الخطة التفصيلية لاختصاص المضخات والتوربينات (السنة الثانية)

المادة/تقنية التوربينات البخارية والغازية

عدد الساعات الكلية: 128 ساعة عدد الساعات الأسبوعية: 4 ساعة عدد الاشهر الدراسية:32 شهر

ت	المفردات	عدد الساعات	اعداد
1	**– مفردات المنهج التفصيلية** **– مقدمة** – تاريخ تطور التوربينات – تعريفها – مبدأ عملها – أنواعها أ - اعتمادا على طريقة تشغيلها ب -اعتمادا على نوع المائع الذي يُديرها – محركات الاحتراق أ - تعريفها ب -أنواعها		بغداد
2	**الفصل الأول:-** **1 التوربين البخاري Steam Turbine** 1-1 تعريفه واستخداماته 1-2 مميزاته عن المحرك المكبسي 1-3 تصنيفه 1-3-1 تصنيف على أساس طريقة تمدد البخار أ -التوربينة الدفعية Impulse Turbine 1- البسيطة أو ذات المرحلة الأحادية / توربينة دي لافال (De Laval stage) simple or single stage 2- ذات السرعة المركبة / توربينة كيرتس (Curtis stage)velocity turbine 3- ذات الضغط المركب / توربينة راتيو (Rateau Stage)pressure compounded 4- ذات ضغط وسرعة مركبة velocity and pressure compounded turbines ب -التوربينة الرد فعلية Reaction Turbine - مقارنة بين توربين مركبة السرعة ومركبة الضغط ت -التوربينة الدفعية الرد فعلية Impulse & Reaction Turbine 1-3-2 تصنيف على أساس اتجاه جريان البخار أ - مع العلاقة بالمحور 1 -نصف قطريRadial 2 -موازي للمحور(محوري)Axial 3 -تماسي Tangential ب -مع الارتباط بالنظام 1 - جريان أحادي Signal Flow 2 - جريان ثنائي Double Flow 3 - حلزوني Helical		بغداد

		4 -المتكرر Repeated 1-3-3 تصنيف على أساس حالات الاستخدام 1 -تمددي Condensing or expanded ضغط نهائي منخفض Low back pressure 2 -غير تمددي Non-condensing or non-expanded ضغط نهائي عالي High back pressure 3 -توربينة استنزاف (Extraction) 4 -توربينة إعادة التسخين(Reheating turbine)	
3	4 1	الدورات الحرارية التي يعمل عليها التوربين البخاري 1-4-1 دورة رانكن المثالية والحقيقية البسيطة أ –أجراءتها مع المعادلات الخاصة بالدورة ب أمثلة تطبيقية 2-4-1 تأثير الضغط ودرجة الحرارة في دورة رانكن 3-4-1 محسنات دورة رانكن أ - دورة إعادة تسخين ب -دورة الاسترجاع - دورة مع مسخن مفتوح (OFWH) - دورة مع مسخن مغلق (CFWH)	بيجي
4	5 1	أجزاء التوربين البخاري 1-5-1 الأجزاء الثابتة 1-1-5-1 الغلاف Casing 2-1-5-1 النوزلات Nozzle 3-1-5-1 حلقة تثبيت النوزلات Nozzle Diaphragm 2-5-1 الاجزاء الدوارة Rotors parts 1-2-5-1المحور Shaft 2-1-5-1 القرص الدوار Disc 3-1-5-1 الريش الدوارة Moving blades أ- أجزاء الريشة ب-طرق ربط الريشة	بغداد
	6 1	مانع التسرب Seal 1-6- 1 تعريفه 2-6-1 أهميته 3-6-1 أنواعه	
	7 1	المحامل Bearings 1-7-1 تعريفها 2-7-1 أهميتها 3-7-1 أنواعها	
4	8 1	حاكم السرعة Speed governor 1-8-1 منظم السرعة الميكانيكي 2-8-1 منظومة نقل الحركة من منظم السرعة الميكانيكي إلى صمام البخار الرئيسي 3-8-1 منظومة نقل حركة هيدروليكية ذات محرك مساعد منفرد 4-8-1 منظومة نقل حركة هيدروليكية ذات محركين مساعدين 5-8-1 قاطع السرعة العالية	بغداد

5	1 9 بعض الملاحظات التي تخص الصيانة والتشغيل 1-9-1 تغير درجات الحرارة وتغير الحمل 1-9-2 نظافة ونقاوة زيت التزييت 1-9-3 معالجة مياه المرجل 1 10 المنظومات المساعدة 1-10-1 معدات تدوير المحور 1-10-2 منظومة التزييت 1-11 العطلات الرئيسية وطرق معالجتها		بغداد
6	امتحان		
7	**الفصل الثاني:** **2 التوربين الغازي Gas Turbine** 2 1 تعريفه واستخداماته 2 2 مميزات الوحدات الغازية مقارنة بالمحطة البخارية لنفس القدرة الحصانية المتوفرة فيها 2 3 عيوب الوحدات الغازية 2 4 أهم العوامل التي تساهم في زيادة القدرة (OUTPUT) للتوربين الغازي		بغداد
8	2 5 الدورات الحرارية التي يعمل عليها التوربين الغازي 2-5-1 دورة برايتون المثالية البسيطة المفتوحة Ideal Simple open Brayton cycle 2-5-2 دورة برايتون الفعلية البسيطة المفتوحة Actual Brayton open simple cycle 2-5-3 دورات حرارية محسنة للكفاءة أ - إعادة تسخين ب -إعادة تبريد ت -ذو مرحلتي تمدد		بيجي
9	2 6 أجزاء التوربين الغازي الرئيسية 2-6-1 الضاغطة 2-6-1-1 الضاغطة الطاردة عن المركز أ - مميزاتها ب -عيوبها 2 6 2 الضاغطة المحورية أ - مميزاتها ب -عيوبها ت -وصف الضاغطة المحورية ث -مبدأ عمل الضاغطة 