراء عملية الغسيل عندما يكون التوربين الغازي في وضع التشغيل (On-line washing) أو عندما يكون التوربين الغازي في وضع الاحتياط (Off- line washing) Stand by .

## عملية غسل الضاغط Compressor washing process

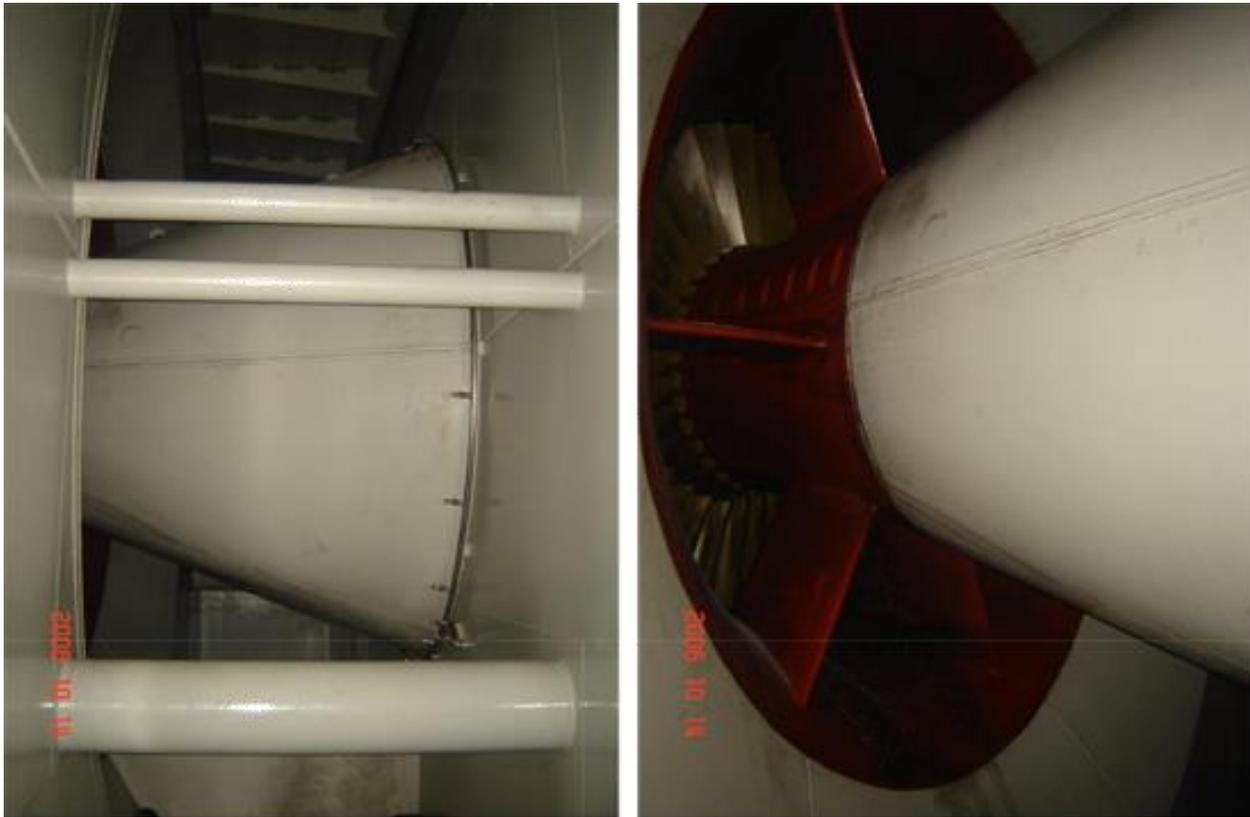
الهدف من عملية تنظيف الضاغط هو إزالة الرواسب من الريش التي تسببت في انخفاض إنتاج وكفاءة التوربينات الغازية . حيث لا يمكن إزالة تلوث الهواء المحيط بالكامل عن طريق نظام ترشيح أو تصفية مدخل الهواء . بشكل رئيسي هناك نوعان من غسل الضاغط ، أثناء التشغيل و أثناء التوقف Online & Off line washing ، وتتم عملية غسل الضاغط باستخدام محلول التنظيف Detergent solution والماء الخالي من المعادن والأملاح من أجل التنظيف النهائي . يتم رش كلا السائلين على ريش الضاغط من خلال نوعين من الفوهات Nozzles :

أ - فوهات نفثة Jet nozzles التي تتكون من فتحتين نفثتين تضخان أو تحقنان المياه بسرعة عالية

ويتم إستخدامها للغسل فقط أثناء اللاحمل Off load حيث أنها تحقن مياه بسرعة عالية والتي ستكون ضارة على ريش الضاغط التي تدور بسرعة تزامن Synchronizing speed تساوي ٣٠٠٠ دورة في الدقيقة rpm . سيصبح تأثير قطرة ماء صغيرة واحدة مثل الرصاصة .

ب - فوهات الرش Spray nozzles تكون متواجدة على مسافات متساوية حول محيط مدخل الضاغط ، في عكس إتجاه ريش التوجيه المتغيرة لمدخل الضاغط Variable compressor inlet guide vanes ، كل منها تضخ الماء بإعتدال .

وحدة تنظيف الضاغط المحمولة على منصات إنزلاقية Compressor cleaning skid تتكون من خزان ووحدة ضخ ، وتقوم مضخة الطرد المركزي Centrifugal pump بسحب محلول التنظيف والمياه منزوعة المعادن من الخزان المحمول أو المتنقل Portable tank وتغذيتها من خلال خرطوم Hose إلى فوهات النفط أو الرش . يتم ضخ (محلول التنظيف - المياه منزوعة المعادن ) عند ضغط حوالي ( ١٠ بار bar ) . تستخدم صمامات العزل Isolation valves في التحول من الفوهات النفاثة إلى فوهات الرش وبالعكس . الشكل ( ٥٠ )



الشكل ( ٤٨ ) فوهات غسل الضاغط Compressor washing nozzles



الشكل ( ٤٩ ) وحدة غسل الضاغط Compressor Washing Skid

هنالك طرق بديلة لتنظيف الضاغط وتشمل ما يلي :

أ - تفكيك Diassemble الضاغط جزئيا لتنظيف ريش المحور الدوار ، هذه الطريقة تعطي نتيجة ممتازة ولكنها تتطلب انقطاع وتوقف لوقت طويل .

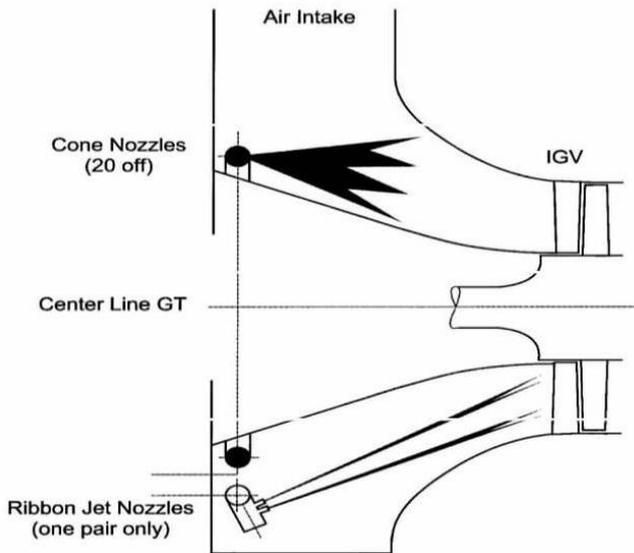
ب - حقن قشور الجوز أو خشب الجوز المسحوق وحقن الأرز وحقن الكربون المركز . ولكن لا ينبغي إستخدام هذه الطريقة في التوربينات الغازية الحديثة بسبب :

أ- خطر الحريق .

ب- التلوث والإندداد بسبب الزيوت .

ج- خلل في نظام التبريد .

د- الفشل المبكر للجزء الساخن .



- إجراءات الغسل الطبيعي للضاغط :
- تطبيق فوهات مخروطية Cone nozzles فقط .
  - غسل في وضع التوقف Off-line washing أو الإحتياط ، يوصى بسرعة ( ٦٠٠ - ٩٠٠ دورة دقيقة ) .
  - يمكن الغسل في وضع التشغيل On-line washing ( التوربين الغازي مرتبط بالشبكة Grid ) ولكن لا يوصى بهذا الإجراء .
  - الإلتباه للتوصيات الموجودة في كتيبات التوربين الغازي GT manuals .

- الفوهات النفاثة الشريطية المسطحة flat ribbon jet nozzles
- يطبق فقط للرواسب الصلبة Hard deposits المترسبة على ريش الضاغط
  - ينفذ عند سرعة جهاز التدوير البطيء Turning gear فقط .
  - فتح ( IGVs ) الريش الموجهة لمدخل الضاغط Compressor inlet
  - guide vanes يدويا .
  - الإلتباه للتوصيات الموجودة في كتيبات التوربين الغازي GT manuals .

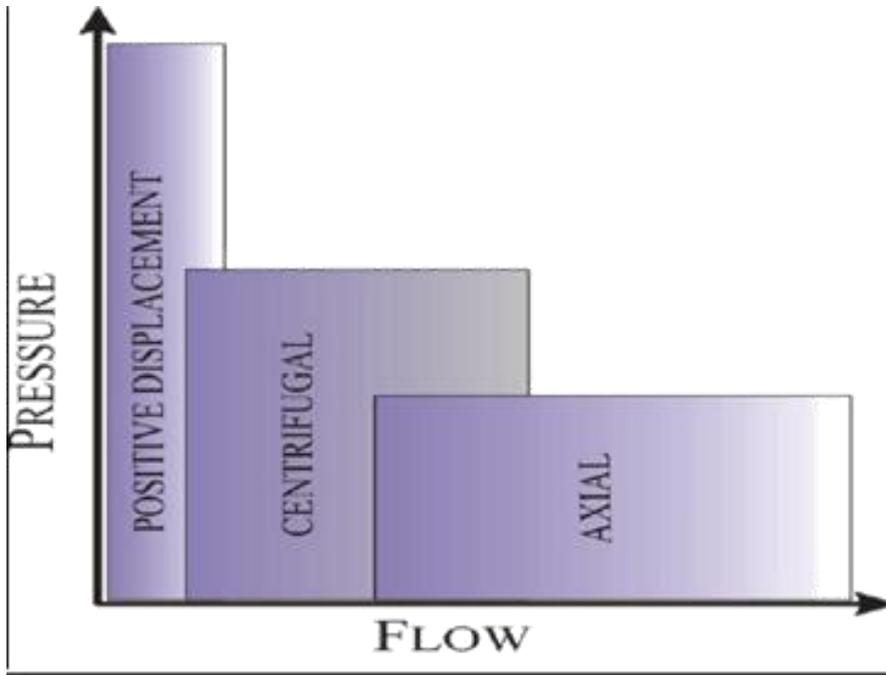
الشكل ( ٥٠ ) أنواع فوهات غسل الضاغط

الفرق بين الضواغط المحورية والطردي المركزي

The difference between axial & centrifugal compressors

ت	الضاغط المحوري Axial Compressor	ضاغط الطرد المركزي Centrifugal Compressor
١	كفاءة أعلى ( ٨٢ % - ٩٠ % ) .	كفاءة أقل ( ٧٢ % - ٨٢ % ) .
٢	أكبر في الحجم .	أصغر في الحجم .
٣	له كفاءة أيزونتروبية أعلى Higher isentropic efficiency.	له كفاءة أيزونتروبية أدنى .
٤	أطول في الحجم .	أقصر في الحجم .
٥	جيد لتطبيقات (الضغط \ التدفق) المتوسط Medium pressure/flow application.	جيد لتطبيقات ( ضغط منخفض \ تدفق كبير ) low pressure / large flow application.
٦	يستخدم في تطبيقات سرعة أعلى (محرك الطائرة) (aircraft engines) .	تستخدم في تطبيقات عالية السرعة (التوربينات الغازية الأرضية land base gas turbines) .
٧	يقل أدائه بترسب الأوساخ على أسطح الريش .	غير معرض لفقدان أدائه بسبب تراكم الأوساخ على أسطح الريش .
٨	يوجد تكوين متعدد المراحل Multistage configuration مع لا خسائر بالضغط .	بزيادة عدد مراحلها سوف تزداد خسائر الضغط .
٩	كلفة أعلى .	كلفة أقل غلاء

ملاحظة توضيحية : عملية متساوية الأنتروبية (أيزونتروبية isentropic) هي العملية التي تتم عند أنتروبي ثابت أي  $dS=0$  ، عملية حرارية مثالية تتم بدون فقدان حرارة ومادة بين النظام والمحيط أي لا إحتكاك في العملية .

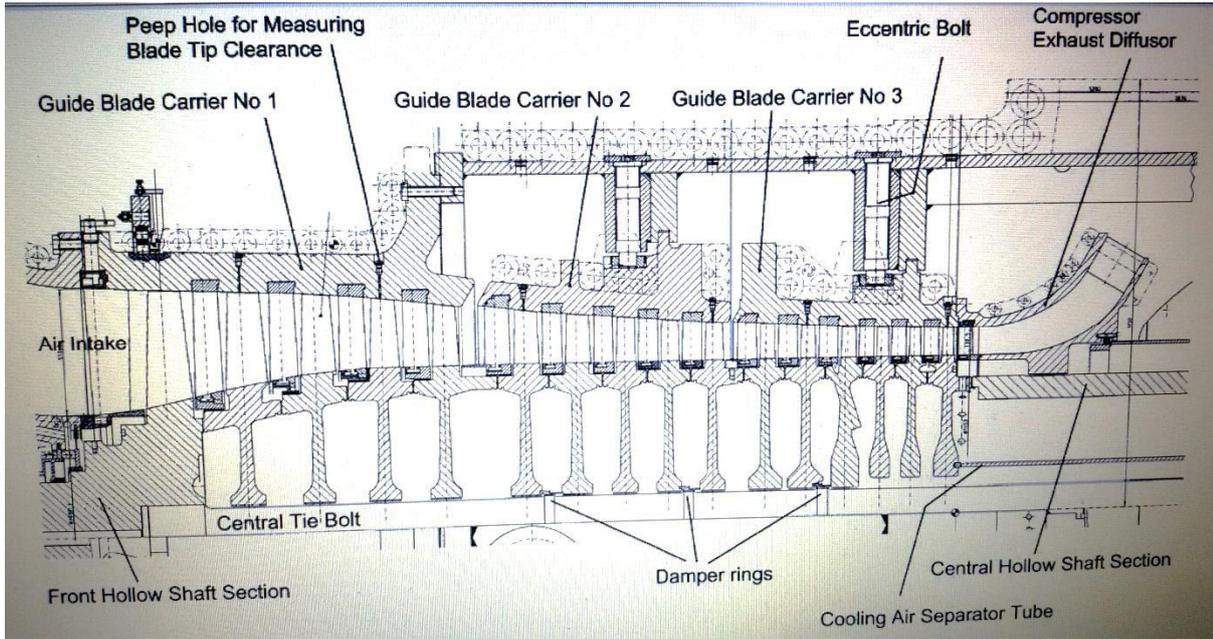


الشكل ( ٥١ ) نطاق تشغيل الضواغط

## تصميم الضاغط المحوري Axial Compressor Design

يتكون الضاغط المحوري من :

- ١- الجزء الثابت Stator وحامل ريش التوجيه Guide Blade Carrier .
- ٢- المحور Rotor .
- ٣- ريش توجيه المدخل Inlet Guide Vanes .
- ٤- ناشر العادم Exhaust Diffuser .
- ٥- خطوط التنفيس أو النذف Blow off Lines .



الشكل ( ٥٢ ) مقطع طولي Longitudinal section للتوربين الغازي سيمنز (SIEMENS-V94.2) - قسم الضاغط

### ١- الجزء الثابت وحامل ريش التوجيه Stator & Guide Blade Carrier

يتكون الجزء الثابت للضاغط من ثلاث حاملات ريشة توجيهية ، يتم فصلها عن بعضها البعض لتوفير تحكم جيد في خلوصية طرف قمة الشفرة Blade tip clearance ، يمكن ضبط موضع حامل ريشة التوجيه باستخدام برغي لا مركزي Eccentric bolt الذي يوفر المرونة Flexibility لحركة حامل ريشة التوجيه في كل الاتجاهات ما عدا الإتجاه المحوري بمقدار ( ٣ ملم mm ) . يتم قياس خلوصية طرف الريشة عن طريق ستة ثقوب ضيقة Peep holes موجودة على الجزء الثابت للضاغط .

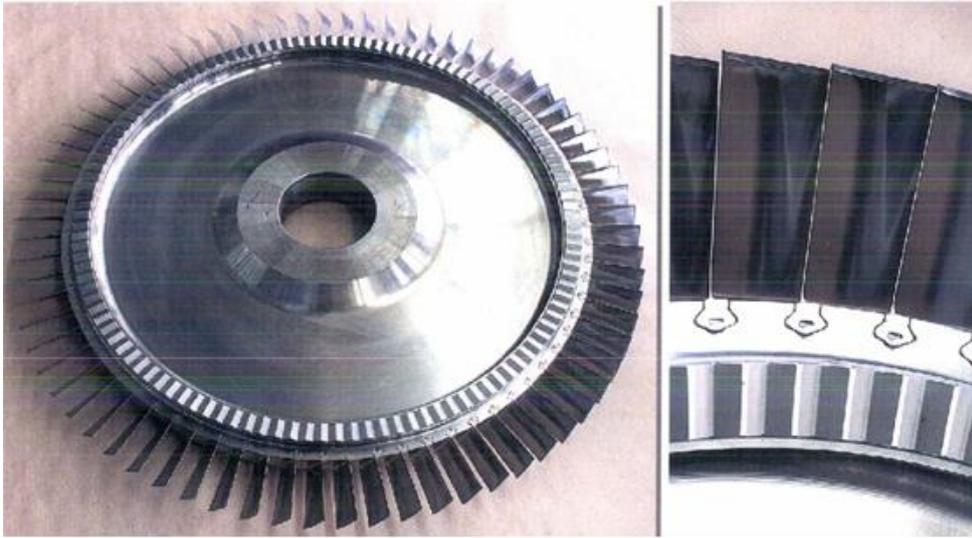
هناك ثغرات أو فجوات Gaps في الجزء الثابت للضاغط التي توفر ممرات لنذف أو تنفيس الهواء Blow off . توجد حلقات كاربونية Carbon rings مثبتة في أجزاء حول المحور لحماية الريش المتحركة من الإحتكاك بالجزء الثابت للضاغط في حالة إختلاف محاذاة المحور (فقدان الإستقامة المحورية Rotor misalignment ) عادة ما يصنع الجزء الثابت للضاغط من سبائك الصلب Steel alloys .

## ٢- المحور الدوار للضاغط Compressor rotor

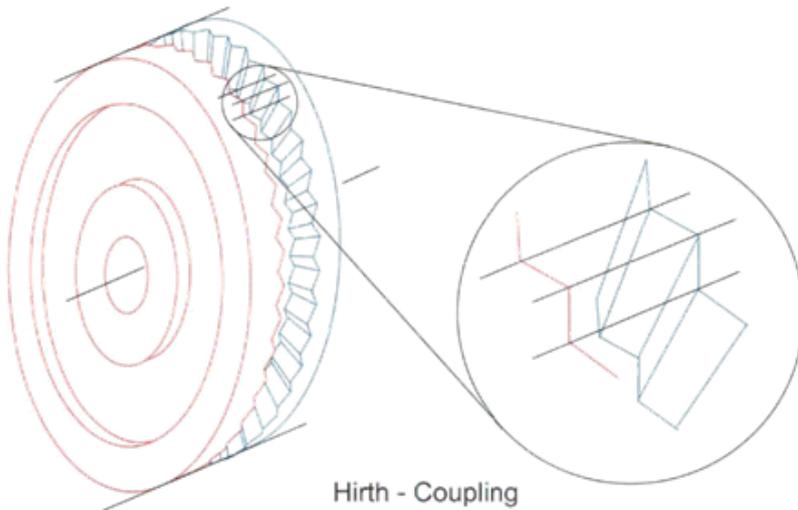
يتألف المحور من أقراص دوارة Rotor disks يتم تجميعها مع بعض بواسطة قارنات أو توصيلة هيرث Hirth Coupling وهي نوع من الوصلات الميكانيكية التي تحمل اسم المطور Albert Hirth . الشكل (٥٢) والشكل (٥٣) . يحمل القرص الدوار الريش المتحركة Moving blades للضاغط .

تكون الأقراص الدوارة مجوفة من الداخل وهناك براغي ربط مركزية تضمن أنها مثبتة في مواضعها ، لاحظ أن هناك فجوة بين الأقراص الدوارة (حوالي ٣ مم mm) وبراعي الربط المركزية ، هذه الفجوة هي لتوفير ممرات للهواء المستخلص Extracted air من الضاغط لتبريد المكونات الساخنة (الحارقة والتوربين) Combustor & Turbine . تستخدم حلقات التخميد Damper rings لتقليل إهتزاز براغي الربط المركزية من خلال دعمها أو إسنادها بالأقراص الدوارة .

يتم إسناد المحور عن طريق محامل شعاعية و محورية Radial & Axial bearings (journal bearings) . يُصنع المحور من سبائك الصلب steel alloys وتُصنع ريشه بشكل عام وشفراته بشكل عام بواسطة عملية تشغيل آلي أو ميكانيكي Machining process .



الشكل ( ٥٣ ) القرص الدوار للضاغط Compressor Rotor Disk



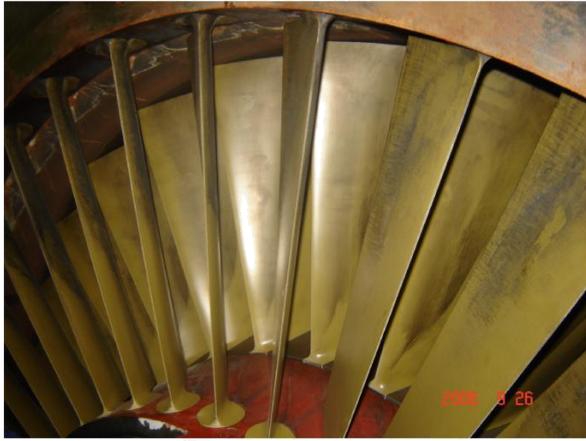
الشكل ( ٥٤ ) قارنات أو توصيلة هيرث Hirth Coupling

### ٣ - ريش التوجيه المتغيرة لمدخل الضاغط (I.G.V) Compressor variable inlet guide vanes

تحتوي معظم التوربينات الغازية الحديثة على ريش التوجيه المتغيرة لمدخل الضاغط (I.G.V) ، وعادة ما يتم ضبط فتحها بنسبة ٤٠٪ عندما تكون الوحدة في وضع الإحتياط ، بمجرد بدء تشغيل التوربين الغازي يتم وضع ال (I.G.V) تحت السيطرة لغرض إستخدامها في توفير الهواء اللازم للحمل المحدد و أيضا للسيطرة على درجة حرارة مخرج التوربين Turbine outlet temperature وتجنب الزيادة في درجة الحرارة بزيادة فتح ال (IGV) اللازم لزيادة تدفق هواء الضاغط لتبريد التوربين .

I.G.V يُستخدم للتحكم في تدفق الضاغط لحمل معين وللسيطرة على درجة حرارة مدخل المرجل Boiler في الدورة المركبة Combined cycle ، وكذلك يتم ضبطه عند فتح (٤٠٪) أثناء بدء تشغيل التوربين الغازي من أجل تقليل تدفق مدخل الضاغط الذي سيقبل من الإجهادات على المرحلة الأولى من الريش المتحركة للضاغط (أطول ريش متحركة في الضاغط) أثناء بدء التشغيل . تتم حركة ريشة توجيه المدخل IGV عبر محرك كهربائي Electric motor متصل بألية ريشة التوجيه Guide vane mechanism ، أنظر الشكل (٥٥) .

كلما أزداد حمل التوربين الغازي ، ستزداد نسبة فتح IGV حتى تصل إلى ( ١٠٠٪ فتح ) ، عندئذ يقال أن الوحدة تحت عملية أو في حالة تشغيل الحمل الأساس Base load operation (أي أن تدفق الضاغط يكون في الحد الأقصى) ، لاحظ أن ضخ كمية وقود إضافية إلى التوربين الغازي سوف تزيد من درجة حرارة مدخل التوربين إلى قيمة أعلى ويمكن توفير قدرة إضافية Extra power ولكن في هذه الحالة ، يقال أن الوحدة تحت عملية حمل الذروة Peak load لأن درجة حرارة مخرج التوربين أعلى مما هي عليه في حالة تشغيل الحمل الأساس لأن ال (IGV) لا يمكن فتحه فعليا أكثر من نسبة (١٠٠٪) لتوفير هواء التبريد الضروري للتوربين



الشكل ( ٥٥ ) ريش التوجيه المتغيرة لمدخل الضاغط Compressor variable inlet guide vanes (I.G.V)

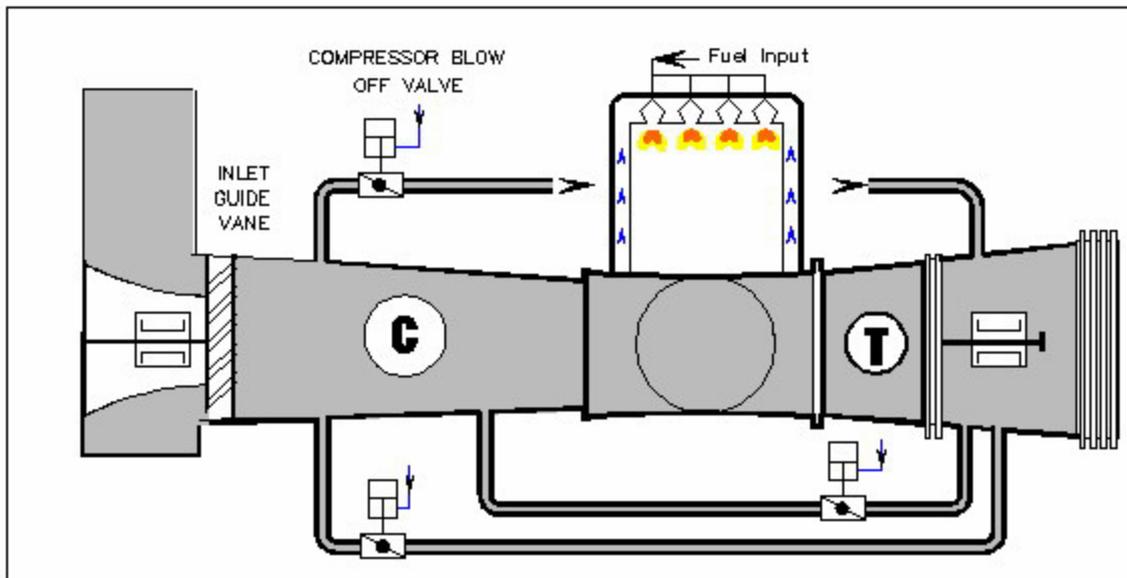


#### ٤- ناشر العادم Exhaust Diffuser

يستخدم ناشر العادم لتوفير المزيد من الزيادة في ضغط الهواء وكذلك لإزالة الدوامات Vortices من الهواء وجعل تدفقه أكثر رقائق أو إنسيابي Laminar بعد أن تم تغيير اتجاه الهواء المتدفق على طول مراحل الضاغط Compressor stages بأكملها ، وبالتالي زيادة الاضطراب Turbulence . إن عدد مراحل الضاغط أكثر من مراحل التوربين Turbine stages حيث تتطلب أي زيادة في ضغط الهواء من ضاغط محوري (ضاغط ديناميكي) إما زيادة في حجم المراحل أو زيادة في عدد المراحل لغرض إنتاج الضغط المرغوب .

#### ٥ - خطوط التنفيس أو النزف Blow off Lines

يتم تصميم أنظمة التنفيس Blow-Off للتحكم في نسبة الضغط \ التدفق (Pressure / Flow Ratio) ، أثناء التشغيل بسرعة منخفضة ، مثل فترة بدء التشغيل Start up period . ضاغط التدفق المحوري يحتوي على خط تنفيس (أو خطوط نزف Bleed lines) لتفريغ بعض الهواء الداخل إلى الضاغط أثناء بدء التشغيل وتمريه بسرعة إلى العادم عبر ممر إنفاقي أو حولي By pass (حول غرفة الإحتراق والتوربين) ، وهذا يساعد على القضاء على ظاهرة إرتداد الضغط وعدم إستقرار التدفق (إضطراب الهواء) في الضاغط Compressor surge أثناء التشغيل المنخفض السرعة (بدء التشغيل) . على كل من هذه الخطوط يوجد صمام تنفيس يكون عادة من نوع الفراشة Butterfly valve ويعمل بالهواء المضغوط Compressed air المستخلص من هواء الضاغط . عادة يتم وضع أو تثبيت خطوط التنفيس بنسبة ٣٠٪ و ٦٠٪ خلال الضاغط ، بالنسبة للضاغط المحوري الذي يحتوي على ١٠ مراحل ، فيجب أن يكون هناك صمام تنفيس واحد بينما يحتاج ضاغط محوري كبير إلى ثلاثة خطوط ، لاحظ أن ظاهرة إرتداد الضغط أو إضطراب الهواء مرتبطة فقط بالضاغطات الديناميكية Dynamic compressors أما ضواغط الإزاحة الإيجابية Positive displacement compressors فلا تحتاج إلى صمام تنفيس .



الشكل ( ٥٦ ) خطوط التنفيس أو النزف للضاغط Compressor blow off Lines

## مزايا خطوط التنفيس Advantages of blow off lines

- ١ - يتم إستخدام هواء التنفيس كمانع إنجماد Anti icing وذلك لمنع حدوث إنسداد في الطقس البارد بسبب تكون الجليد في بيت تصفية هواء المدخل Air intake filter house ، يتم إعادة تدوير وتمرير هذا الهواء النازف (أكثر دفئا من الهواء الخارجي) إلى مدخل الضاغط مرة أخرى .
  - ٢ - يتم إستخدام هواء النزف كهواء تطهير وتنظيف Purge air للأفران Furnace في الدورة المركبة Combined cycle .
  - ٣ - خطوط النزف تبديد الطاقة في حالة التوقف المفاجيء Trip ، وتمنع السرعة المفرطة Over-speed .
  - ٤ - إذا تم تقليل السرعة إلى أقل من الحد الأدنى للتردد ، فسوف تُفتح صمامات التنفيس لمنع حدوث ظاهرة إرتداد ضغط الضاغط Compressor surge .
- بالرجوع إلى الشكل ( ٥٦ ) هناك نوعان من خطوط التنفيس أو النزف عند نسبة ٣٠ ٪ من طول الضاغط (المرحلة رقم ٥) وخط واحد عند نسبة ٦٠ ٪ من طول الضاغط (المرحلة رقم ١٠) ، والسبب في وجود خطين منفصلين عند ٣٠ ٪ من طول الضاغط لأن ضغط الهواء في هذه المرحلة ليس عاليا ، لذا فإن حجمه أكبر ، وهذا يعني أننا بحاجة إلى طرد كمية كثيرة من الهواء ، ولكن عند ٦٠ ٪ من طول الضاغط (المرحلة رقم ١٠) يتم رفع ضغط الهواء لذلك يجب نزف كمية قليلة من الهواء فقط إلى الخارج وبالتالي يكفي وجود خط نزف واحد .  
لاحظ أنه :
- سيتم إغلاق صمامات التنفيس في المرحلة رقم ٥ عند ٣٨ هرتز Hz (٢٢٨٠ دورة في الدقيقة rpm) .
  - سيتم إغلاق صمام التنفيس في المرحلة رقم ١٠ عند ٤٩ هرتز Hz (٢٩٤٠ دورة في الدقيقة rpm) .
- يجب على الضاغط توفير أو تجهيز نوعين من الهواء :
- ١- الهواء الخارج من المرحلة الأخيرة للضاغط ويدخل غرفة الإحتراق ليتم إستخدامه في الإحتراق .
  - ٢- الهواء الذي يتم إستخراجه أو إستخلاصه من الضاغط في موقع مختلف عبر ممرات مخفية وإرساله لتوفير التبريد الغشائي Film cooling للمكونات الساخنة من التوربين الغازي (غرفة الإحتراق وقسم التوربين) .
- كل ١ ٪ من الهواء المستخلص Air extraction من الضاغط سوف يقلل من قدرة التوربين بنسبة ٢ ٪ لأن الهواء المستخرج يُستخدم لتبريد المكونات الساخنة و ليس كهواء للإحتراق .



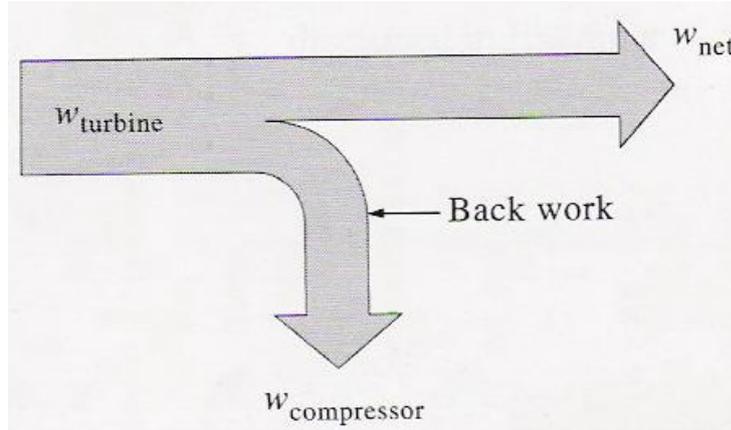
الشكل ( ٥٧ ) خطوط التنفيس أو النزف Blow off lines

إعتبارات التصميم الرئيسية في الضاغط محوري

## The main design considerations in axial compressor

### ١- نسبة الشغل الراجع ( B.W.R. ) : Back Work Ratio

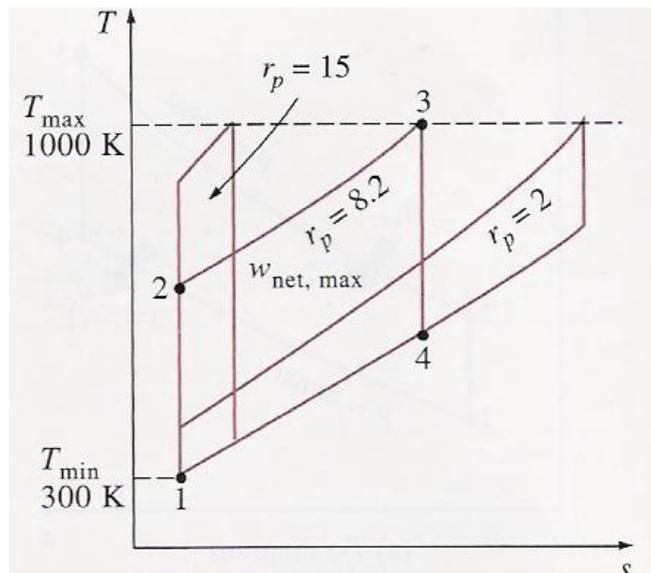
هي نسبة شغل الضاغط ( $W_c$ ) إلى شغل التوربين ( $W_t$ )  $B.W.R. = W_c / W_t$  يتم توفير القدرة الميكانيكية Mechanical power للضاغط والمطلوبة لضغط أو كبس الهواء عن طريق التوربين ، بالنسبة للتوربينات الغازية الكبيرة يمكن إيجاد نسبة شغل راجع أكبر من (٠,٥) . يجب أن يوفر التوربين الغازي قدرة ميكانيكية إضافية لتشغيل الضاغط . لذلك ، فإن التوربين المستخدم في التوربين الغازي أكبر من التوربين المستخدم في التوربين البخاري لنفس ناتج القدرة الصافي Net power output .



الشكل ( ٥٨ ) نسبة الشغل الراجع Back Work Ratio

### ٢- نسبة الإنضغاط ( $r_p$ ) Pressure Ratio

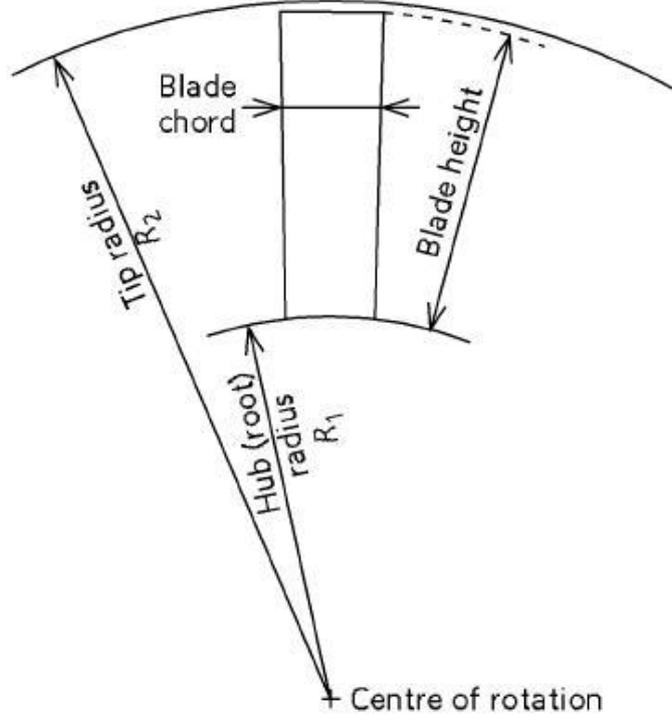
هي نسبة ضغط تصريف الضاغط Compressor discharge pressure إلى ضغط مدخل الضاغط Compressor inlet pressure ، بالنسبة للتوربينات الغازية الحديثة هذه النسبة تزيد عن (٢٠) .



الشكل ( ٥٩ ) لقيم ثابتة من درجات الحرارة لكل من مدخل الضاغط والتوربين ، فإن زيادة نسبة الإنضغاط ستؤدي إلى زيادة شغل التوربين إلى الحد الأقصى ، بعد ذلك سوف يقل

### ٣- نسبة المحور الرأس : Hub/Tip Ratio

هي نسبة قطر المحور Hub الذي يتم تركيب الريش فيه (Root) إلى القطر حتى نهاية قمع أو رؤوس الريش Blades tips (القطر الخارجي لكل المحور في ذلك المقطع) .  $Hub / Tip Ratio = R_1 / R_2$



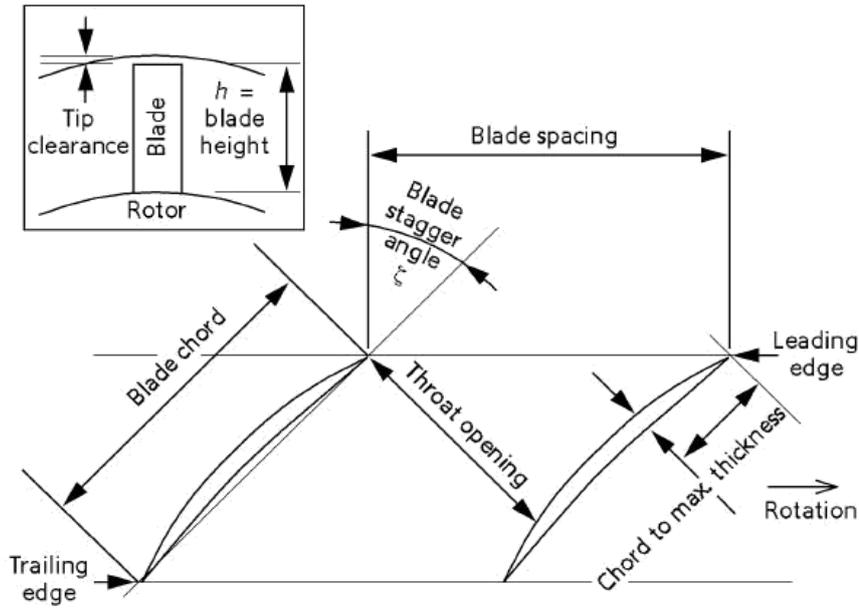
الشكل ( ٦٠ ) نسبة المحور الرأس Hub/Tip Ratio

النسبة (المحور الرأس) تأثير على تصميم الضاغط . حيث أن القيمة المنخفضة للنسبة تسمح بأن يكون قطر الضاغط الكلي أصغر قليلاً ، ولكنها تزيد من ارتفاع الريشة Blade height . عند نهاية مدخل الضاغط لا تقل نسبة المحور الرأس عادة عن ( ٠,٥ ) ، بينما في نهاية مخرج الضاغط تكون قيمته ( ٠,٩ ) (أي أن طول الشفرة يكون في الحد الأدنى) .

### ٤- نسبة الأبعاد أو نسبة إمتداد الريشة : Aspect Ratio

يتم تحديد نسبة الأبعاد لريشة الضاغط بالمعادلة التالية :  
نسبة الأبعاد = ارتفاع الريشة \ وتر الريشة

$$\text{aspect ratio} = \frac{\text{blade height}}{\text{blade chord}}$$



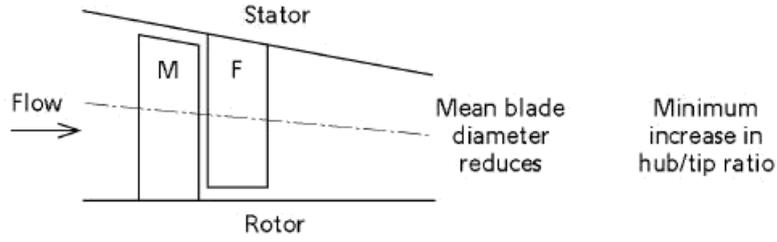
الشكل ( ٦١ ) المصطلحات المستخدمة في وصف تصميم ريشة الضاغط

إن القيمة العالية لنسبة الأبعاد تعني كفاءة أعلى للضاغط . ومع ذلك ، يتم ضبط وتثبيت ارتفاع الريشة من خلال التدفق الكتلي للهواء Mass flow of air في المرحلة التي يتم أخذها بنظر الإعتبار ، ويمكن إجراء التغييرات في نسبة الأبعاد فقط من خلال تغيير طول الوتر Chord length ، وبالتالي لزيادة نسبة الأبعاد ، يجب تقليل عرض الوتر Chord width . من عيوب تصميم الريش أنها أخف وأحف Thinner مما يؤدي إلى حدوث مشاكل إهتزاز الريشة .

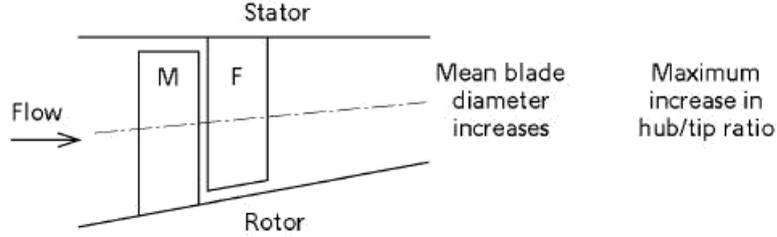
#### ٥- متوسط قطر الريشة Mean Blade Diameter :

عندما يمر الهواء على طول الضاغط ، ينخفض حجمه النوعي Specific volume ، وحيث أن سرعة التدفق المتوازية مع المحور الطولي Longitudinal axis تبقى ثابتة تقريبا (التوربين الغازي الأرضي له سرعة ثابتة (سرعة التزامن Synchronizing speed في كل فترات التحميل) ، فإنه يترتب على ذلك الحاجة إلى تقليل مساحة المقطع العرضي Cross-sectional area لتعويض النقص في حجم الهواء . وطرق تقليل المساحة هي تناقص تدريجي للقطر الداخلي Inside diameter للغلاف الخارجي Outer casing ، وكذلك زيادة القطر الخارجي للمحور الدوار مع الحفاظ على قطر داخلي ثابت للجزء الثابت Stator . إضافة إلى ذلك يمكن الجمع بين هاتين الطريقتين عن طريق زيادة قطر المحور الدوار وتقليل قطر الغلاف Casing diameter . لاحظ أن ضاغط التدفق المحوري مصمم ليكون له سرعة تدفق ثابتة إذا كانت سرعة محوره ثابتة من الملاحم No-load إلى التحميل الكامل Full load . ومع ذلك ، فإن هذه الحالة ليست كما هي في تكوين ( مولد الغاز Gas generator و توربين القدرة Power turbine ) .

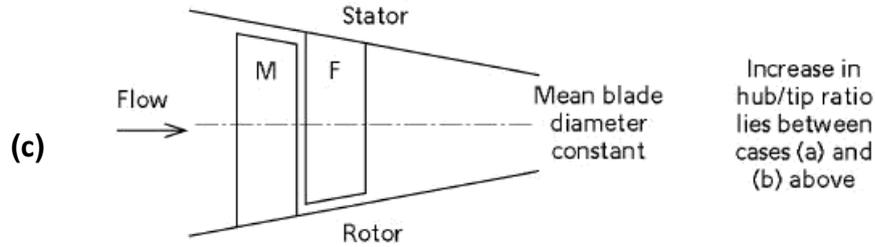
إن سرعة عمودي الضغط العالي والضغط المنخفض (HP & LP shafts) مستقلة ميكانيكيا ولكن يوجد إقتران ديناميكي هوائي Aerodynamic coupling قوي بينهما .



(a) Stator inside diameter reducing, rotor diameter constant



(b) Stator inside diameter constant, rotor diameter increasing



الشكل ( ٦٢ ) طرق تقليل مساحة المقطع العرضي للضاغط للتعويض عن النقص في الحجم النوعي للهواء مع زيادة الضغط على طول الضاغط

**تلميح :** الملاحظات أعلاه هي لتبسيط تصميم الضاغط . سيتم تحديد التصميم الرئيسي للضاغط من خلال الكثير من العوامل المعقدة Complex factors .

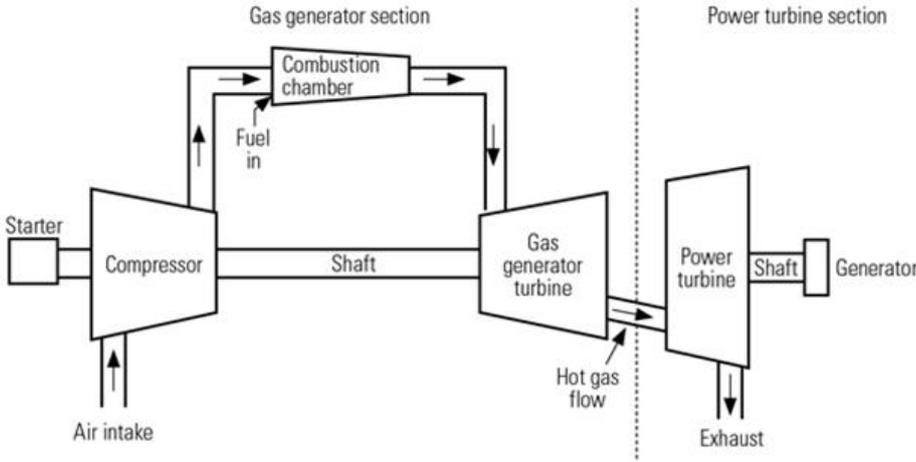
بالإشارة إلى الشكل (٦٢) الذي يوضح ثلاثة أنواع لتقليل مساحة المقطع العرضي للضاغط هي :  
 في (a) متوسط القطر يقل مع حركة الهواء خلال الضاغط ، في (b) يزداد متوسط القطر ، وفي (c) متوسط القطر يبقى ثابت . عموما ، تأثيرات متوسط قطر الريش هي :

(a) يمكن توليد نسب ضغط عالية جدا (b) محددة على نسب ضغط حوالي ١٤ (c) تقدم حلا مفيدا لأنها تستطيع التعامل مع نسب ضغط حتى حوالي ٢٤ .

ملاحظات توضيحية لبعض المصطلحات الواردة في الفقرة ( ٥ ) :

١- مولد الغاز Gas generator :

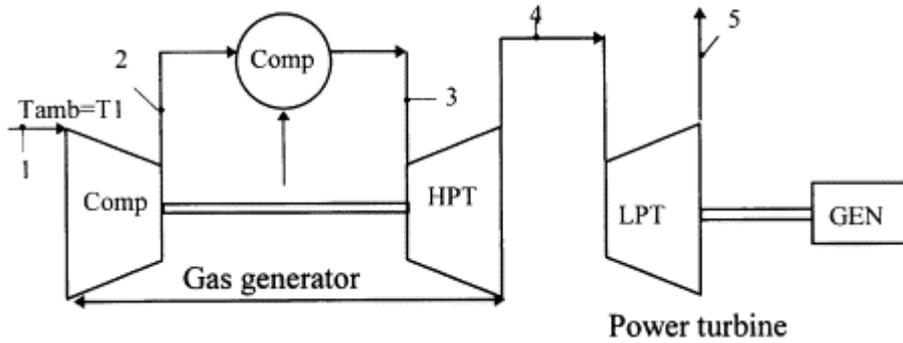
يحتوي كل محرك توربين غازي على قسم إحتراق وضاغط وتوربين . يسمى ( الضاغط ، والحارق ، والتوربين ) قلب أو لب المحرك Core of the engine ، ولأن جميع التوربينات الغازية تتكون من هذه المكونات Components ، فإن قلب المحرك التوربيني الغازي يشار إليه أيضا بأسم مولد الغاز Gas generator نظرا لأن مخرج القلب هو غاز العادم الساخن Hot exhaust gas الذي يحرك ويفقد توربين القدرة . الشكل ( ٦٣ ) .



الشكل (٦٣) توربين غازي منفصل العمود split shaft gas turbine

٢- عمودي الضغط العالي والضغط المنخفض (shafts HP & LP) :

تحتوي بعض التوربينات الغازية ذات التصميم GE على عدة أعمدة تدور بسرعات مستقلة . تختلف ضغوطات غازات الاحتراق الساخنة التي تتدفق من خلال أقسام التوربين (قسم HP وقسم LP). تشير HP و LP إلى أعمدة الضغط العالي و الضغط المنخفض High-Pressure and Low-Pressure shafts والسرعات . الضغوط هي ضغوط نسبية ، أحد التوربينين يعمل عند ضغط أعلى من الآخر الذي يسمى توربين الضغط المنخفض . عادة ما يرتبط عمود HP مباشرة بالضاغط المحوري (إقتران ميكانيكي Mechanically coupled) ، وعادة ما يكون عمود LP متصلا مباشرة بالحمل وهو عبارة عن ضاغط طرد مركزي ، أو مضخة ، أو مولد Centrifugal compressor, or a Pump ، or a Generator . يحتاج عمود HP ، الذي يحرك الضاغط المحوري ، إلى العمل في نطاق السرعة الذي تم تصميم الضاغط المحوري من أجل تشغيله . ويحتاج عمود LP ، الذي يقود الحمل ، إلى العمل بالسرعة التي يتطلبها الحمل . الشكل ( ٦٤ ) .

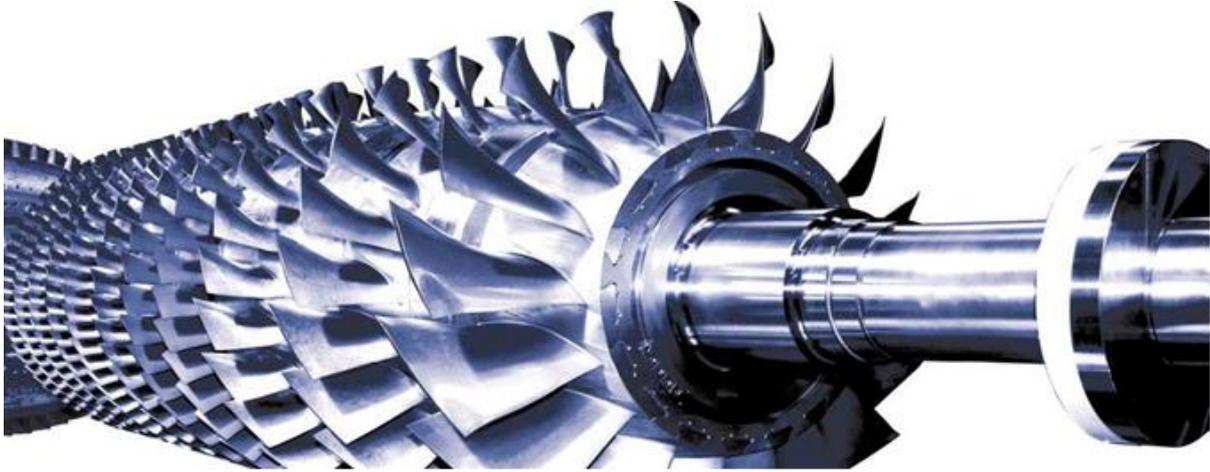


الشكل ( ٦٤ ) توربين غازي مزدوج العمود Dual shaft gas turbine

## ٦ - إتواء ريشة الضاغط Compressor blade twist

يجب أن تكون ريشة الضاغط ملتوية من أجل الحفاظ على نفس سرعة وإتجاه الريشة (سرعة الريشة هي الحد الأقصى عند الطرف أو الرأس Tip والحد الأدنى عند الجذر Root) ، ستكون السرعة المتجهة

Velocity vector مختلفة عند كل نصف قطر من الريش Radius of the blades وبالتالي فإن زوايا الريشة اللازمة لملاقاة تيار الهواء بشكل صحيح ستختلف عند كل نصف قطر من الريشة التي تمثل تصميمًا ضعيفًا للريشة ، لذلك يجب أن تكون ريش الضاغط ملتوية للحصول على الزاوية الصحيحة لكل نصف قطر الريشة . يمكن رؤية إلتواء الريشة بوضوح في الشكل ( ٦٥ ) .



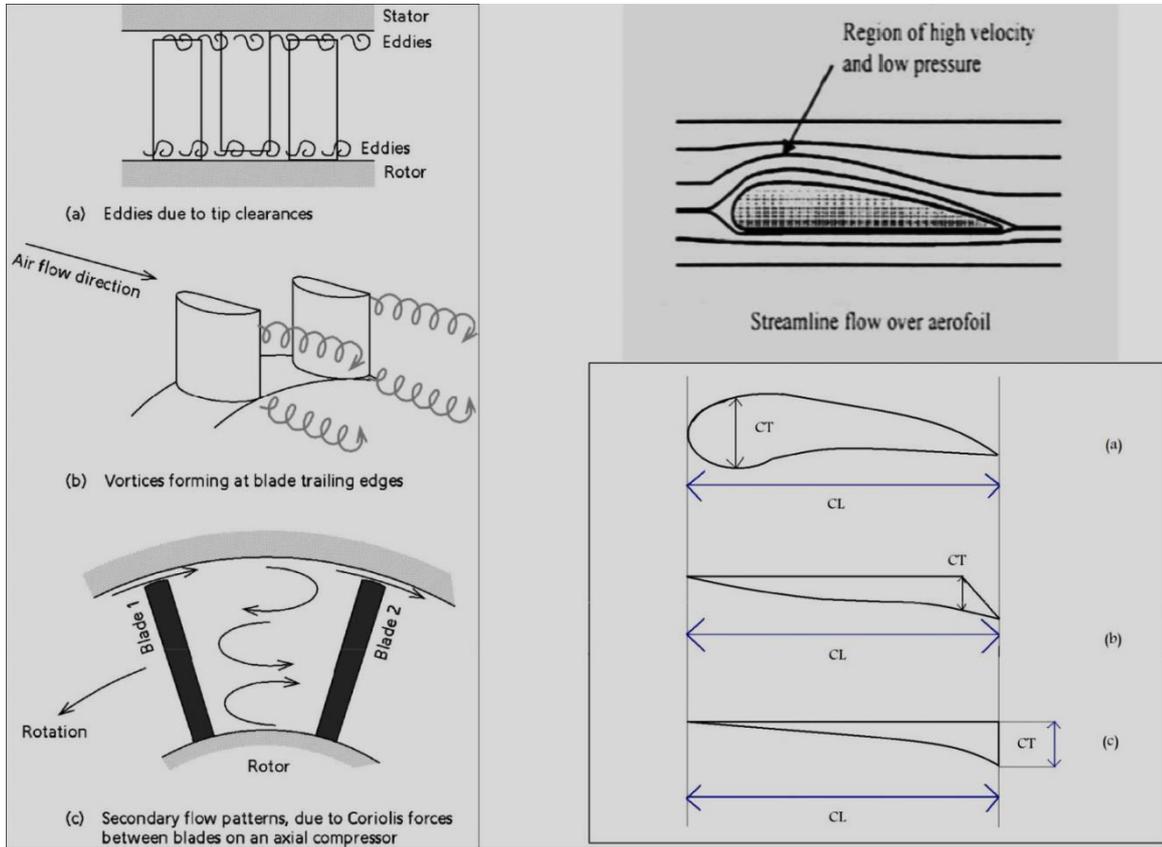
الشكل ( ٦٥ ) إلتواء ريشة الضاغط Compressor blade twist



لاحظ أن إلتواء ريشة الضاغط يقل كلما تحركنا على طول الضاغط لأنه في هذه المراحل يتناقص طول ريشة الضاغط لذلك يتم تقليل إلتواء الريشة . يتغير شكل مقطع ريشة الضاغط ( شكل السطح الإنسيابي للريشة Airfoil ) بالإعتماد على سرعة الهواء داخل الضاغط ، الشكل ( ٦٦ ) .

أنواع تأثيرات الهواء أثناء عملية الإنضغاط في الضاغط المحوري

The types of air effects during compression process in axial compressor



الشكل (٦٧) أنواع دوران الهواء Air circulation في الضاغط المحوري

الشكل ( ٦٦ )

الشكل ( ٦٦ ) تصميم شكل السطح الإنسيابي Airfoil لريشة الضاغط :

(a) - ريش دون سرعة الصوت Subsonic Blades ( $M < 0.7$  ,  $Z=45\%$ )

(b) - ريش ضمن سرعة الصوت Transonic Blades ( $1.3 > M > 0.7$  ,  $Z=65\%$ )

(c) - ريش فوق سرعة الصوت Supersonic Blades ( $M > 1$  ,  $Z=85\%$ )

حيث أن :  $M$  = رقم ماخ Mach number وهو رقم بدون وحدة ويمثل نسبة السرعة الموضعية Local flow velocity لمائع ما إلى سرعة الصوت Speed of sound في نفس ذلك المائع .

$Z$  = سمك الوتر Chord thickness \ طول الوتر Chord length

### تأثيرات تدفق الهواء على الضاغط المحوري Air flow effects on axial compressor

نحن نعتقد أن الهواء يمر بتدفق منتظم و مستقر Steady stream عبر الريش ، ولا ينحرف عن مساره ، وهذا غير صحيح . حتى بين جذر وطرف الريشة يمكن أن تحدث إختلافات كبيرة . أظهرت إحدى الإختبارات على ضاغط ذو أداء جيد باستخدام أجهزة قياس دقيقة خاصة Special instrumentation إختلافاً في درجة حرارة الهواء بين الجذر والطرف بمقدار ( ٥ درجة مئوية °C ) ، هذا التغير في درجة الحرارة يؤثر على خصائص الهواء Air properties .

يوضح الشكل (٦٧) بعض التدفقات التي يمكن أن تحدث بين اثنين من الريش .

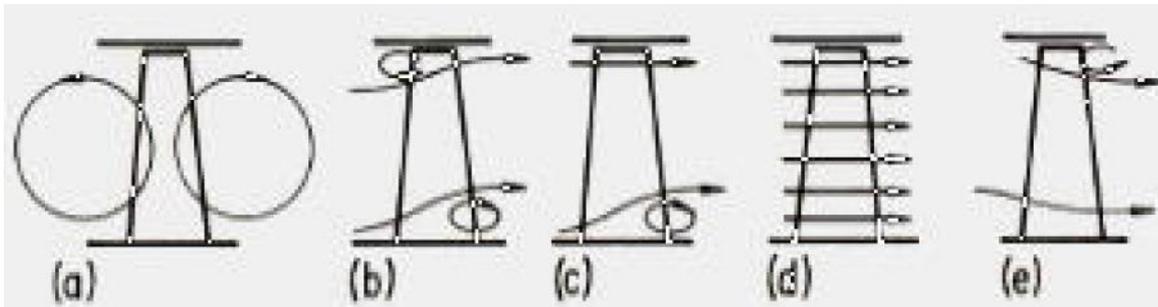
توضح النقطة (a) الدوامات الناتجة عن تسرب الهواء Air leaking بين ريش الثابت والمحور الدوار ، وتوضح النقطة (b) الدوامات الناتجة عن الحواف الخلفية للريش وهذه مماثلة في النوع للدوامات التي يمكن رؤيتها في بعض الأحيان على أطراف جناح الطائرة Wing tips of aircraft في الجو الرطب (الرطوبة العالية High humidity) . أما النقطة (c) فإنها توضح أنماط الدوران التي تنشأ بسبب تسارع كوريوليس Coriolis acceleration الذي يؤثر على تدفق الهواء .

( ينشأ تسارع كوريوليس عندما يتحرك الجسم نحو الخارج بشكل شعاعي أثناء الدوران المحيطي Rotating circumferentially ) .  
كل مكونات أو أنماط التدفق أعلاه تسبب خسائر تفلل من كفاءة الضاغط .

**ملاحظة توضيحية :** في الفيزياء ، يطلق اسم تأثير أو قوة كوريوليس Coriolis force على التشوه الظاهري في حركة الأجسام عندما ترصد أو ينظر إليها من إطار مرجعي دوراني ( متحرك حركة دائرية) وتشير إلى القوة المؤثرة على حركة الأجسام المتحركة . أطلق هذا الاسم على ذكر غاسبارد - غوستاف كوريوليس Gaspard-Gustave de Coriolis ، العالم الفرنسي الذي وصف هذا التشوه الظاهري في عام ١٨٣٥ . هي قوة وهمية لا وجود لها ومع ذلك لها تأثير حقيقي (مثلا قوة كوريوليس هي القوة المسؤولة عن تحريك العواصف حركة دائرية والكثير من التيارات البحرية ) .

### ظاهرة اضطراب الهواء في الضاغط المحوري Axial Compressor Surge اضطراب | توقف الضاغط Compressor Surge/Stall

اضطراب الهواء ظاهرة تحدث في ضاغط التدفق المحوري ، تحدث هذه الظاهرة عندما يعمل الضاغط بنسب ضغط ومعدل تدفق كتلي غير صحيحة (أي أنها غير متجانسة معا) والنتيجة هي عدم إستقرار تدفق الضاغط وتدفق عكسي للهواء Compressor flow instability & reversed air flow ، والذي سيُنتج إهتزازات عالية للریش ( خاصة ریش المراحل الأخيرة ) والتي قد تؤدي إلى فشل في الريشة .  
الشكل (٦٨) يُظهر عدم إستقرارية تدفق الضاغط .



الشكل ( ٦٨ ) عدم إستقرارية تدفق الضاغط

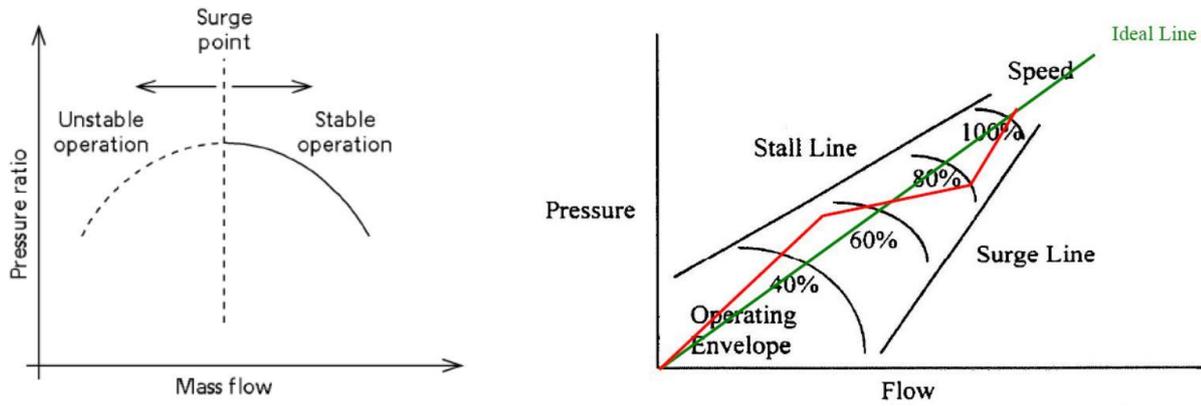
- (a) توقف كامل للتدفق Full stall .
- (b) توقف التدفق في الحافة الأمامية لطرف الريشة Leading edge tip stall
- (c) توقف التدفق في الحافة الخلفية لجذر الريشة Trailing edge root stall
- (d) تدفق كامل Full flow
- (e) توقف التدفق في الحافة الخلفية لطرف الريشة Trailing edge tip stall

تم تصميم الضاغط المحوري للتشغيل عند نقطة تصميم Design point تعمل عندها بكفاءة أكبر ، مع تدفق الهواء في كل مرحلة تقترب من الریش عند الزاوية الصحيحة في جميع أنحاء الضاغط ، وسرعة التدفق بالتوازي مع محور الضاغط ستكون ثابتة على طول الماكينة ، وعند أقصى قيمة .  
يجب أن يكون تشغيل الضاغط إلى حد كبير عند أو بالقرب من هذه النقطة (نقطة التصميم) . فعند سرعة محددة ، إذا تغير معدل التدفق الكتلي mass flow rate أو نسبة الإنضغاط Pressure ratio ، فسيحدث اضطراب Disturbed في توازن التدفق .

إذا زادت نسبة الضغط إلى أكثر من نقطة معينة ، فسوف تتناقص السرعة المحورية للهواء وسيحدث توقف مفاجيء للتدفق عند الریش blades stall لأن التدفق سيقترّب الآن من الریش بزاوية غير صحيحة . ومن

المحتمل أن يحدث تغير مفاجيء ( اضطراب ) Surge في الضاغط ، بتدفق يتراوح بين البناء والانهييار Building up and Breaking down ، مع إمكانية كاملة لتوصيل الهواء . يمكن إدراك وملاحظة هذه الحالة على الضاغط من خلال الضوضاء العالي High noise ، وفي الحالات السيئة ، من خلال الأضرار المادية Physical damage للماكينة . وبالمثل ، إذا أنخفضت نسبة الإنضغاط إلى حد بعيد ، فإن السرعة المحورية سوف تزداد وسوف يتوقف التدفق عند الريش مرة أخرى .

يشار إلى الحالة الأولى بوصفها أنها توقف مفاجيء ناتج عن صدمة إيجابية Positive shock stall والثانية توقف مفاجيء ناتج عن صدمة سلبية Negative shock stall . يجب تجنب التشغيل في ظل هذين الشرطين . إذا تم رسم نسبة الإنضغاط مقابل معدل التدفق الكتلي ، فسيتم الحصول على منحنى يسمى منحنى تشغيل الضاغط Compressor operating curve . أنظر إلى الشكل ( ٦٩ ) .



الشكل ( ٦٩ ) منحنى تشغيل الضاغط Compressor operating curve

الأسباب الرئيسية لظاهرة اضطراب الهواء في الضاغط المحوري

### Main reasons of compressor surge

يمكن ان تكون أسباب ظاهرة اضطراب تدفق الهواء في الضاغط المحوري :

- ١- إنخفاض السرعة الدورانية بينما الضاغط يعمل بتدفقه المقدر ( المصمم ) Rated flow .
- ٢- يتم إغلاق صمامات التنفيس Blow off valves في وقت مبكر (قبل الوصول إلى السرعة المقدر Rated speed) .
- ٣- إنسداد خطوط تفريغ أو تصريف الضاغط Compressor discharge lines التي تزيد فجأة من تفريغ الضاغط .
- ٤- إنخفاض مفاجيء في ضغط تفريغ الضاغط Compressor discharge pressure .

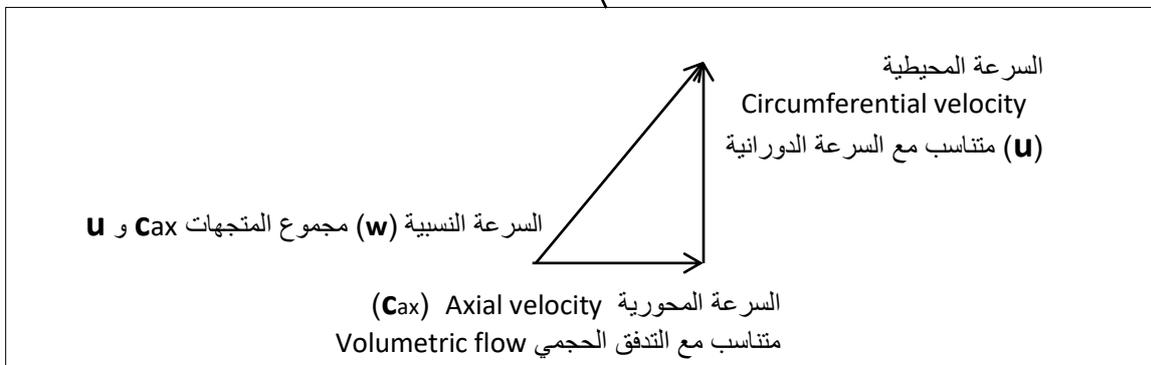
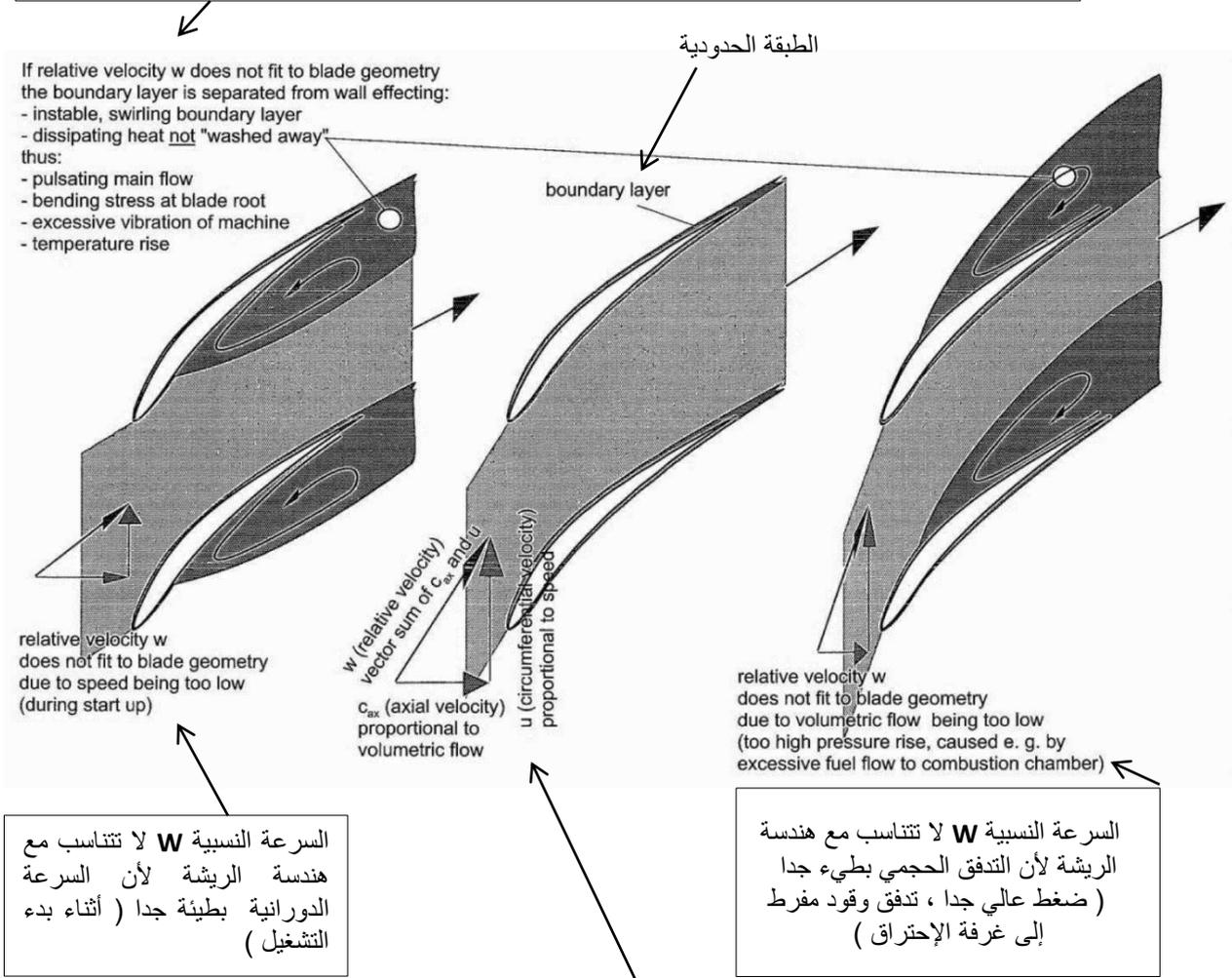
وبما انه يجب تجنب ظاهرة اضطراب الضاغط ، فإنه يجب تنصيب أجهزة حماية للضاغط من هذه الظاهرة Compressor surge protection .

إذا لم تتناسب السرعة النسبية **Relative velocity** مع هندسة الريشة **Blade geometry** ، فيتم فصل الطبقة الحدودية **Boundary layer** عن تأثير الجدار :

- غير مستقر ، طبقة حدودية إلتوائية ( دوامة ) **Unstable , swirling boundary layer**
- تبديد حرارة ليس ( بالماء ) **Dissipating heat not ( washed away )**

بالتالي :

- تذبذب التدفق الرئيسي **Pulsating main flow**
- إجهاد إنحناء في جذر الريشة **Bending stress at blade root**
- الإهتزاز المفرط للماكينة **Excessive vibration of machine**
- ارتفاع درجة الحرارة



الشكل ( ٧٠ ) إضطراب الضاغط **Compressor surge** هو نتيجة زاوية الإصطدام الزائدة **Excessive angle of attack**

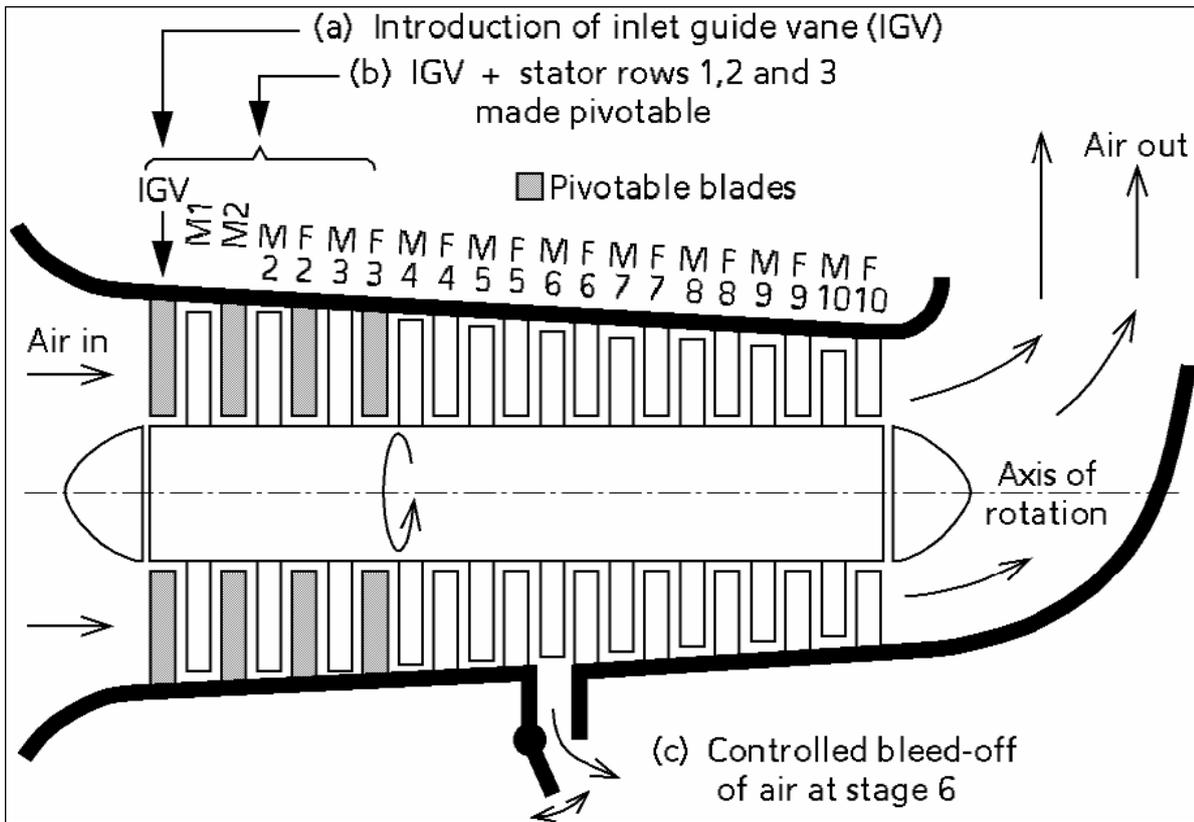
يمكن تجنب مشكلة إضطراب الهواء في الضاغط المحوري بإستخدام الطرق التالية :

(أ) تركيب ريشة توجيه مدخل متغيرة Variable inlet guide vane للتحكم في زاوية التدفق الوارد إلى الزاوية المطلوبة بحيث تتطابق مع زاوية الصف الأول من الريش المتحركة Moving blades .

(ب) جعل زاوية الصفوف القليلة الأولى من الريش الثابتة متغيرة ( ريش موازنة أو محورية Pivotal blades ) . بحيث يمكن التحكم في ذلك تلقائيا ، ويضمن مطابقة زاوية الريشة لزاوية التدفق حتى لا يحدث التوقف المفاجيء Stalling .

(ج) توفير نرف هواء من الضاغط خاضع للسيطرة Controlled air bleed off بحيث تستقبل المراحل بعد نقطة النرف كمية أقل من الهواء ، وتنخفض سرعته نسبيا .

في العديد من الحالات ، يتم إستخدام جميع الحلول الثلاثة المذكورة أعلاه معا .



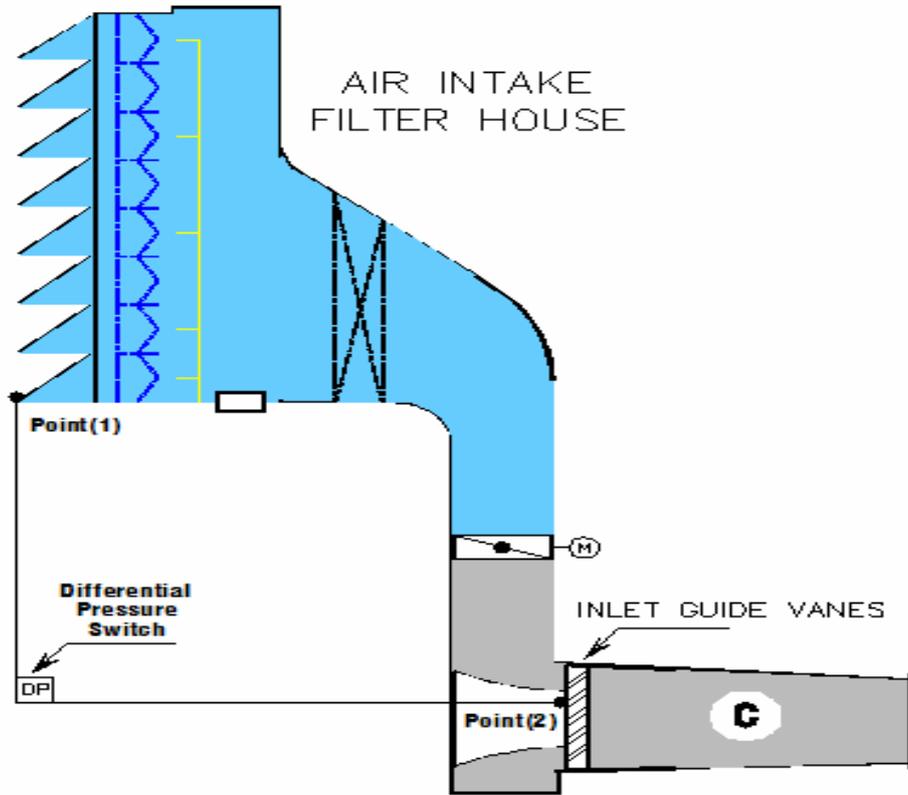
الشكل ( ٧١ ) طرق التحكم في ظاهرة إضطراب الضاغط المحوري Compressor surge

### الحماية من إضطراب الهواء في الضاغط المحوري Compressor Surge Protection

الحماية من ظاهرة إضطراب الضاغط توفر مراقبة ممتازة لظاهرة إضطراب الهواء في الضاغط المحوري ، هذه الحماية في حالة تفعيلها سوف تقوم بإيقاف التوربين الغازي لتجنب تضرر وتلف ريش الضاغط نتيجة تدفق الهواء العكسي بسبب الإضطراب Surging .

تتكون هذه الحماية من مؤشر ضغط تفاضلي Differential pressure indicator ومتحسسات ضغط Pressure sensors عدد ( ٢ ) ، يتم وضع إحدى هذه المتحسسات في مدخل بيت فلتر سحب الهواء Air intake filter house لقياس الضغط المحيط Ambient pressure (النقطة 1 point) .

ويتم وضع متحسس الضغط الآخر عند مدخل الضاغط قبل ريش توجيه المدخل (Inlet guide vanes) (النقطة point 2) كما في الشكل (٧٢) .



الشكل ( ٧٢ ) حماية إضطراب الضاغط Compressor Surge Protection

لاحظ أن الضغط الكلي Total pressure هو مجموع الضغط الإستاتيكي ( الساكن ) Static pressure والضغط الديناميكي ( الحركي ) Dynamic pressure ، والضغط الساكن هو نتيجة القوة المبذولة من قبل الهواء عندما تكون في حالة السكون والضغط الديناميكي هو نتيجة القوة التي تبذلها الهواء عند تحركها ( ضغط السرعة Velocity pressure ) :

الضغط الكلي (TP) = الضغط الإستاتيكي (ST) + الضغط الديناميكي (DP)

بالتالي فإن الضغط الكلي عند النقطة (١) :  $TP1 = ST1 + DP1$

لاحظ أن : الضغط الساكن على النقطة (١) هو الضغط المحيط .

يكون الضغط الديناميكي على النقطة (١) تقريبا مساوي للصفر لأن سرعة الهواء بطيئة جدا .

والضغط الكلي عند النقطة (٢) :  $TP2 = ST2 + DP2$

لاحظ أن : الضغط الساكن على النقطة (٢) أقل من الضغط الساكن على النقطة (١) بسبب الفراغ Vacuum

الناتج عن طريق سحب الضاغط Compressor suction .

ويكون الضغط الديناميكي على النقطة (٢) أعلى بكثير من الضغط الديناميكي على النقطة (١) نظرا لإرتفاع

سرعة الهواء بسبب سحب الضاغط .

الآن لتوضيح ما ورد أعلاه :

يجب أن يكون الضغط الساكن عند النقطة (١) في حالة التشغيل العادية أكبر من الضغط الساكن عند النقطة (٢) ، لذلك يتم ضبط حماية إضطراب الضاغط Compressor surge protection بحيث :

يجب أن يكون على الأقل الضغط التفاضلي الساكن  $(\Delta Ps) = SP1 - SP2$  (Differential Static Pressure) أعلى من (٤٠ ملي بار mbar) . أي أن الضغط الساكن عند النقطة (١) يجب أن يكون على الأقل أكثر من الضغط الساكن عند النقطة (٢) بـ (٤٠ mbar) .

لاحظ أنه إذا كانت  $(\Delta Ps)$  أقل من (٤٠ mbar) فهذا يعني أن الضغط الساكن عند النقطة (٢) يقترب من الضغط الساكن عند النقطة (١) مما يعني أن الضاغط لم يعد يمتص أو يسحب الهواء حتى إذا كان يعمل عند سرعته وتدفقه المقدرتين Rated speed & flow (أي حدوث ظاهرة التغير المفاجيء أو الإضطراب للهواء في الضاغط) .

عادة ما تكون لأجهزة تحسس الضغط التفاضلي لإضطراب الضاغط ثلاث قنوات لتوفير التكرار أو التأكيد ، فإذا كانت اثنتان من هذه القنوات عبارة عن إشارة خارجية تشير إلى  $(\Delta Ps < 40 \text{ mbar})$  ، عندئذ ستبدأ عملية إيقاف التوربين الغازي Gas turbine trip عن طريق وحدة تحكم التوربين الغازي .

إذا لم يتم تنشيط حماية إضطراب الضاغط لأي سبب كان أثناء تحضيرات بدء التشغيل ، فإنه يتم حظر بدء تشغيل التوربين الغازي .

تكون حماية إضطراب الضاغط فعالة فقط عندما تكون السرعة (٤٢ هرتز Hz ، ٢٥٢٠ دورة \ دقيقة rpm) وما فوقها .

إذا انخفضت سرعة التوربين الغازي أثناء التشغيل العادي ، فسيحدث ما يلي :

أ - عند سرعة التوربين (٤٧,٥ هرتز ، ٢٨٥٠ دورة \ دقيقة) ، ستغلق ريش التوجيه المتغيرة لمدخل الضاغط Compressor variable inlet guide vanes (I.G.V) بنسبة (٧٥٪) وذلك لتقليل تدفق الضاغط وبالتالي تجنب إضطراب الهواء في الضاغط بسبب انخفاض السرعة .

ب - عند سرعة التوربين (٤٧ هرتز ، ٢٨٢٠ دورة \ دقيقة) ، سيتوقف التوربين الغازي تحت حماية التردد Frequency protection .

## ملاحظات توضيحية :

١- الإضطراب أو التغير المفاجيء Surge هو إنهيار كامل للتدفق الثابت أو المنتظم للهواء Steady flow عبر الضاغط . يتم تعريفه على أنه الحد الأدنى من التشغيل المستقر Stable operation للضاغط . حيث يقل معدل التدفق الكتلي للهواء Mass flow rate وتزداد السرعة الدوارنية للضاغط . وبالتالي يتعرض محامل الضاغط والمحرك إلى أجهادات ضغط وقد يؤدي إلى تلفه .

٢- التوقف Stalling : في التوقف ينعكس اتجاه التدفق على طول الجدار وينحرف خطوط الجريان الإنسيابية Streamlines القريبة من السطح بسبب التأثيرات القوية جدا لإجهاد القص اللزج Viscous shear وتدرج الضغط السلبي أو العكسي Adverse pressure gradient . عندئذ تتم إعادة توجيه التدفق ، كما تكثر إجهادات القص للزجة الكبيرة ، على الأقل موضعيا . وربما ينتج عن ذلك ضوضاء Noise .

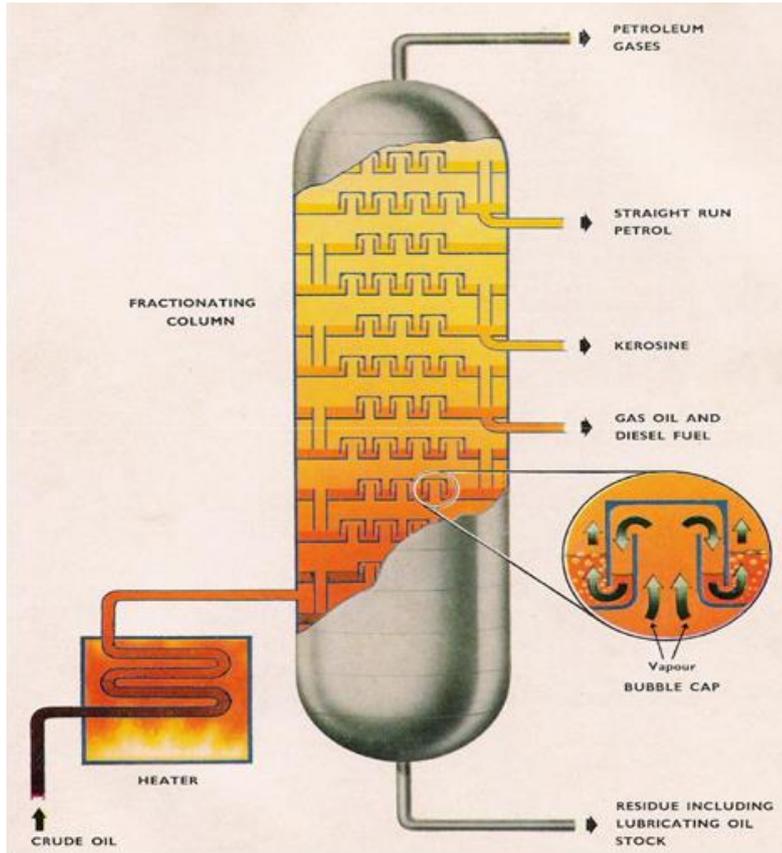
من الممكن أن تتوقف بضعة عناصر من مرحلة الضاغط دون توقف كامل المرحلة أو تحدث أحداث مشابهة. عندما يحدث توقف قوي جدا لمرحلة إما في أحد عناصره ، أو أن مجموعة من العناصر مجتمعة تتوقف بشكل جماعي فإن نسبة الإنضغاط الكلية مقابل خاصية التدفق Overall pressure ratio vs. Flow

characteristic لم تعد مستقرة (منحدر سلبي Negatively sloped) ، ثم تدخل المرحلة في مرحلة التوقف

## غرف الإحتراق في التوربين الغازي Gas Turbine Combustion Chamber

### مبادئ الإحتراق Principals of combustion

- ١- الوقود Fuel : أي مادة يمكن حرقها ( مؤكسدة Oxidized ) لتحرير طاقة Energy تسمى وقود . معظم أنواع الوقود الشائعة تتكون من المواد الهيدروكربونية Hydrocarbon . توجد الهيدروكربونات في كل الأطوار أو الحالات Phases (الصلبة ، السائلة ، الغازية Solid, Liquid, Gaseous ) مثل الفحم Coal ، والبنزين Benzene أو الكازولين Gasoline ، والغاز الطبيعي Natural gas . معظم أنواع الوقود تتكون من خليط من المركبات الهيدروكربونية وتتواجد كعقد Nodes هيدروكربونية معقدة ومتشابكة ، وللبساطة يتم معاملة معظم أنواع الوقود الشائعة كهيدروكربون أحادي ، على سبيل المثال :
- أ - يُعامل البنزين أو الكازولين كأوكتان (C8 H18) Octane .
- ب - يتم التعامل مع زيت الغاز Gas oil (ديزل Diesel) مثل دوديكان (C12 H26) Dodecane وهي مادة زيتية سميكة من سلسلة البرافينات Paraffin ويستخدم كمذيب .
- ج - الكيروسين Kerosene ( النفط الأبيض أو زيت البرافين ) يُعامل على أنه (C12 H24) .
- د - الغاز الطبيعي (خليط من ٩٠٪ ميثان (CH4) Methane و ١٠٪ إيثان (C2 H6) Ethane ) يُعامل على أنه ميثان (CH4) .

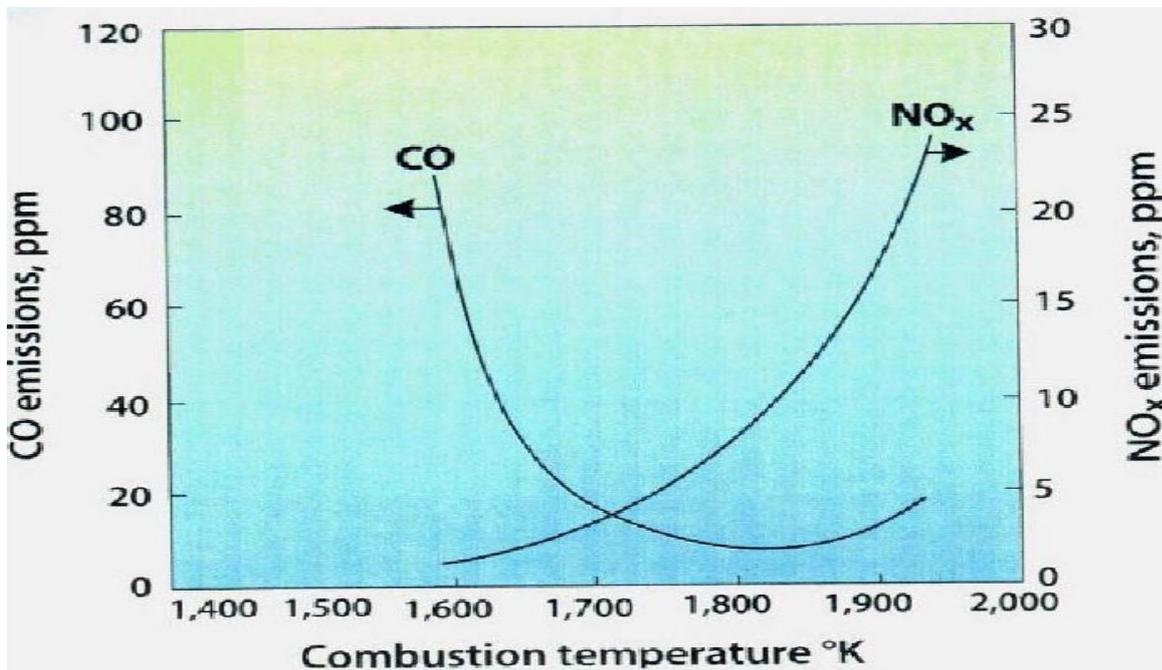


الشكل ( ٧٣ ) برج التقطير المبسط Simplified distillate tower

- ٢- المؤكسد Oxidizer : أي مادة غنية بالأوكسجين Oxygen المؤكسد ، أكثر المؤكسدات الشائعة المستخدمة في عمليات الإحتراق هو الهواء لأنه مؤكسد مجاني ويوجد في أي مكان ، ومع ذلك يستخدم الأوكسجين النقي Pure Oxygen في تطبيقات خاصة مثل القطع واللحام Cutting & welding لعدم إمكانية إستخدام الهواء .
- ٣ - الإحتراق Combustion : تفاعل كيميائي يتم فيه تأكسد الوقود وإطلاق أو تحرير كمية كبيرة من الطاقة .
- ٤ - متفاعلات الإحتراق Combustion reactants : مكونات Components موجودة قبل الإحتراق (المواد الكيميائية الحاضرة في بداية التفاعل الكيميائي) .
- ٥ - منتجات الإحتراق Combustion products : مكونات موجودة بعد الإحتراق ، أي وقود هيدروكربوني Hydrocarbon fuel عند احتراقه كاملا ، سينتج غاز ثاني أوكسيد الكربون وبخار الماء والنيتروجين Carbon dioxide, water vapor & Nitrogen .

لاحظ أن النيتروجين هو بشكل عام غاز خامل Inert gas فهو يدخل ويخرج من التفاعل بدون تفاعله مع عناصر كيميائية أخرى Chemical elements . ومع زيادة درجة حرارة الإحتراق إلى أكثر من ( ١٣٠٠ درجة مئوية °C ) كما في محركات الإحتراق الداخلي Internal combustion engines ، يبدأ النيتروجين بالتفاعل مع العناصر الأخرى ، وأخطر المنتجات من تفاعلات النيتروجين هو عندما يتفاعل مع الأوكسجين لتشكيل أوكسيد النيتريك (NO) Nitric oxide وثنائي أوكسيد النيتروجين (NO<sub>2</sub>) Nitrogen dioxide .

نلاحظ أيضا أن النيتروجين يمثل ( ٧٨ ٪ ) من الهواء المستخدم للإحتراق ، لذا فهو يدخل غرفة الإحتراق بكميات كبيرة وعند درجة حرارة منخفضة ويخرج عند درجة حرارة أعلى وبالتالي فإنه يمتص جزءا كبيرا من الطاقة الكيميائية Chemical energy المتحررة خلال الإحتراق .



الشكل ( ٧٤ ) درجة حرارة الإحتراق مقابل إنبعاثات أكاسيد النيتروجين وأول أكسيد الكربون  
Combustion temperature vs. NO<sub>x</sub> & CO emission

- ٦- NOx : رمز يمثل خليط أكاسيد النيتروجين Nitrogen oxides (NO & NO<sub>2</sub>) .
- ٧- SOx : رمز يمثل خليط أكاسيد الكبريت Sulfur oxides (SO<sub>2</sub> & SO<sub>3</sub>) .
- ٨ - تركيب الهواء الجاف Dry air composition : الهواء الجاف (على أساس الحجم) يتكون من (٢٠,٩ ٪ أوكسجين ، ٧٨,١ ٪ نيتروجين ، ٠,٩ ٪ أرجون Argon و ٠,١ ٪ تمثل كمية صغيرة من ثاني أوكسيد الكربون والهليوم Helium والنيون Neon والهيدروجين Hydrogen ) .
- ٩ - الهواء النظري Theoretical air : الحد الأدنى من كمية الهواء اللازمة للإحتراق الكامل .
- ١٠ - الهواء الزائد Excess air : كمية الهواء الإضافية Extra air التي تضاف إلى عملية الإحتراق لضمان الإحتراق الكامل أو لتبريد غرفة الإحتراق .
- ١١ - الإحتراق الكامل Complete Combustion : هو عملية إحتراق يتم فيها حرق كل الكربون Carbon الموجود في الوقود (تأكسد) إلى ثاني أوكسيد الكربون (CO<sub>2</sub>) ويتم حرق جميع الهيدروجين في الوقود (تأكسد) إلى الماء (H<sub>2</sub>O) وكل الكبريت Sulfur في الوقود (إن وجد) يتم حرقه (تأكسد) إلى ثاني أوكسيد الكبريت Sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) في المنتجات (نواتج الإحتراق Combustion products) .
- ١٢ - الإحتراق غير الكامل Incomplete Combustion : هو عبارة عن عملية إحتراق تحتوي منتجاتها على وقود أو مكون غير محترق Unburned fuel or component مثل الكربون (C) أو الهيدروجين (H<sub>2</sub>) أو أول أكسيد الكربون Carbon Monoxide (CO) أو هيدروكسيد Hydroxide (OH) .

هناك أسباب كثيرة مسؤولة عن الإحتراق غير الكامل ، ومن الأسباب الرئيسية ما يلي :

- أ - كمية الهواء المتاحة Available air لا تكفي للإحتراق الكامل (الأوكسجين غير كافي) .
- ب - عدم كفاية الخلط أو الإمتزاج في محارق غرفة الإحتراق Combustion chamber burners خلال الوقت المحدد الذي يكون فيه الوقود والأوكسجين في تماس (حتى إذا كان الإحتراق يحدث مع الهواء الزائد) .
- ج - التفكك Dissociation والتي يصبح مهم في درجات الحرارة العالية . ففي درجات الحرارة العالية ، تتحلل أو تتفكك نواتج الإحتراق الرئيسية إلى أنواع أخرى . على سبيل المثال ، الإحتراق الكامل للهيدروكربونات مع الهواء يعطي CO<sub>2</sub> ، H<sub>2</sub>O ، N<sub>2</sub> (كمنتجات ، ولكن تفكك هذه المنتجات والتفاعلات بين الأنواع الناتجة عن التفكك قد يؤدي إلى إنتاج العديد من الأنواع الأخرى ، على سبيل المثال O ، H ، OH ، N ، NO ، وأخرى .
- ينجذب ( يتفاعل ) الأوكسجين إلى الهيدروجين بقوة أكثر من الكربون . لذلك فإن الهيدروجين الموجود في الوقود يتم حرقه عادة بشكل كامل ومع ذلك يتم تكوين H<sub>2</sub>O حتى عندما يكون مقدار الأوكسجين أقل مما هو مطلوب لعملية الإحتراق الكامل . بعض من الكربون ينتهي كأول أوكسيد الكربون أو مجرد جسيمات كربونية في المنتجات .

### ١٣ - درجة حرارة نقطة الوميض Flash Point Temperature :

نقطة الوميض لسائل قابل للإشتعال Flammable liquid هي أدنى درجة حرارة يمكن عندها أن تشكل مع الأوكسجين خليط قابل للإشتعال Ignitable mixture . عند درجة الحرارة هذه ، قد يستمر إحتراق البخار عند إزالة مصدر الإشتعال . نقطة الإحتراق أو الأشتعال Fire point أعلى قليلاً من درجة حرارة نقطة الوميض .

يتم إستخدام نقطة الوميض لوصف خصائص الوقود السائل liquid fuel ، ولكنها تستخدم أيضاً لوصف السوائل التي لا تستخدم كوقود (مثل زيوت التشحيم والعزل Lubrication & insulation oils) .

البنزين يُستخدم في محركات الإشتعال الشراري Spark ignition engines . يجب أن يتم خلط الوقود مسبقاً مع الهواء ضمن حدوده القابلة للإشتعال Flammable limits ويتم تسخينه فوق نقطة الوميض الخاصة به ، ثم

تشتعل بواسطة شمعة الإشعال أو القدح Spark plug . ولا يجب إشعال الوقود مسبقا في المحرك الساخن . لذلك ، فإن البنزين يجب أن يكون له نقطة وميض منخفضة ودرجة حرارة إشعال ذاتي عالية High auto-ignition temperature .

الديزل مصمم للإستخدام في محركات الإشعال بالضغط Compression ignition engines . يتم ضغط الهواء إلى أن يتم تسخينه فوق درجة حرارة الإشعال الذاتي للديزل ، ثم يتم حقن الوقود كذاذ عالي الضغط High-pressure spray ، مما يحافظ على خليط الوقود والهواء داخل حدود الديزل القابلة للإشتعال . لا يوجد هنالك مصدر إشعال . لذلك ، يجب أن يكون لوقود الديزل نقطة وميض عالية ودرجة حرارة إشعال ذاتي منخفضة .

Fuel	Flash Point (°C)
بنزين (Benzene) Gasoline	> -45 °C
ديزل Diesel	> 62 °C
وقود الطائرات Jet fuel	> 38 °C

جدول يبين درجة حرارة نقطة الوميض لأنواع الوقود الشائعة  
Flash Point Temperature for common fuels

#### ١٤ - درجة حرارة نقطة الإحتراق Fire Point Temperature :

نقطة الإحتراق للوقود هي درجة الحرارة التي يستمر فيها الوقود بالإحتراق بعد إشعاله لمدة لا تقل عن (٥ ثوان) . فعند نقطة الوميض ، ودرجة الحرارة المنخفضة ، سوف تشتعل المادة ، ولكن قد لا يتم إنتاج البخار بمعدل لإبقاء أو إستمرار الإحتراق . دائما تكون درجة حرارة الإشتعال الذاتي أعلى من نقطة الوميض .

#### ١٥ - درجة حرارة الإشتعال الذاتي Auto-ignition temperature :

هي درجة الحرارة الدنيا التي يشتعل فيها الوقود في الجو العادي ، دون وجود مصدر خارجي للإشعال ، مثل لهب ( شعلة ) Flame أو شرارة Spark إذا تم مزجه مع الأوكسجين ، لاحظ أنه من أجل إشعال الوقود ، يجب أن يتعرض إلى درجة حرارة أعلى من درجة حرارة إشتعاله ، لاحظ أيضا أنه لإشعال الوقود ، فعلينا إما إدخال شرارة أو لهب ، أو نضغط خليط من الهواء والوقود إلى ضغط عالي جدا إلى أن تصبح درجة حرارة الخليط أعلى من درجة حرارة إشتعال الوقود . يبين الجدول أدناه درجات حرارة الإشتعال الدنيا لبعض أنواع معروفة من الوقود عند ضغط الهواء الجوي :

Fuel	Ignition Temperature °C
Gasoline	260 °C
Carbon	400 °C
Hydrogen	580 °C
Carbon monoxide (CO)	610 °C
Methane (CH <sub>4</sub> )	630 °C
Sulfur	243°C
Acetylene (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	482°C
Ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	538°C
Diesel	210 °C
Jet Fuel	210 °C

جدول يبين درجة حرارة الإشتعال لأنواع الوقود الشائعة  
Ignition temperature for common fuels

**ملاحظة :** لبدء عملية الإحتراق ، ليس فقط علينا أن نحدث شرارة أو لهب في خليط الوقود والهواء ، بل يجب أن تكون النسبة المئوية للوقود في الهواء ضمن نطاق الإحتراق المناسب Proper range of combustion ، على سبيل المثال ، الغاز الطبيعي سيحترق فقط إذا كانت نسبة الغاز في الهواء ما بين ( ٥ ٪ إلى ١٥ ٪ من حيث الحجم) ، وللهدروجين النسبة ( ٤ ٪ إلى ٧٦ ٪ من حيث الحجم) .

١٦ - درجة حرارة اللهب الأديباتية ( ثابتة الحرارة ) Adiabatic flame temperature :

هي درجة الحرارة القصوى التي يمكن تحقيقها في عملية الإحتراق إذا افترضنا أنه لا توجد خسائر في الحرارة Heat losses من غرفة الإحتراق Combustor إلى المحيط Surrounding . يوضح الجدول أدناه درجات حرارة اللهب لبعض أنواع الوقود الشائعة .

Fuel	Flame Temperature °C*
Propane in air	1980 °C
Butane in air	1970 °C
Natural Gas in air	1950 °C
Acetylene in air	2500 °C
Acetylene in Oxygen	3100 °C
Methane in air	1950°C

\* على افتراض الظروف الجوية الأولية Initial atmospheric conditions (١ بار و ٢٠ درجة مئوية °C)

تتأثر درجة حرارة اللهب الأديباتية بالنسبة المئوية للهواء المستخدم في عملية الإحتراق ، على سبيل المثال إذا تم حرق البنزين (Octane - C8 H18) مع :

أ - الكمية النظرية من الهواء Theoretical amount of air ، تكون درجة حرارة اللهب الأديباتية الناتجة ( ٢١٢٢ درجة مئوية ) .

ب - ( ٤٠٠ ٪ ) كمية زائدة Excess amount من كمية الهواء ، تكون درجة حرارة اللهب الأديباتية الناتجة ( ٦٨٩ درجة مئوية ) .

ج - فقط ( ٩٠ ٪ ) من الهواء النظري أو ( ١٠ ٪ عجز أو نقص في الهواء Deficiency air ) ، تكون درجة حرارة اللهب الأديباتية الناتجة ( ١٩٣٦ درجة مئوية ) .

**ملاحظات توضيحية :**

- درجة حرارة اللهب الأديباتية دائما تكون أقصى ما يمكن عندما يتم حرق الوقود بكمية نظرية من الهواء

- في الحالة (ب) درجة حرارة اللهب الأديباتية منخفضة للغاية بسبب الهواء الزائد Excess air المستخدم والذي هو أربعة أضعاف كمية الهواء اللازمة للإحتراق الكامل .

يوضح الجدول التالي بعض درجات حرارة اللهب لبعض أنواع الوقود الشائعة (على أساس الحجم الثابت Constant volume basis) وأيضا مقارنة بين إستخدام الهواء أو الأوكسجين كمؤكسد للإحتراق :

Fuel	Oxidizer	Adiabatic flame temperature(°C)
Acetylene (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	air	2,500
Acetylene (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	Oxygen	3,100
Butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	air	1,970
Butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	Oxygen	2,718
Methane (CH <sub>4</sub> )	air	1,950
Natural gas	air	~1,950
Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	air	1,980
Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	Oxygen	2,526

١٧ - القيمة الحرارية للوقود Heating Value of the Fuel :  
الكمية الإجمالية للحرارة المتحررة عند إحتراق الوقود بشكل كامل ويتم إرجاع منتجات (نواتج) الإحتراق إلى درجة حرارتها قبل أن يتم حرقها .

١٨ - القيمة الحرارية العليا للوقود Higher Heating Value of the Fuel (HHV) :  
الكمية الإجمالية للحرارة المتحررة عند إحتراق الوقود بشكل كامل ويكون الماء في المنتج بهيئة سائل Liquid .

١٩ - القيمة الحرارية الدنيا للوقود Lower Heating Value of the Fuel (LHV) :  
الكمية الإجمالية للحرارة المتحررة عند إحتراق الوقود بشكل كامل ويكون الماء في المنتج بهيئة بخار Vapor .  
معظم تحاليل محطات الطاقة Power plants analysis تعتمد على LHV وليس HHV .

إن العلاقة بين HHV و LHV هي :  $HHV = LHV + m * h_{fg}$

m = كتلة الماء من منتجات الإحتراق (كغ Kg) .

Latent heat of vaporization of the water = الحرارة الكامنة لتبخير الماء (كيلوجول/كجم) =  $h_{fg}$  عند درجة حرارة المنتجات (نواتج الإحتراق) .

Fuel	Energy content kJ/L	Gasoline equivalence,* L/L-gasoline
Gasoline	31,850	1
Light diesel	33,170	0.96
Heavy diesel	35,800	0.89
LPG (Liquefied petroleum gas, primarily propane)	23,410	1.36
Ethanol (or ethyl alcohol)	29,420	1.08
Methanol (or methyl alcohol)	18,210	1.75
CNG (Compressed natural gas, primarily methane, at 200 atm)	8,080	3.94
LNG (Liquefied natural gas, primarily methane)	20,490	1.55

\* Amount of fuel whose energy content is equal to the energy content of 1-L gasoline.

جدول يبين القيم الحرارية للوقود مقارنة بالبنزين ( الكازولين )  
Table(3) Calorific vales for fuels compared to gasoline

Element	Chemical Symbol	Atomic Weight
Carbon	C	12
Hydrogen	H	1
Nitrogen	N	14
Oxygen	O	16
Sulphur	S	32

جدول يبين الوزن الذري Atomic weight لبعض المواد ( العناصر )

Fuel (phase)	Formula	Molar mass, kg/kmol	Density <sup>1</sup> , kg/L	Enthalpy of vaporization <sup>2</sup> , kJ/kg	Specific heat <sup>1</sup> , $C_p$ , kJ/kg · C	Higher heating value <sup>3</sup> , kJ/kg	Lower heating value <sup>3</sup> , kJ/kg
Carbon (s)	C	12.011	2	—	0.708	32,800	32,800
Hydrogen (g)	H <sub>2</sub>	2.016	—	—	14.4	141,800	120,000
Carbon monoxide (g)	CO	28.013	—	—	1.05	10,100	10,100
Methane (g)	CH <sub>4</sub>	16.043	—	509	2.20	55,530	50,050
Methanol (ℓ)	CH <sub>4</sub> O	32.042	0.790	1168	2.53	22,660	19,920
Acetylene (g)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.038	—	—	1.69	49,970	48,280
Ethane (g)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	—	172	1.75	51,900	47,520
Ethanol (ℓ)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	46.069	0.790	919	2.44	29,670	26,810
Propane (ℓ)	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	0.500	420	2.77	50,330	46,340
Butane (ℓ)	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.123	0.579	362	2.42	49,150	45,370
1-Pentene (ℓ)	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.134	0.641	363	2.20	47,760	44,630
Isopentane (ℓ)	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.150	0.626	—	2.32	48,570	44,910
Benzene (ℓ)	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.114	0.877	433	1.72	41,800	40,100
Hexene (ℓ)	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.161	0.673	392	1.84	47,500	44,400
Hexane (ℓ)	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	0.660	366	2.27	48,310	44,740
Toluene (ℓ)	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92.141	0.867	412	1.71	42,400	40,500
Heptane (ℓ)	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	0.684	365	2.24	48,100	44,600
Octane (ℓ)	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.231	0.703	363	2.23	47,890	44,430
Decane (ℓ)	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.285	0.730	361	2.21	47,640	44,240
Gasoline (ℓ)	C <sub>n</sub> H <sub>1.87n</sub>	100–110	0.72–0.78	350	2.4	47,300	44,000
Light diesel (ℓ)	C <sub>n</sub> H <sub>1.8n</sub>	170	0.78–0.84	270	2.2	46,100	43,200
Heavy diesel (ℓ)	C <sub>n</sub> H <sub>1.7n</sub>	200	0.82–0.88	230	1.9	45,500	42,800
Natural gas (g)	C <sub>n</sub> H <sub>3.8n</sub> N <sub>0.1n</sub>	18	—	—	2	50,000	45,000

<sup>1</sup>At 1 atm and 20°C.

<sup>2</sup>At 25°C for liquid fuels, and 1 atm and normal boiling temperature for gaseous fuels.

<sup>3</sup>At 25°C. Multiply by molar mass to obtain heating values in kJ/kmol.

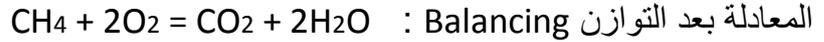
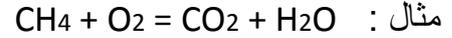
### جدول يبين القيم الحرارية Calorific vales لأنواع الوقود الشائعة

	Coal*	Oil	Gas
Carbon	77.0	85.1	74.0
Hydrogen	5.5	10.9	24.0
Gross calorific value (kJ/kg)	25 586	42 333	53 498
Weight of water vapour in combustion products (kg/kg of fuel)	0.59	0.98	2.17
Weight of wet combustion products (kg/kg of fuel)	9.55	14.60	17.24

### جدول يبين تركيب أنواع الوقود الشائعة

٢٠ - نسبة الهواء \ الوقود Air/ Fuel Ratio :

هي نسبة كتلة الهواء إلى كتلة الوقود لعملية الإحتراق . يتم إستخدامها لتحديد مقدار كمية الهواء ( كغم ) اللازم لحرق ( ١ كغم ) من الوقود المختار . تقلل نسبة (الهواء \ الوقود ) العالية من درجة حرارة اللهب (زيادة خسائر غازات العادم Flue gas losses) والعكس صحيح . لذا يجب أن يتم الإختيار الدقيق لهذه النسبة لغرض التغلب على عملية الإحتراق غير الكامل .



الإحتراق المتكافىء ( كميات بنسب متكافئة ) Stoichiometric combustion يعني :

( ١ كيلو مول Kilo mole ) من الميثان  $CH_4$  عند إتحاده تماما مع ( ٢ كيلو مول ) من الأوكسجين  $O_2$  سينتج ( ١ كيلو مول Kilo mole ) من ثاني أوكسيد الكربون  $CO_2$  + ( ٢ كيلو مول ) من الماء  $H_2O$  .

$$N=m/M$$

حيث أن :

$N =$  عدد الكيلو مولات ( Kilo moles ) (Kmol) .

$m =$  الكتلة ( كغم ) ( Kg ) .

$M =$  الكتلة الجزيئية Molecular mass ( كغم/كيلومول Kg / Kmol ) .

أ - كتلة (  $CH_4$  )  $= M * N = [ ( ١٢ ) + ( ١ * ٤ ) ] * ١ = ١٦$  كغم  $CH_4$

١ كيلومول (  $CH_4$  ) = ١٦ كغم من  $CH_4$

ب - كتلة (  $O_2$  ) اللازمة في عملية الإحتراق  $= ٢ * [ ( ٢ * ١٦ ) ] = ٦٤$  كغم من  $O_2$

الهواء يتكون من ( ٢١ % ) من الأوكسجين لذلك كمية الهواء التي نحتاجها هي :

$٦٤ * ( ٢١١١٠٠ ) = ٣٠٥$  كغم من الهواء النظري مطلوب لحرق ١٦ كغم من الميثان

نسبة الهواء \ الوقود = كتلة الهواء \ كتلة الوقود =  $١٦ / ٣٠٥ = ١٩$

لذلك لغرض إحتراق كلي كامل لكل ( ١ كغم من  $CH_4$  ) ، نحتاج إلى ( ١٩ كغم ) من الهواء (الهواء النظري) .

٢١ - نسبة الهواء الزائد (  $\lambda$  ) Excess Air Ratio :

هي نسبة الهواء المتاح Available air عبر ( فوق ) الهواء النظري ، وهي عامل تصميم Design parameter مهم جدا لتحليل الإحتراق .

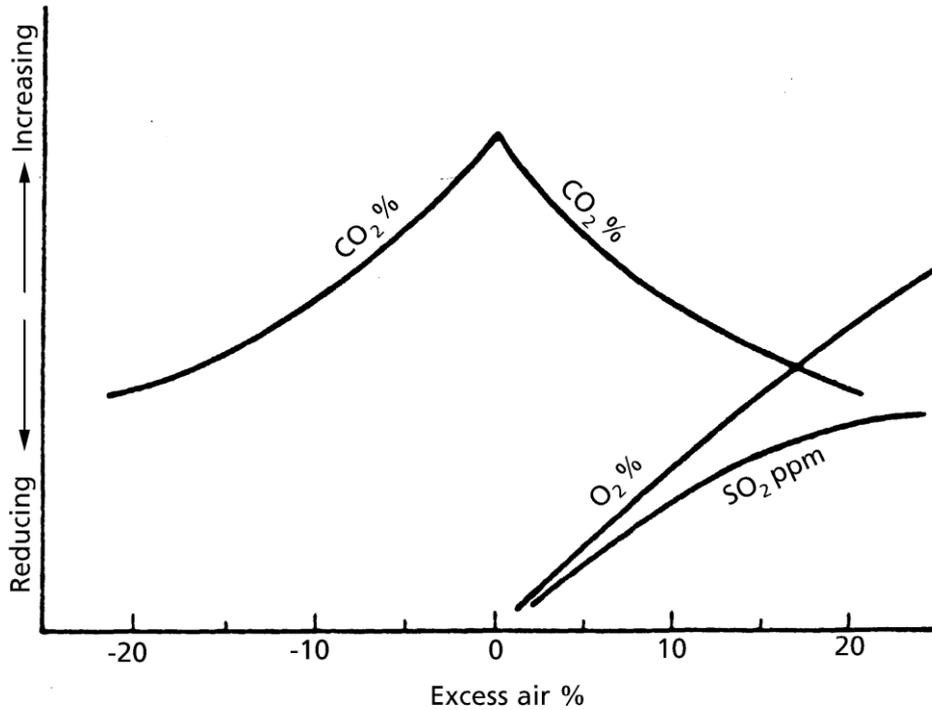
لا توجد عملية إحتراق مثالية لدرجة أنها تحتاج فقط للهواء النظري للإحتراق الكامل ، فكل عمليات الإحتراق تتطلب هواء زائد ( فائض ) لضمان الإحتراق الكامل ، إضافة إلى أن توفير هواء زائد للإحتراق يمكن أن يقلل من درجة حرارة المنتجات القابلة للإحتراق Combustible products إلى درجة الحرارة المطلوبة .

نسبة الهواء الزائد (  $\lambda$  ) = الهواء المتاح \ الهواء المطلوب للإحتراق الكامل

$$\text{Excess Air Ratio } \lambda = \frac{\text{air available}}{\text{air required for complete combustion}}$$

لاحظ أن عملية الإحتراق التي تستخدم الكمية النظرية من الهواء سيكون لها نسبة فائضة من الهواء (  $\lambda = ١$  ) .

ومن المعروف أن التوربين الغازي لديه نسبة عالية جدا من الهواء الزائد (سيمنز SIEMENS V94.2 لديه نسبة هواء زائد بمعدل  $(\lambda = 2.1)$  وبالتالي هواء العادم من المدخنة ) .  
إذا تم إستخدام ( ١٩ كغم ) هواء لعملية إحتراق ( ١ كغم ) ميثان Methane عندئذ يكون نسبة الهواء الزائد  $(\lambda = 1)$  .



الشكل (٧٥) تأثير الهواء الزائد على نواتج الإحتراق

### متطلبات الإحتراق الجيد Requirements for a good combustion

الإحتراق الجيد يتطلب :

- أ - الخلط الجيد بين الوقود والهواء .
- ب - يجب أن تتم عملية الإحتراق بكمية زائدة من الهواء لضمان الإحتراق الكامل .
- ج - يجب حرق منتجات ( نواتج ) الإحتراق بالكامل للحد من التلوث Pollution .
- د - يجب تجنب ترسبات الكربون Carbon deposits على المشاعل Burners .
- هـ - يجب تقليل خسائر ضغط الهواء الذي يدخل غرفة الإحتراق .
- و - يجب أن يكون الإحتراق في أصغر مساحة ممكنة (لتقليل خسائر إنتقال الحرارة بالإشعاع Radiation (heat transfer losses) .
- ي - يجب أن يكون الإحتراق مستقرا Stable مع توزيع منتظم ومتماثل لدرجة الحرارة Uniform temperature distribution .

## The important factors for combustion to start العوامل المهمة لبدء الإحتراق

لكي يحدث الإحتراق ، هناك أربعة شروط أساسية يجب استيفائها وهي :

أ - وجود الأوكسجين :

في كيمياء الإحتراق chemistry of burning or combustion ، نطلب من الوقود أن يتحد مع الأوكسجين لذلك ، إذا لم يكن هناك أي أوكسجين ، فلن يحدث إحتراق . في الحالة العملية ، مصدر الأوكسجين هو الهواء الذي يحتوي على ( ٢١ ٪ أوكسجين ) من حيث الحجم ومتاح بسهولة .

ب - درجة الحرارة الملائمة ( الصحيحة ) :

سوف يشتعل الوقود فقط إذا ارتفعت درجة حرارته فوق درجة حرارة الإشتعال الذاتي Self ignition temperature بوجود الأوكسجين .

ج- وجود مصدر للإشتعال Source of ignition :

لا يمكن أن تحدث عملية الإحتراق إلا عندما يتم إشعال الوقود ، بوجود الأوكسجين وعند درجة حرارة الإشتعال Ignition temperature أو فوقها ، بواسطة مصدر إشعال ، يمكن أن يكون هذا المصدر شرارة Spark أو شعلة Flame أو جمرات متوهجة Glowing embers أو معدن ساخن أحمر Red hot metal . يمكن أن تكون طريقة أخرى لإشتعال الوقود وذلك بضغط عالي جدا لخليط من الهواء والوقود إلى أن تزداد درجة حرارة الخليط فوق درجة حرارة إشتعال الوقود .

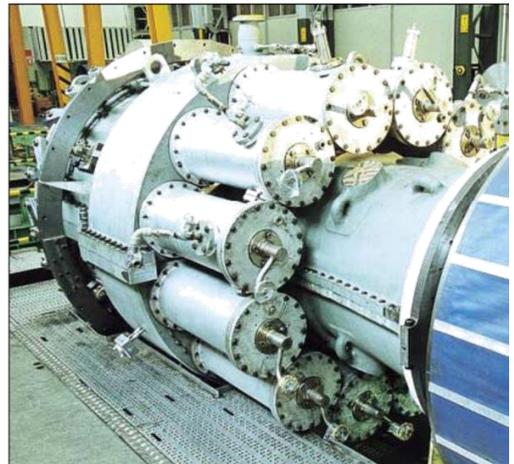
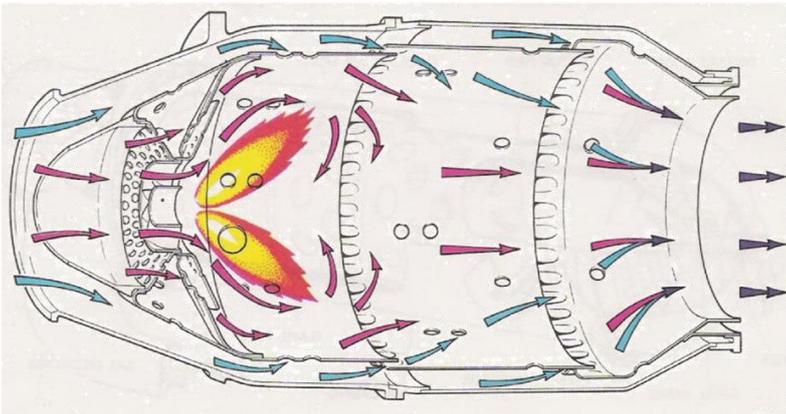
د- النسبة المئوية للوقود في الهواء ضمن النطاق أو المدى المناسب للإحتراق :

الغاز الطبيعي Natural gas سوف يحترق فقط إذا كانت نسبة الغاز في الهواء ما بين ( ٥ ٪ إلى ١٥ ٪ ) من حيث الحجم ، وبالنسبة للهيدروجين Hydrogen النسبة ( ٤ ٪ إلى ٧٦ ٪ ) من حيث الحجم .

## أنواع غرف الإحتراق المستخدمة في التوربين الغازي

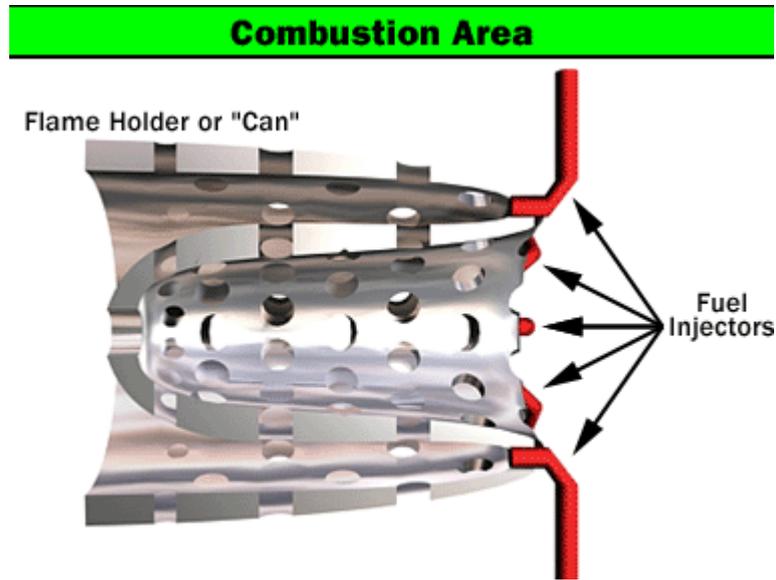
### Types of combustion chamber which are used in gas turbines

١- غرفة إحتراق نوع العلبة Can type وهي عبارة عن حاوية معدنية أسطوانية cylindrical metal container .



الشكل ( ٧٦ ) غرفة إحتراق نوع العلبة . الأسهم الحمراء تمثل الهواء المستخدم للإحتراق والأسهم الزرقاء تمثل هواء التبريد Cooling air

يجب استخدام حامل الشعلة أو اللهب Flame holder في غرفة الإحتراق لتجنب إطفاء اللهب بسبب تدفق هواء التفريغ Discharge air flow . حامل اللهب هو قطعة معدنية مجوفة و مثقبة Hollow perforated piece . of metal



الشكل ( ٧٧ ) حامل اللهب أو الشعلة Flame holder

مزايا ومساوىء غرف الإحتراق نوع العلبه

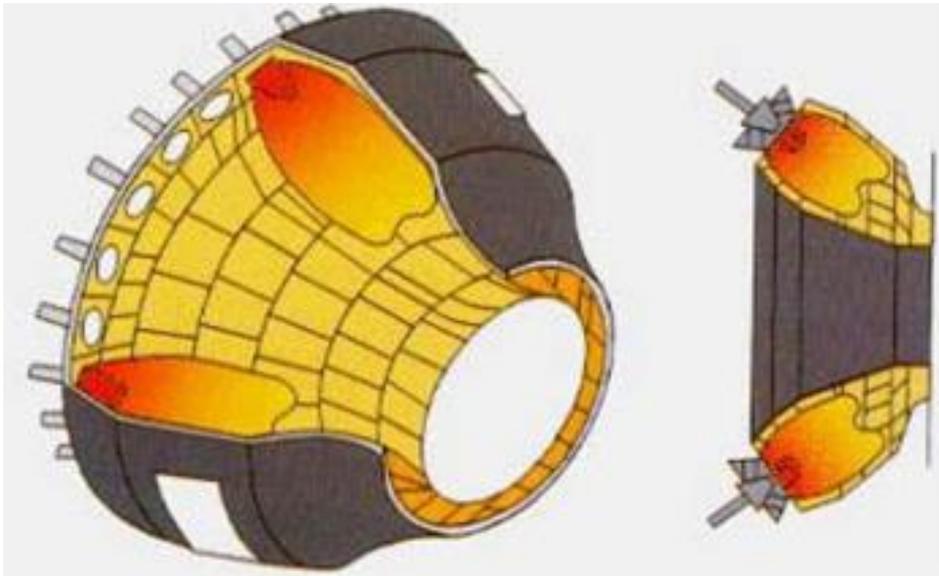
### Avantages & Disadvantages of Can type Combustors

ت	المزايا	المساوىء
١	خفيفة الوزن وصغيرة الحجم ، لذلك تُستخدم في الطائرات والمركبات الجوية الأخرى Aircraft	خسائر الضغط العالي High pressure losses
٢	تحيط بالتوربين الغازي والتي تُقلل من أبعاد الماكينة وتُحسن الشكل الإنسيابي للمحرك النفاث Aerodynamic shape of the jet engine	اختلال تشغيل أو سوء أداء إحدى العُلب ، يمكن أن يؤدي إلى تضرر التوربين بسبب عدم إنتظام توزيع الحرارة Heat distribution will be disturbed
٣	سهولة صيانتها Easy in maintenance	توزيع غير متساوي للحرارة Uneven heat distribution
٤	خسائر إنتقال الحرارة بالإشعاع تكون بأدنى حد Minimum radiation heat transfer losses	أكثر ملاءمة لضغط الطرد المركزي Centrifugal compressor حيث ينقسم التدفق إلى تيارات ( خطوط جريان ) منفصلة في النواشر Diffusers .

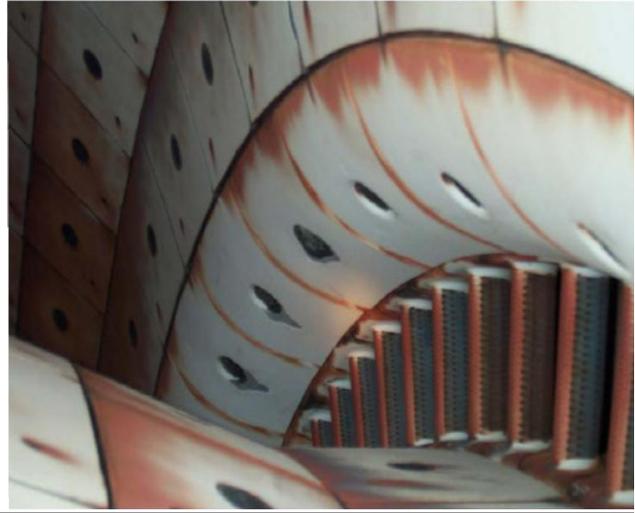
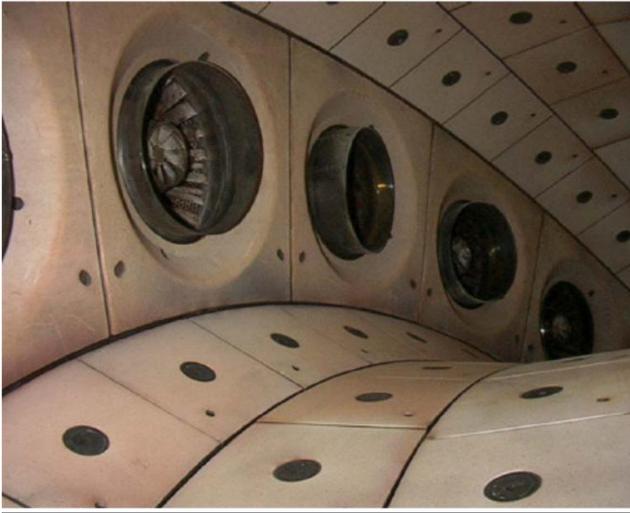
٢- غرفة إحتراق نوع حلقي Annular type



الشكل ( ٧٨ ) توربين غازي نوع GE مع غرف إحتراق نوع حلقي  
GE-gas turbine with annular type combustors



الشكل ( ٧٩ ) غرفة إحتراق نوع حلقي ، يظهر فيها أنبوب اللهب ( طبقة خزفية أو سيراميكية )  
Annular type-Combustion Chamber, Flame tube is shown (ceramic layer)



الشكل ( ٨٠ ) المرحلة الأولى First stage لتوربين غازي ذو غرف إحتراق من النوع الحلقي

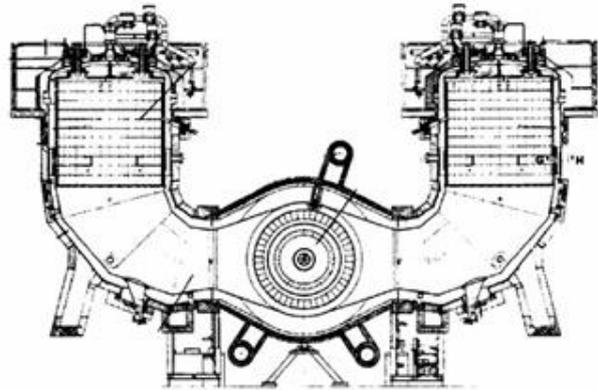
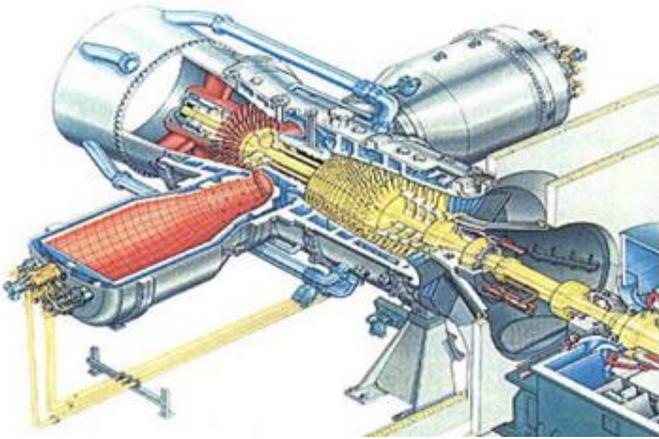
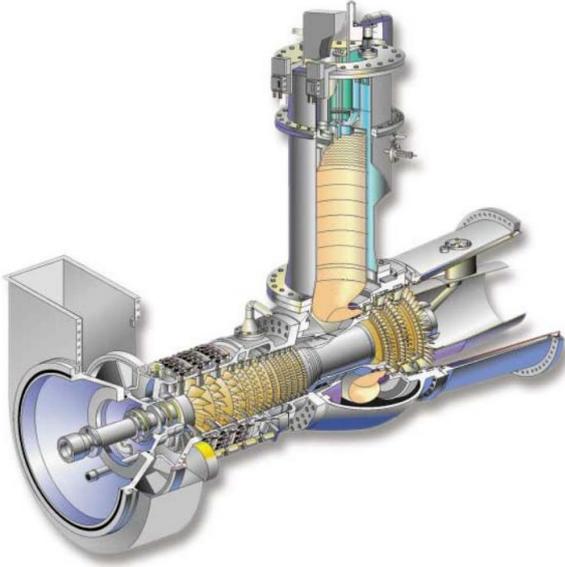
### مزايا ومساوىء غرف الإحتراق من النوع الحلقي

### Advantages & Disadvantages of Annular type Combustors

ت	المزايا	المساوىء
١	إحاطة كاملة بالتوربين الغازي	التوربين يعاني من الحرارة لتعرض ريش التوربين إلى اللهب Flame (إنتقال الحرارة عن طريق الإشعاع Heat transfer by radiation) مما يقلل من دورة حياة التوربين Life cycle أو العمر التشغيلي للتوربين Operational lifetime
٢	تقل خسائر الضغط	تكسر أية كتلة سيراميكية ( خزفية ) Ceramic block داخل غرفة الإحتراق سوف تصيب وترتطم مباشرة بريش التوربين Turbine blades مسببة فشل كارثي Catastrophic failure لأجزاء التوربين .
٣	تقل حجم الماكينة	إمكانية إحتراق أجزاء التوربين وتعرضها لأضرار بالغة
٤	توزيع منتظم للحرارة ( درجة حرارة دخول التوربين Turbine inlet temperature )	إحتمالية كبيرة في تعرض ثقب التبريد Cooling holes في جدار أنبوب اللهب Flame tube إلى إنسداد Blockage
٥	تقدم أفضل شكل إنسيابي Aerodynamic shape لمحرك التوربين الغازي لذلك هي الأكثر إستخداما في الطائرات والمركبات الجوية	صعوبة الصيانة

٣ - غرفة إحتراق نوع صومعي ( أسطواني ) Silo type (Cylindrical)

يشتمل هذا النوع على تكوينين أو شكلين أساسيين : غرفة إحتراق أحادية Single combustor وغرفة إحتراق مزدوجة Double combustor .



الشكل ( ٨١ ) أشكال مختلفة لغرف الإحتراق من النوع الصومعي

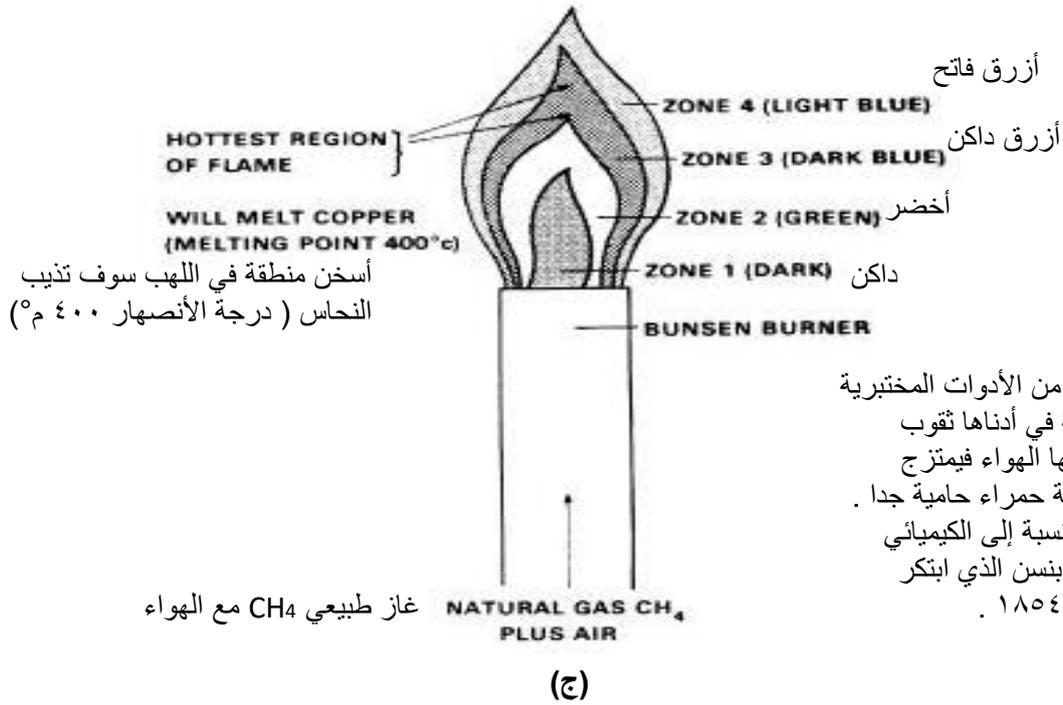
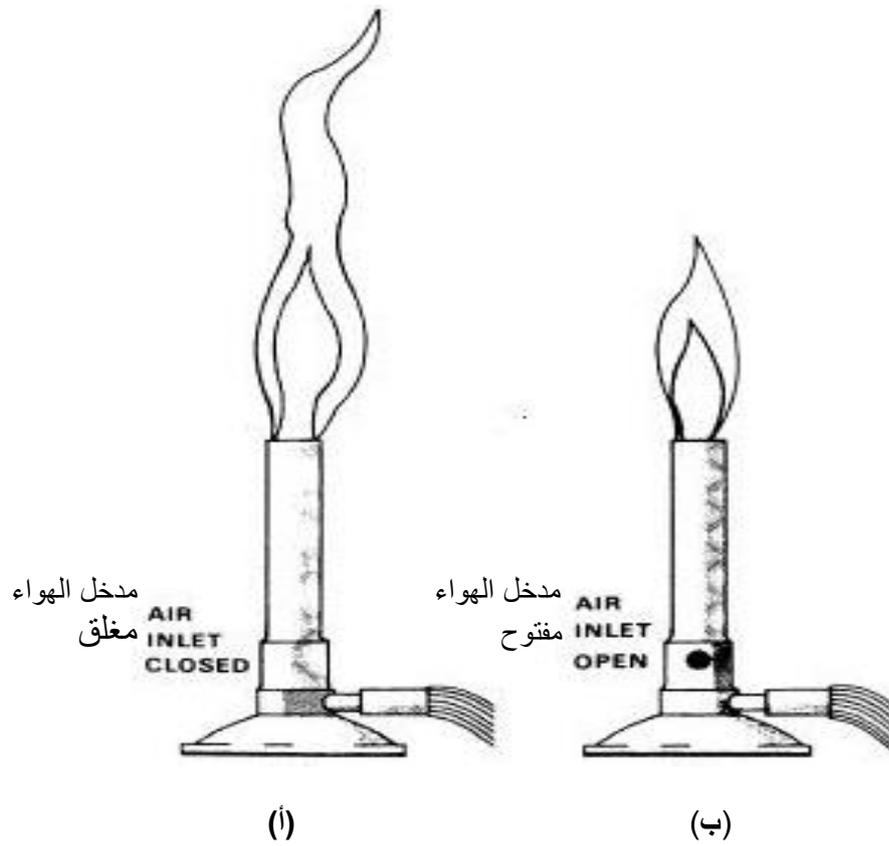
مزايا ومساوئ غرف الإحتراق من النوع الأسطواني  
Advantages & Disadvantages of Silo type Combustors

ت	المزايا	المساوئ
١	أدنى خسائر ضغط	حجم كبير ينتج خسائر أكبر في إنتقال الحرارة بالإشعاع
٢	سهولة الصيانة	غير مناسبة لمحركات الطائرات والمركبات الجوية
٣	كفاءة أعلى و دورة حياة طويلة Higher efficiency & Long life	مستوى ضوضاء أعلى Higher noise level
٤	متصل بالتوربين عن طريق فلنجة Flange واحدة لتقليل إنتقال الحرارة بالتوصيل Heat transfer by conduction	تشغل حجم أكبر بكثير مقارنة بالنوع الحلقي أو العلبة
٥	يتم إجراء عملية الإحتراق بدرجة حرارة أقل (إنبعاثات أقل لأكاسيد النيتروجين NOx emissions) .	يتطلب المزيد من أنابيب الوقود Fuel piping

الأجزاء الرئيسية لغرفة الإحتراق Main parts of combustion chamber

- تتكون غرفة الإحتراق بشكل رئيسي من :
- ١- غلاف الحارقة Combustor Casing
  - ٢- حامل اللهب Flame holder
  - ٣- القداحات ( أجهزة الإشعال ) Igniters (توفير شرارة الإشعال Ignition spark)
  - ٤- أنبوب اللهب Flame Tube (يقلل من إنتقال الحرارة بالإشعاع ويوزع تدفق الهواء بين المناطق الأساسية والتخفيف Primary & dilution zones)
  - ٥- المشاعل أو الحارقات Burners
  - ٦- صمامات و أنابيب تغذية الوقود Fuel supply valves & piping
  - ٧- كاشف اللهب Flame detector

يمكن وصف أهمية الخلط أو المزج الجيد بين الوقود والهواء من خلال المثال في الشكل ( ٨٢ - أ ) :  
إذا كان مدخل الهواء Air inlet في الجزء السفلي من المشعل Burner مغلقا ، فسوف يُنتج عنه لهب طويل Long flame ، النقطة (أ) . وإذا تم فتح المدخل بحيث يتم خلط الهواء والغاز بشكل كامل قبل ترك المشعل ، سيتم إنتاج لهب قصير وحاد Short & sharp flame ، النقطة (ب) . مناطق اللهب Zones of the flame ظاهرة في النقطة (ج) .



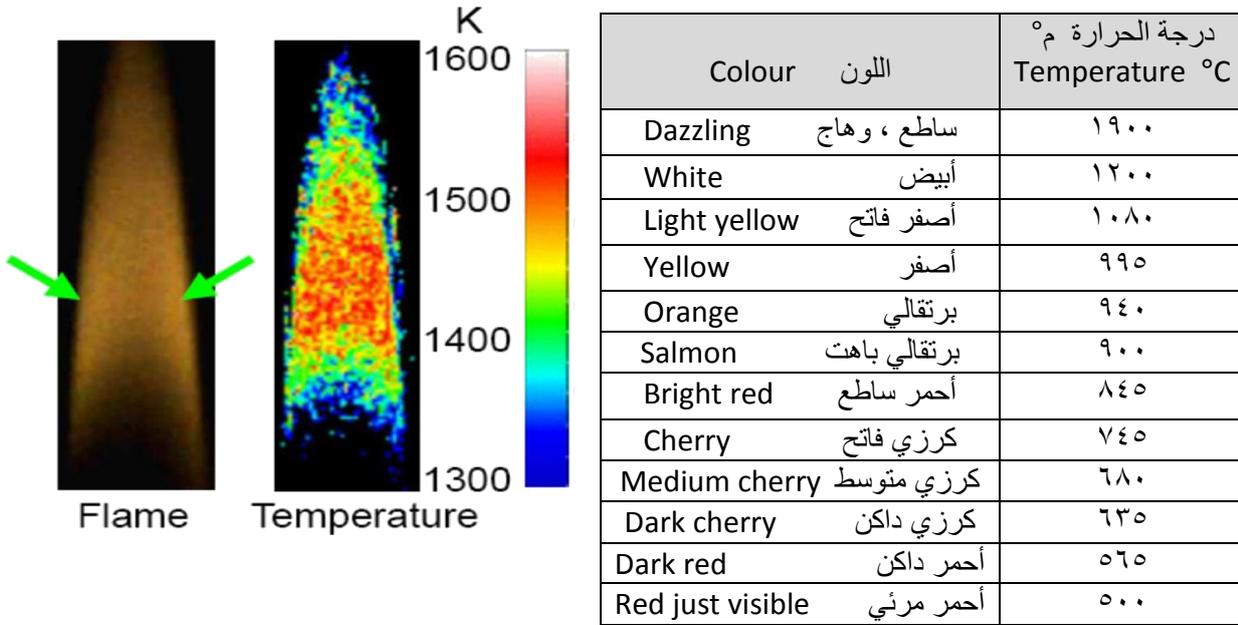
مشعل بنسن هو من الأدوات المختبرية متكونة من أنبوبة في أدها ثقوب صغيرة يدخل إليها الهواء فيمتزج بالغاز محدثا شعلة حمراء حامية جدا . سمي بهذا الاسم نسبة إلى الكيميائي الألماني روبرت بنسن الذي ابتكر تصميمه في عام ١٨٥٤ .

الشكل ( ٨٢ - أ ) مشعل بنسن Bunsen Burner

## النقاط المهمة في عملية الإحتراق Important points in a combustion process

### ١ - لون اللهب Flame Colour :

إن الألوان المختلفة في اللهب هي بسبب الإختلاف في درجة حرارة الجزيئات أو الجسيمات Particles ، كلما ارتفعت درجة حرارة الجزيئات ، يكون لون اللهب أكثر بياضا .



الشكل (٨٢-ب) توزيع درجة حرارة لهب الشمعة  
Temperature distribution of candle flame

جدول يبين العلاقة بين لون اللهب ودرجة الحرارة  
Relation between flame color & temperature

بالنسبة لإحتراق كمية معينة من الوقود سريع التبخر أو التطاير Volatile fuel ، فإن اللهب القصير Short flame سيعني عموماً أن الإحتراق سريع وكامل ، واللهب الأطول يعني أن الإحتراق بطيء Delayed combustion والشعلة الطويلة جداً تعني أن الإحتراق سيئ Poor combustion . هناك علاقة بين لون اللهب ودرجة حرارته . و إذا تم أيضاً الأخذ بنظر الإعتبار طول اللهب ، عندئذ يمكن فهم و معرفة اللهب بشكل أفضل . (الرجوع إلى جدول القيم الحرارية Calorific vales لأنواع الوقود الشائعة) .

### ٢- سرعة اللهب ( الشعلة ) والإشتعال المبكر أو العكسي Flame Speed and Back Firing :

تخيل أنبوب يحتوي على خليط قابل للاشتعال Flammable mixture من الغاز والهواء . إذا أشتعل الخليط في أحد طرفي الأنبوب ، فإن اللهب سوف ينتقل خلال الخليط في البداية بسرعة ثابتة Constant velocity ، ثم في ظروف مناسبة سينتقل بسرعة متزايدة . هذا هو الحال بشكل خاص إذا كان هنالك إضطراب Turbulence .

لقد تم تحديده تجريبيا أن للهيدروجين Hydrogen سرعة لهب حوالي سبعة أضعاف من كل من أول أكسيد الكربون والميثان Carbon Monoxide and Methane . إن الأهمية في تجربة ومعرفة هذه السرعات المختلفة لإنتشار أو تمدد اللهب Flame propagation هي أنها تحدد ميل اللهب للإشتعال المبكر أو العكسي (إشتعال الوقود قبل الأوان ) Back fire .

إذا كانت سرعة دخول الوقود إلى الفرن Furnace مماثلة لسرعة إنتشار اللهب ، فإن نقطة الإشتعال ستبقى على مسافة محددة من المشعل Burner . ومع ذلك ، إذا تجاوزت سرعة الإنتشار العكسي أو الخلفي للهب سرعة تدفق خليط الهواء \ الوقود ، فسيحدث إشتعال عكسي (إرتداد اللهب ) . الوقود الغني بالهيدروجين يميل إلى الإشتعال العكسي لأن للهبها سرعة إنتشار عالية .

لا تتغير سرعة الهواء عادة مع حمل التوربين الغازي Gas turbine load لأن الضاغط يعمل بسرعة ثابتة . يعتمد معدل إحتراق الوقود و كفاءة عملية الإحتراق Efficiency of the burning على كل من الوقت ودرجة الحرارة و الإضطراب .

**ملاحظة توضيحية :** سرعة اللهب Flame speed هي معدل قياس تمدد جبهة اللهب في تفاعل الإحتراق Combustion reaction . يُفرق مختصو الإحتراق بين سرعة اللهب الرقائقي Laminar flame speed وسرعة اللهب المضطربة Turbulent flame speed . يتم قياس سرعة اللهب عادة بمعدل (متر / ثانية ، سنتمتر / ثانية (m/s, cm/s) إلخ .

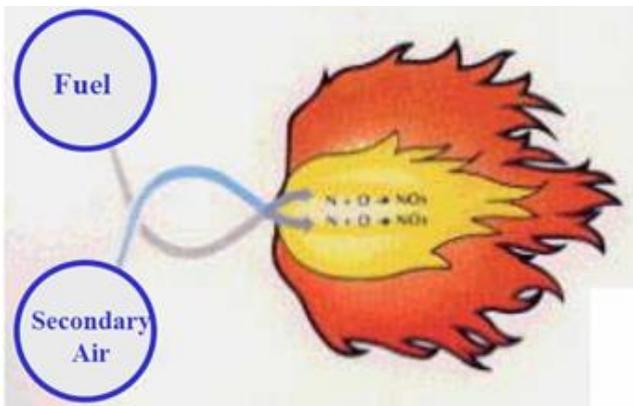
**الأشكال المختلفة للشعلة أثناء الإحتراق**

### Different configurations of the flame during combustion process

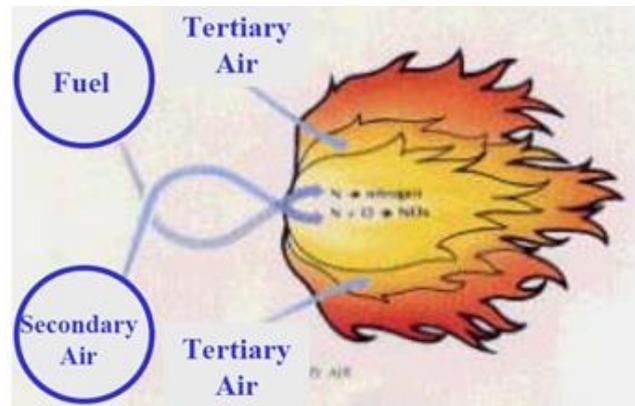
يحدث الإحتراق الفعلي Actual burning في شكلين رئيسيين :

١ - شعلة ذات إنتشار رقائقي ( طباقى ، صفائحي ) Laminar diffusion flame ، حيث يتم تشكيل صفيحة من اللهب بين الوقود والهواء . يمكن رؤية هذا النوع من الإحتراق في لهب الشمعة Candle flame ، ويحدث حول قطيرة الوقود ( قطرة صغيرة من الوقود ) Fuel droplet . (لهب منتشر DIFFUSION FLAME) .

٢ - النوع الثاني هو اللهب الطباقى الممزوج مسبقا Pre-mixed laminar flame ، والذي يحدث عندما يتم خلط الوقود والهواء معا مسبقا قبل حرق الوقود . (PREMIX FLAME) ، لاحظ أن اللهب الممزوج مسبقا (PREMIX FLAME) يشتمل على مرحلة هواء ثالثة Tertiary air يساعد على تقليل درجة حرارة ذروة اللهب Flame peak temperature مع تقليل إنبعاثات أكاسيد النيتروجين NOx emission .



الشكل ( ٨٤ ) اللهب المنتشر Diffusion Flame



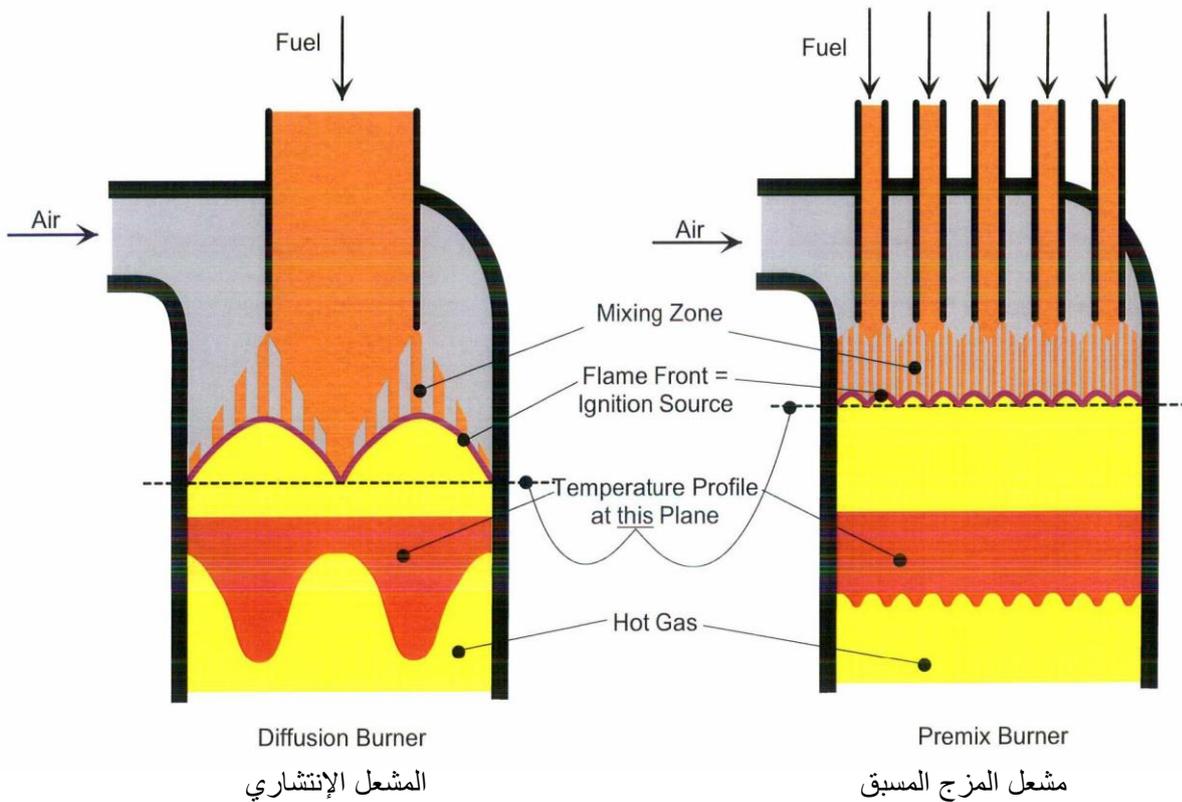
الشكل ( ٨٣ ) اللهب الممزوج مسبقا Premix Flame

التوربينات الغازية الحديثة لها مشاعل مركبة ( هجينة ) Hybrid burners في غرف الإحتراق ، هذه المشاعل المركبة لها لهبان مختلفان في مشعل واحد ، اللهب الإنتشاري و اللهب الممزوج مسبقا ، كل شعلة يتم تزويدها بالوقود بواسطة أنابيب منفردة خاصة Individual pipes .

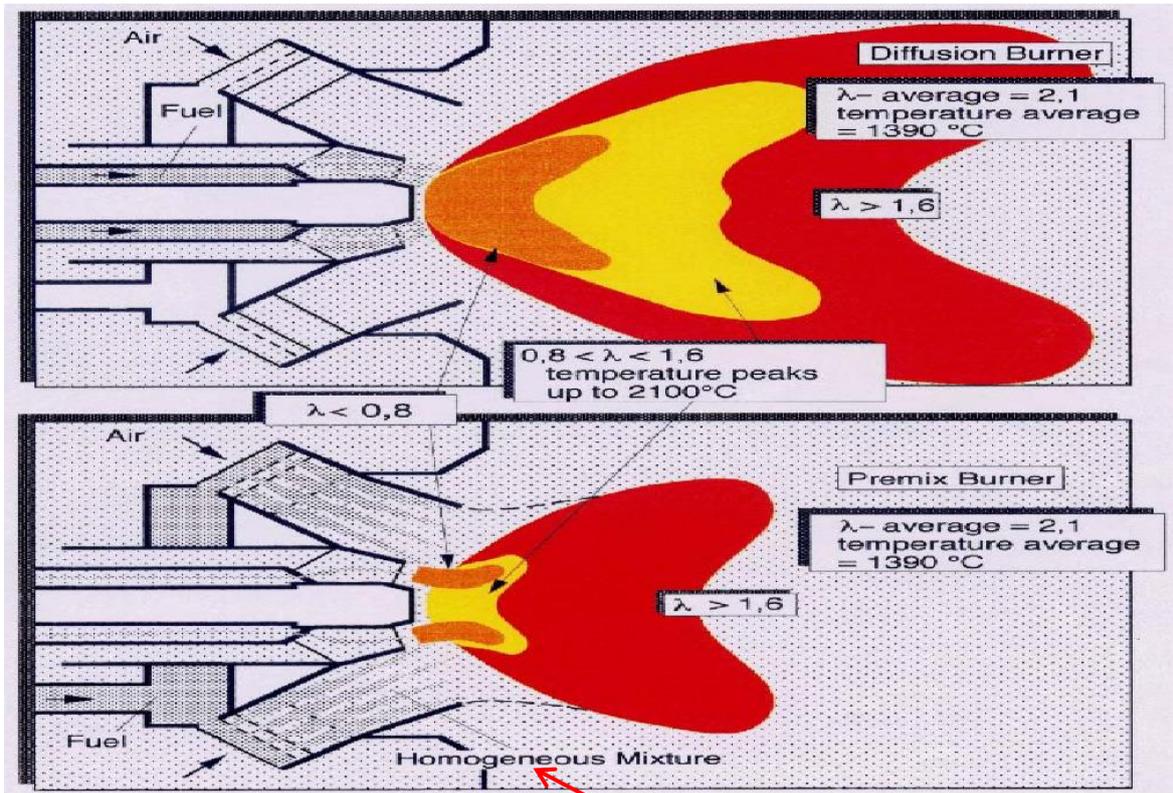
عندما يستخدم التوربين الغازي اللهب الإنتشاري ، يُقال أن التوربين الغازي تحت وضع الإنتشار Diffusion Mode ، وعندما يستخدم اللهب الممزوج مسبقا ، فإن التوربين الغازي يُقال إنه تحت وضع الخلط أو المزج المسبق Premix Mode .

كلتا الشعلتان تستهلكان نفس كمية الوقود عند حمل معين Given load ، لكن الفرق بينهما يكمن في طريقة أو أسلوب خلط الهواء والوقود .

يختار المصممون اللهب الممزوج مسبقا باعتباره الشعلة الرئيسية للتوربين الغازي العامل كحمل أساس Gas turbine base load operation بسبب انخفاض مستوى أكاسيد النيتروجين NOx level في هذه اللهب . الخصائص الرئيسية لهذه الشعلات موضحة في الجدول التالي :



الشكل ( ٨٥- أ ) مقارنة بين اللهب الإنتشاري و اللهب الممزوج مسبقا



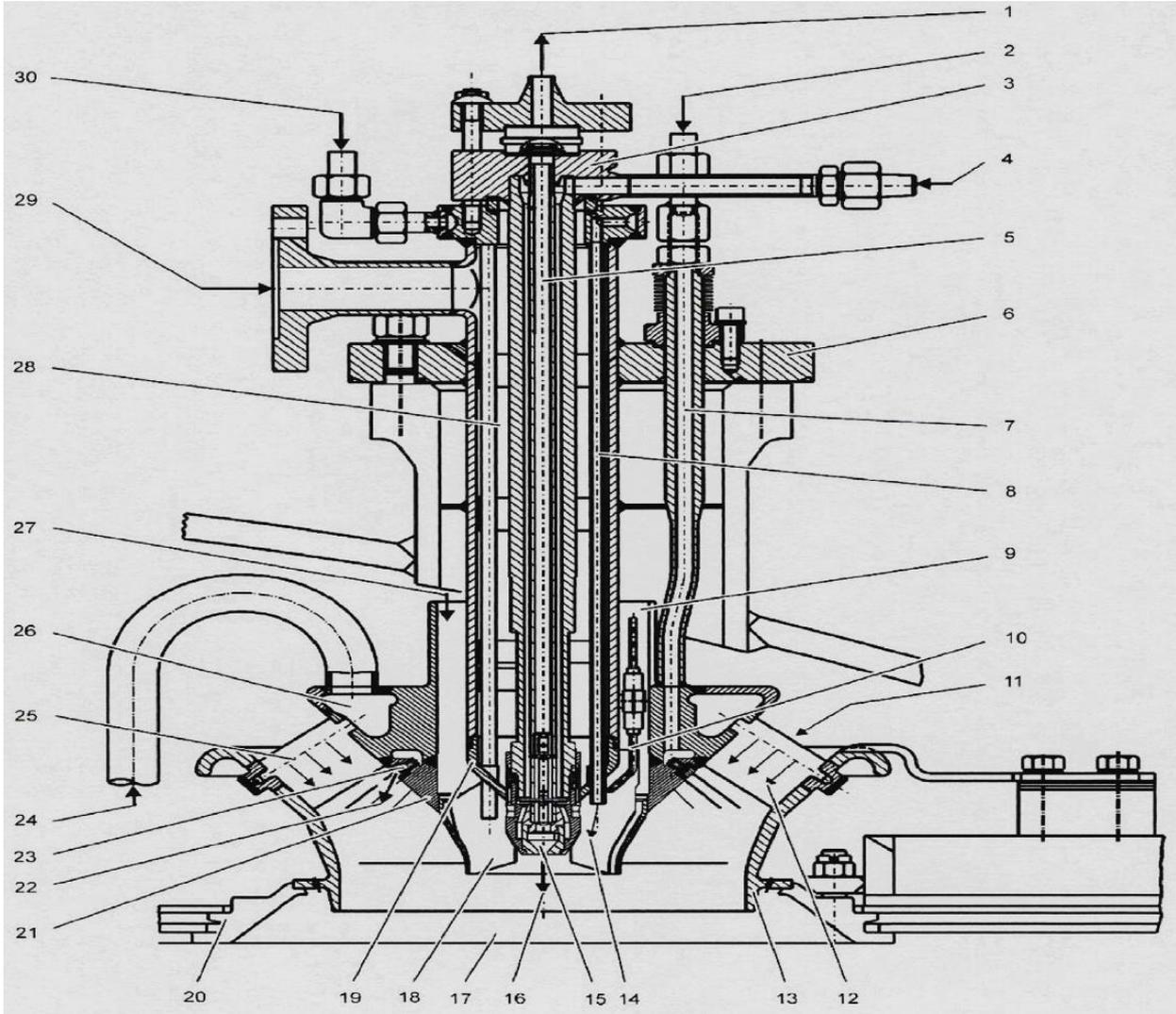
خليط متجانس

الشكل (٨٥- ب) مقارنة بين اللهب الإنتشاري واللهب الممزوج مسبقا  
 $\lambda$  = نسبة الهواء الزائد Excess Air Ratio

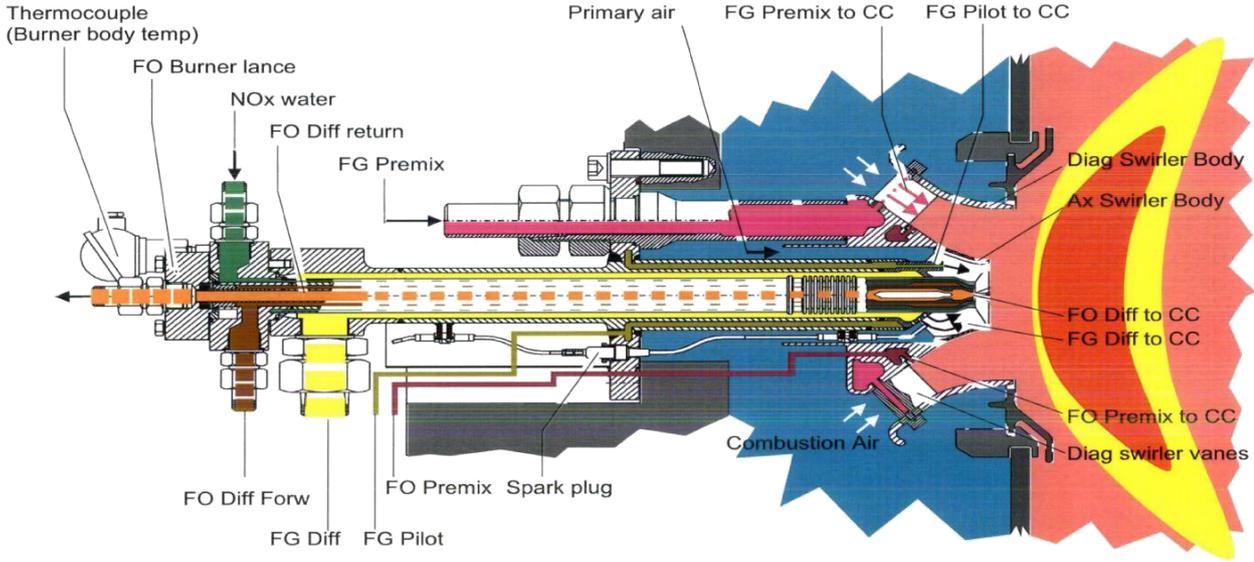
ت	اللهب الإنتشاري ( العادي )	اللهب الممزوج مسبقا ( البريمكس )
١	لهب قوي ومستقر Strong & stable flame يستخدم أثناء بدء تشغيل التوربين الغازي Gas turbine start up حتى (٦٠٪) من الحمل .	شعلة ضعيفة وغير مستقرة Weak & instable flame لأنها لا تملك ( درجة حرارة ذروة Peak temperature )
٢	درجة الحرارة ليست خطية Linear .	توفر درجة الحرارة الخطية توزيع حراري ممتاز . Excellent heat distribution .
٣	لهب غير مرئي Non visible flame .	الشعلة قصيرة مرئية Visible short flame .
٤	إنبعاثات أعلى بكثير لأكاسيد النيتروجين NOx emission	إنبعاثات أقل بكثير لأكاسيد النيتروجين .
٥	خلط سيء للوقود والهواء Bad air fuel mixing .	خلط ممتاز للوقود والهواء .
٦	الشعلة بعيدة عن معدن المشعل أو الحارق .	الشعلة مغلقة على معدن المشعل ، لذا يتطلب مراقبة درجة حرارة المشعل .
٧	يستخدم أثناء تغيير الوقود Fuel change over .	لا يمكن إستخدامه أثناء تغيير الوقود .
٨	بما أن لهب الانتشار لهب قوي ، فلن يكون متأثرا بطنين اللهب Flame humming ( صوت ثابت ومستمر ) .	يتطلب سرعة التغيير والتحويل إلى وضع الانتشار عندما يعاني اللهب الممزوج مسبقا من تذبذب ضغط غاز الوقود بينما تتم الإستجابة لمراقبة طنين اللهب .
٩	لا حاجة إلى لهب دليل أو توجيه Pilot flame .	يتطلب لهب دليل ( مساعد ) لجعل الشعلة ثابتة ومستقرة .

## الشكل العام للمشعل المركب ( الهجين ) The main configuration of the hybrid burner

المشعل أو الحارق الهجين هو عبارة عن مشعل يصمم بحيث يكون له نوعان مختلفان من اللهب وهما اللهب الإنتشاري واللهب الممزوج مسبقا ، كل لهب له ممرات أو قنوات تزويد الهواء والوقود الخاصة به داخل المشعل ، كما أن كل لهب له التدويم Swirler الخاص به (الحركة الدوامية للوقود) . معظم توربينات الغاز الحديثة (أوروبا Europe) تستخدم هذا المشعل ، والميزة الرئيسية لهذا المشعل هو أن مستوى أكاسيد النيتروجين أقل إذا تم تشغيل توربينات الغاز تحت وضع الخلط أو المزج المسبق (بريمكس) .  
يميل المصممون الآخرون (الولايات الأمريكية المتحدة U.S.A) إلى استخدام الحقن بالماء Water injection على المشاعل لتقليل درجة حرارة اللهب وبالتالي تقليل انبعاثات أكاسيد النيتروجين .



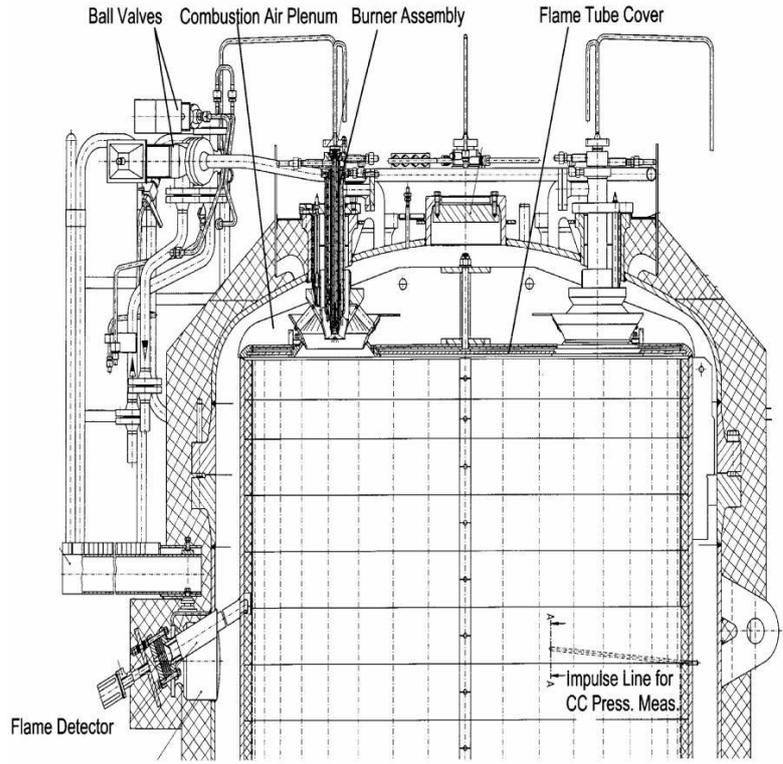
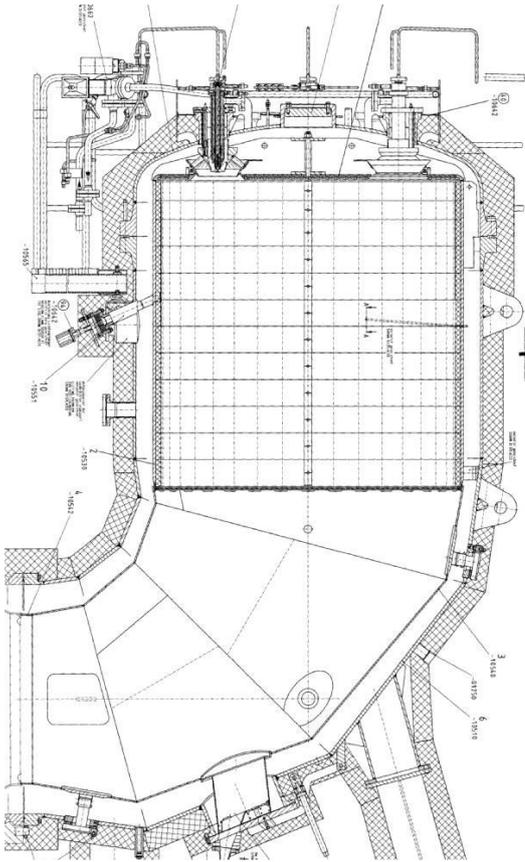
الشكل (٨٦- أ) تجميع ( تركيب ) المشعل الهجين (المشعل الإنتشاري - الممزوج مسبقا )  
Hybrid Burner Assembly (Diffusion-Premix Burner)



الشكل (٨٦- ب) تجميع ( تركيب ) المشعل الهجين ( المشعل الإنتشاري – الممزوج مسبقا )  
Hybrid Burner Assembly (Diffusion-Premix Burner)

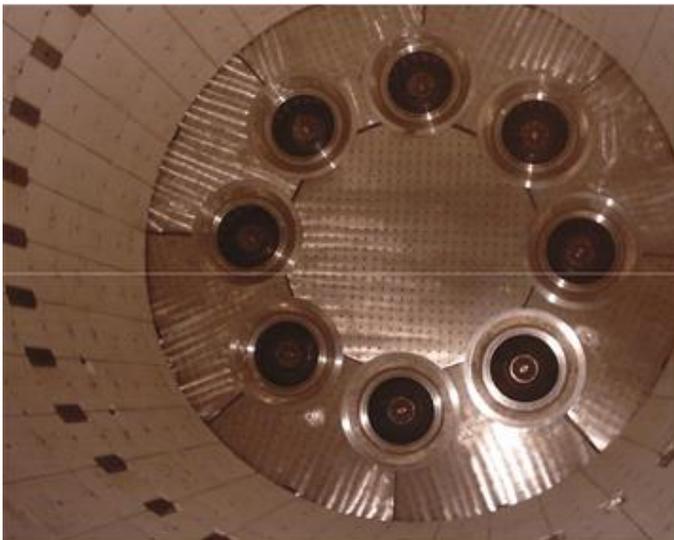
Fuel oil outlet	مخرج زيت الوقود	١٦	Fuel oil return line	خط رجوع زيت الوقود	١
Combustion zone	منطقة الإحتراق	١٧	Premix fuel oil inlet	مدخل زيت وقود البريمكس	٢
Axial swirler	التدويم المحوري	١٨	Fuel oil diffusion burner	المشعل الإنتشاري لزيت الوقود	٣
Gas diffusion burner	المشعل الإنتشاري للغاز	١٩	Fuel oil supply line	خط تجهيز زيت الوقود	٤
Flame cylinder end plate	صفحة نهاية أسطوانة اللهب	٢٠	Return line	خط الرجوع	٥
Premix fuel oil burner	مشعل البريمكس لزيت الوقود	٢١	Burner support	حامل المشعل	٦
Fuel oil outlet (premix)	مخرج زيت وقود البريمكس	٢٢	Fuel oil supply pipe	أنبوب تجهيز زيت الوقود	٧
Premix burner nozzle	منفت مشعل البريمكس	٢٣	Pilot gas burner	المشعل الغازي التجريبي (المساعد)	٨
Premix gas inlet	مدخل غاز البريمكس	٢٤	Annular space for combustion	حيز حلقي للإحتراق	٩
Diagonal swirler vane	ريشة التدويم القطري	٢٥	Igniter	جهاز الإشعال	١٠
Gas distributor duct	قناة (مجرى) موزع الغاز	٢٦	Air inlet into the diagonal swirler	مدخل الهواء إلى داخل التدويم القطري	١١
Air inlet into the axial swirler	مدخل الهواء إلى داخل التدويم المحوري	٢٧	Premix gas outlet	مخرج غاز البريمكس	١٢
Annular space for diffusion gas	حيز حلقي للغاز المنتشر	٢٨	Diagonal swirler	التدويم ( التدوير ) القطري	١٣
Gas inlet into the diffusion burner	مدخل الغاز إلى داخل المشعل الإنتشاري	٢٩	Gas outlet from the pilot gas burner	مخرج الهواء من المشعل الغازي التجريبي	١٤
Gas inlet into the pilot gas burner	مدخل الغاز إلى داخل المشعل الغازي التجريبي	٣٠	Fuel oil diffusion burner nozzle	منفت ( فوهة ) المشعل الإنتشاري لزيت الوقود	١٥

ملاحظة توضيحية : زيت الوقود Fuel oil هو أي وقود سائل Liquid fuel يتم حرقه في فرن أو مرجل Furnace or boiler لتوليد الحرارة أو إستخدامه في محرك لتوليد الطاقة Power .



Gas Turbine Combustion Chamber (Top Section)

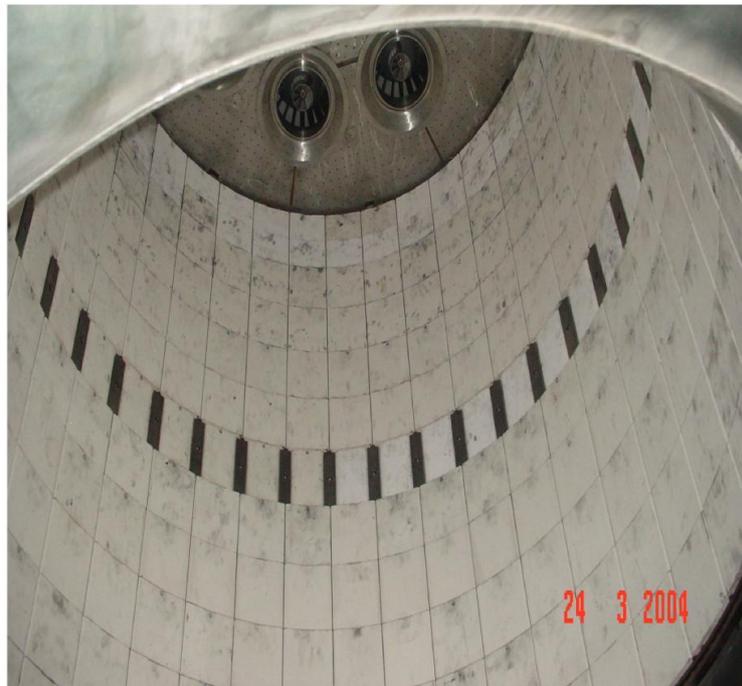
الشكل ( ٨٧ ) المشعل الهجين في غرفة احتراق نوع صومعة  
Hybrid Burner on Silo type combustor



## طنين أو أزيز الشعلة Flame humming

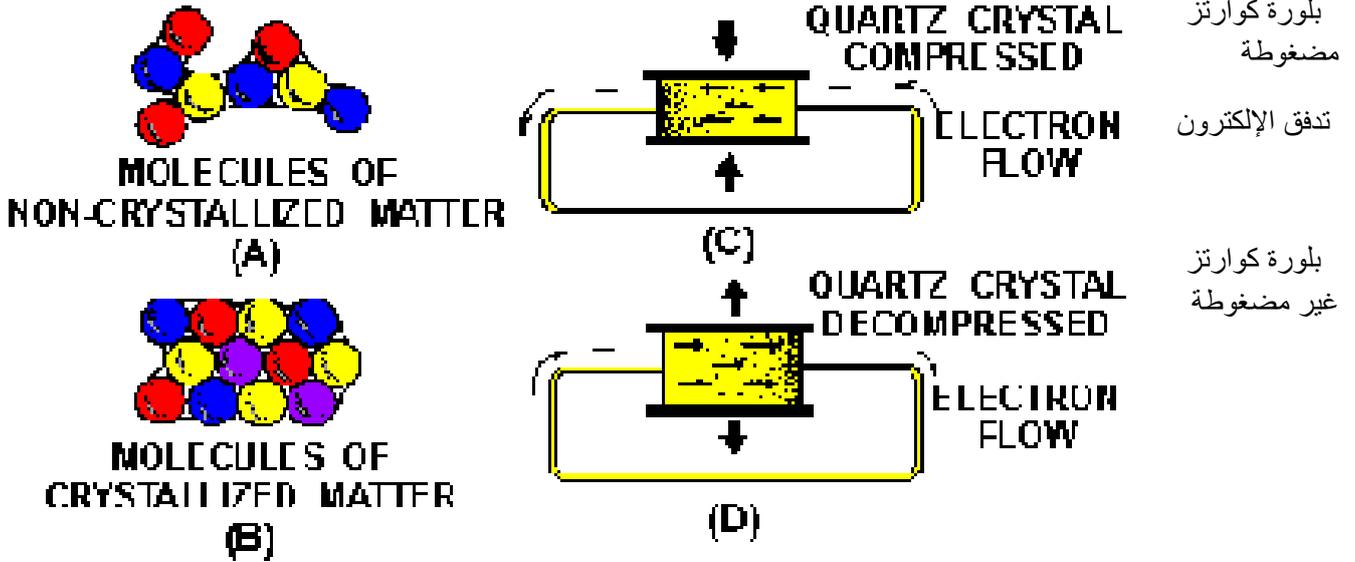
يمكن تعريف طنين الشعلة بأنه تقلبات ضغط اللهب Pressure fluctuations of the flame في غرفة الإحتراق . أثناء تغير الحمل ، سيتم تغيير تدفق الوقود والذي سيؤدي إلى تقلب أو تذبذب في حالة ووضعية اللهب وطفرة في درجة الحرارة ، وسيُنتج عن ذلك ضغط نبضي Pulsation pressure . سيكون لتغير ضغط اللهب تردد معين Certain frequency .

يجب أن يكون نطاق تردد اللهب أو الشعلة ضمن حدود التشغيل الآمنة ، إذا أزداد طنين اللهب ، عندئذ سيزداد مستوى الإهتزاز في غرفة الاحتراق ، وبالتالي فإن أنبوب اللهب Flame tube الذي يتكون من مجموعة من الكتل Blocks قد ينهار مع الوقت و تتساقط قطع الطوب أو القرميد المكسورة Broken brick pieces وتُخلط مع تيار التدفق Flow stream الداخل إلى التوربين الذي يدور بسرعة عالية ، والنتيجة هي الفشل الكارثي Catastrophic Failure للتوربين الغازي . إن رصد ومراقبة طنين اللهب مهم جدا لتجنب مثل هذه الحالات .



الشكل ( ٨٨ ) أنبوب اللهب لغرفة إحتراق نوع صومعة ، توضح الصورة على اليسار إجراء صيانة لكل لبنة ( طوبة ) باستخدام ورق شفاف Transparent paper مع رسم X أسود عليه ، يتم فحص حالة الطوبة الجيدة بطريقة لا يجب أن يكون فيها أي صدع أو شق Crack داخل X الأسود وإذا كانت الشقوق ممتدة وتصل إلى X الأسود ، فيجب استبدال الطوب بأخر متماثل ومطابق Corresponding لتجنب فشلها عندما يكون التوربين الغازي في حالة التشغيل .

يتم قياس طنين اللهب بمتحسس الإهتزاز Vibration sensor الذي يعمل على مبدأ المفهوم الكهروضغطي (كهرو إجهادي) Piezoelectric . الإشارة الخارجة هي إشارة الضغط ( ملي بار mbar ) ، يمكن عرض مفهوم الكهروضغطي في الشكل التالي .



الشكل ( ٨٩ ) الكهروإجهادية هي الجهد ( الفولتية ) الناتجة عن طريق كبس بلورات مواد معينة ( ضغط )  
 Piezoelectricity is voltage produced by squeezing crystals of certain substances (pressure)  
 (A) جزيئات مادة غير بلورية Molecules of non-crystallized matter  
 (B) جزيئات مادة بلورية Molecules of crystallized matter

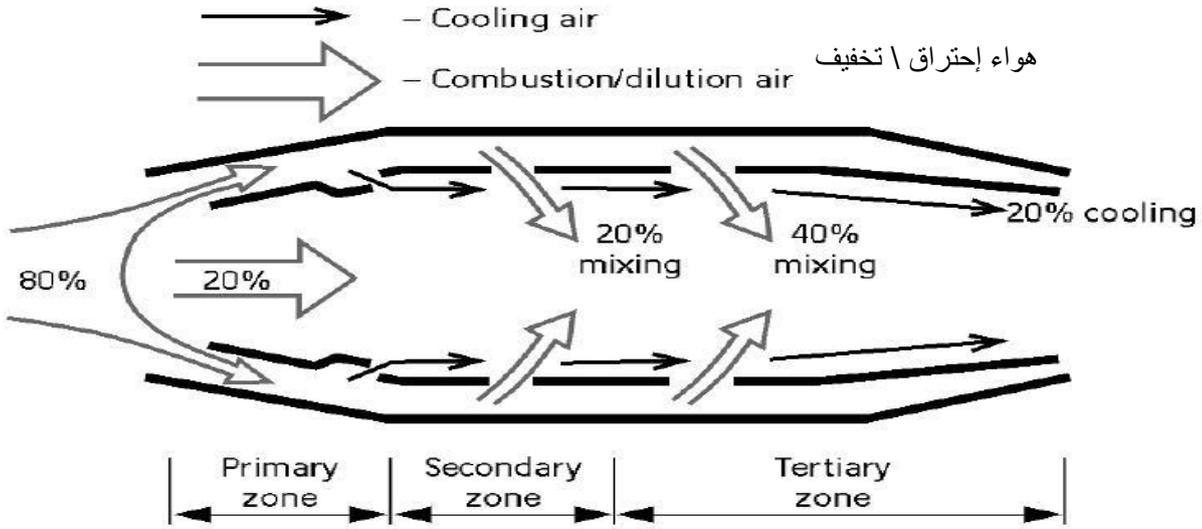
في حالة زيادة طنين اللهب إلى أكثر من ( ٣٠ ملي بار ) ، يتم حظر زيادة حمل التوربين الغازي إلى أن يهدأ متحسس الطنين (تتم إزالته) .

**ملاحظة توضيحية :** Piezoelectric تعني الكهرباء الإنضغاطية أو الكهروضغطية أو البيزوكهربائية هي خاصية لبعض المواد (وخصوصا البلورات ، وبعض المواد السيراميكية ، بما فيها العظم) على توليد جهد كهربائي إستجابة لتطبيق إجهاد ميكانيكي . فعند تطبيق ضغط على المادة تتقارب فيها بعض الشحنات الكهربائية مما يولد على طرفيها جهدا كهربائيا . وبالعكس عند تعرض تلك المواد لجهد كهربائي يتولد فيها إجهاد ميكانيكي ، أي قد تقصر أو تطول . لهذا الأثر تطبيقات مفيدة مثل إنتاج واستشعار الصوت ، وتوليد جهد كهربائي عالي ، توليد تردد إلكتروني ، الموازين الدقيقة .

### مراحل الهواء أثناء الإحتراق The stages of the air during combustion

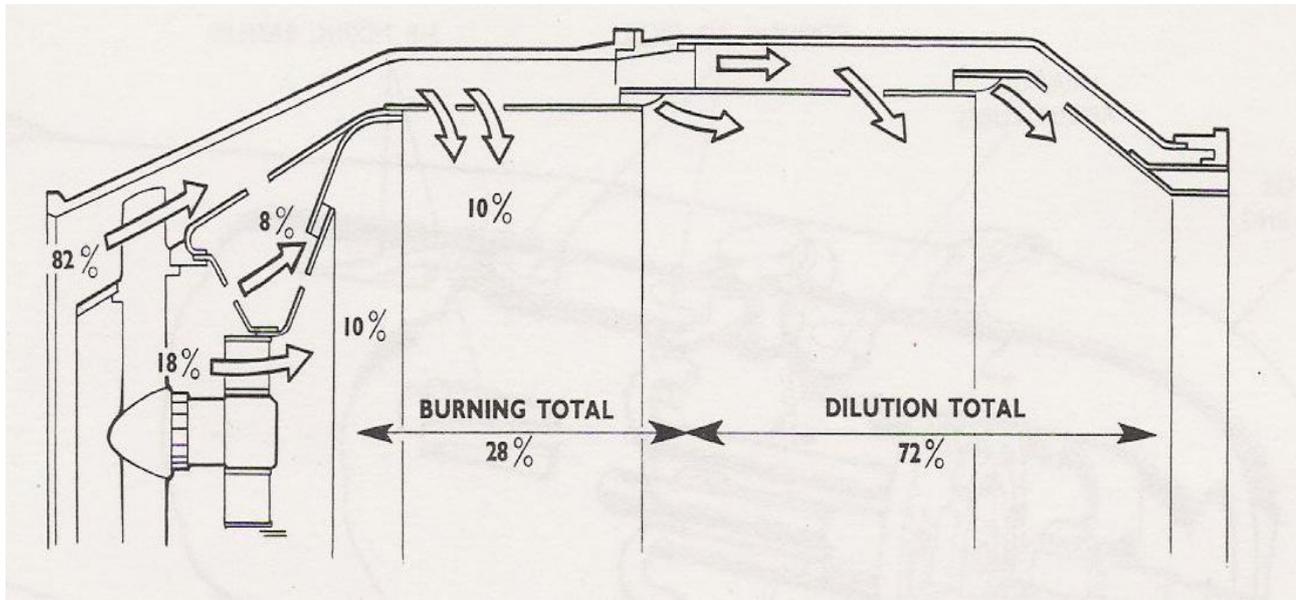
يحدث الإحتراق في ثلاث مناطق :

- (١) المنطقة الأساسية ( الأولية ) Primary zone ، حيث يتم إحراق معظم الوقود في حركة دوامة Vortex movement ويعاد فيها نشر وتوزيع وتداول Re-circulate الوقود عدة مرات ، مما يتيح الوقت على طول المسارات الحلزونية Spiral paths لكي يكتمل الإحتراق .
- (٢) المنطقة الثانوية Secondary zone ، حيث يتم إضافة مزيد من الهواء لتوفير حالة من الأوكسجين الزائد Excess oxygen حيث يمكن حرق جميع مكونات الإحتراق الأخرى بالكامل .
- (٣) المنطقة الثالثة Tertiary zone ، حيث يتم إضافة المزيد من الهواء من الضاغط لتخفيض درجة حرارة نواتج الإحتراق إلى درجة حرارة يمكن أن يتحملها التوربين . إن الوظيفة الرئيسية لهذه المنطقة هي ضمان إكتمال الخلط بحيث يتم تمرير تدفق منتظم Uniform flow إلى التوربين ، دون وجود مناطق أو مساحات ساخنة .



الشكل ( ٩٠ ) تقسيم الهواء إلى هواء إحتراق و هواء تبريد Combustion air & Cooling air

في التوربينات الغازية ، يدخل الهواء غرفة الإحتراق متنقلا بسرعة ( ١٥٠ متر في الثانية Meters per second ) . وتبلغ سرعة إنتشار اللهب في خليط الوقود \ الهواء النموذجي حوالي ( ٧ أمتار في الثانية ) . وبمقارنة هذه الأرقام ، يمكننا أن نرى أنه يجب علينا تقليل سرعة الهواء لتجنب إنطفاء اللهب على الفور .



الشكل ( ٩١ ) تقوم إضافة أنبوب اللهب بتوزيع تدفق الهواء بين المنطقتين الأساسية و التخفيف  
 Addition of flame tube distribute air flow between the primary & dilution zones

- من أجل توفير الظروف الملائمة لإحتراق مستقر Stable burning ، يتم إتخاذ التدابير الرئيسية التالية :
- ١ - يتم إبطاء تدفق الهواء عن طريق زيادة المقطع العرضي Cross-section لغرفة الإحتراق بعد دخول الهواء مباشرة .
  - ٢ - ينقسم تدفق الهواء إلى ثلاث مناطق (أولية ، ثانوية وثالثة) ، لتوفير هواء منظم ومتحكم به Controlled air للمساعدة في أغراض مختلفة (جزء للإحتراق وجزء للتبريد) .

### طرق تقليل إنبعاث أكاسيد النيتروجين الناتجة من غرف الإحتراق في التوربينات الغازية The various methods used to reduce NOx emission form gas turbines

تشمل طرق الحد من توليد أكاسيد النيتروجين ما يلي :

- ١- تقليل درجة حرارة الذروة للهب Flame peak temperature إلى أقل من ( ١٣٠٠ درجة مئوية ) ويمكن تحقيق ذلك عن طريق إدخال هواء المنطقة الثالثة Tertiary air على اللهب (لهب البريمكس) . هذه الطريقة يفضلها صنّاع التوربين الغازي في أوروبا .
- ٢- تعديل أو تحويل تصميم غرفة الإحتراق بحيث يحدث جزء صغير من الإحتراق تحت كمية الهواء النظرية Theoretical amount of air حيث تكون درجة حرارة اللهب أعلى .
- ٣- تخفيف اللهب بإستخدام الماء أو الحقن بالبخار Steam injection على المشاعل ، هذا سيمنع ( ٨٠ ٪ ) من تشكيل أكاسيد النيتروجين الخارجة عن السيطرة Uncontrolled . هذه الطريقة يفضلها صنّاع التوربين الغازي في أمريكا ، لاحظ أن إضافة حقن البخار سيزيد من القدرة المنتجة للتوربين الغازي بنسبة ( ٦ ٪ ) .
- ٤ - حقن الأمونيا Ammonia (NH<sub>3</sub>) في عادم التوربين الغازي للتفاعل مع أكسيد النيتريك Nitric oxide (NO) بوجود عامل مساعد أو محفز Catalyst . بما أن المحفزات الصلبة لها عمر قصير ، فإنه بشكل عام يتم إستخدام عملية إزالة النترات الرطبة Wet de-nitration process الأكثر استقرارا بإستخدام الأمونيا السائلة Liquid ammonia . عن طريق خلط غازات العادم Exhaust gases مع الأمونيا ، يتم تحويل أكاسيد النيتروجين إلى نيتروجين Nitrogen وماء غير ضار . كما في المعادلة الكيميائية التالية :



ملاحظة توضيحية : De-nitration هي عملية إزالة النترات أو غيرها من مركبات النيتروجين ، وخاصة من الماء ، النيتروجين

- إن تكلفة تشغيل Running cost عملية الأمونيا السائلة عالية ، لذا فإن قياسات ( NOx ) قبل وبعد عملية إزالة (NOx) مهمة لغرض المراقبة والتحكم (تقليل كمية الأمونيا التي يتم حقنها) .
- إن كمية أكاسيد النيتروجين المتولدة في اللهب الغني بالوقود Fuel-rich flame تكون منخفضة ، و مع إقتراب الهواء من مستوى الهواء النظري ، يزداد توليد أكاسيد النيتروجين ويصل إلى الحد الأقصى في الهواء الزائد Excess air ، ثم بإضافة الهواء الزائد لتهدئة وتبريد اللهب ، يتم تقليل إنتاج أكاسيد النيتروجين .
- لاحظ أن كمية أكاسيد النيتروجين المسموح بتوليدها أو تكوينها في جميع أنحاء العالم بالأونة الأخيرة يتراوح (من ٢٨ إلى ٦٠ جزء في المليون (part per million ppm) ) .

## طرق تقليل إنبعاث أكاسيد الكبريت الناتجة من غرف الإحتراق في التوربينات الغازية The various methods used to reduce SOx emission from gas turbines

تنتج أكاسيد الكبريت Sulfur oxides من حرق الكبريت Sulfur في الوقود بالأوكسجين من هواء الإحتراق ، وعادة ما يشار إليها باسم (SOx) . هذه المواد غير مرغوب فيها للغاية لأنها مكونات رئيسية للأمطار الحامضية Acid rain ، والتي تسبب أضرارا بيئية Environmental damage ، ويمكن أن تسبب أيضا تآكل شديد في المعدات severe corrosion of equipment . تشمل طرق تقليل توليد SOx ما يلي :

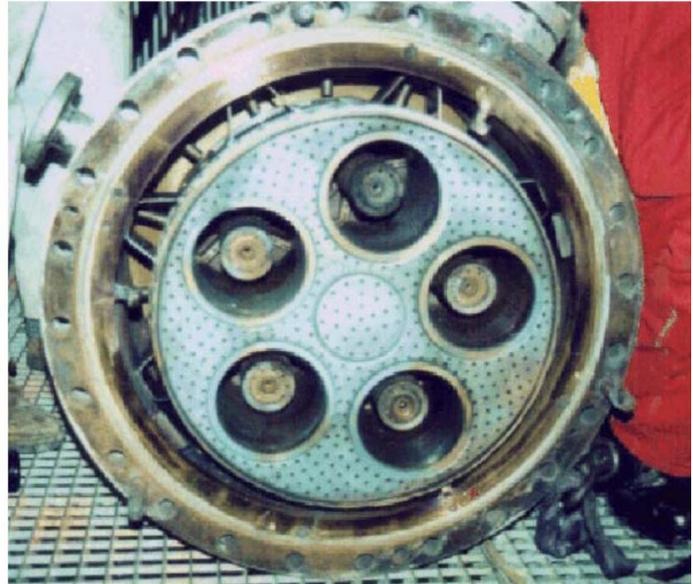
١ - تقليل كمية الكبريت في الوقود هو الحل الأكثر شهرة .  
٢ - التشغيل عند نسبة هواء زائد منخفضة Low excess air ratio هو الحل الأمثل لتقليل إنبعاث SOx ، لاحظ أن هذا الحل غير عملي في التوربينات الغازية ذات الدورة المركبة Combined cycle gas turbines لأن الهواء الزائد مطلوب لحرق أي وقود إضافي يضاف إلى مرجل إسترداد الحرارة Heat recovery (HRSG) steam generator (إحتراق تكميلي Supplementary firing) . لاحظ أنه يمكن إزالة الكبريت من الوقود عن طريق بعض المعالجات ولكن لا يمكن إزالة النيتروجين من الهواء .

ملاحظة توضيحية : HRSG يعني مولد بخار إسترداد الحرارة أو المرجل الإستردادي وهو عبارة عن مبادل حراري Heat exchanger الغرض منه إستخلاص الطاقة الحرارية من تيار غاز ساخن عادم للاستفادة من حرارته في توليد البخار لغرض إدارة توربينة بخارية Steam turbine أو إستعماله في عملية صناعية أو غير ذلك .

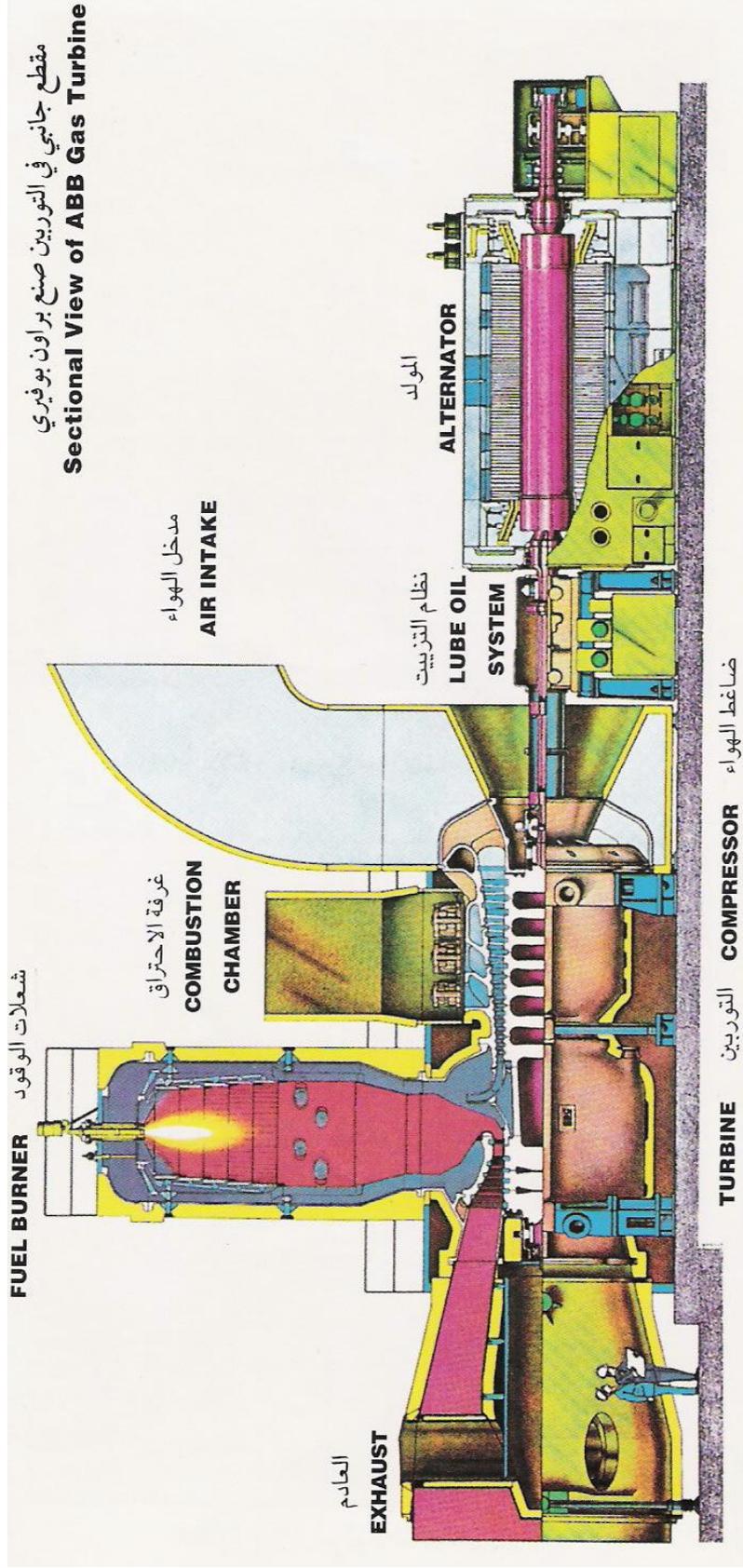


الشكل ( ٩٣ ) المشعل الهجين سيمنز  
(مشعل إنتشاري- بريمكس) تظهر دوامات  
محورية وقطرية بشكل واضح

Siemens hybrid burner (Diffusion-Premix burner)  
Axial & diagonal swirlers are clearly shown



الشكل ( ٩٢ ) مشعل G.E مع حقن الماء G.E. burner-water  
Injection



الشكل ( ٩٤ )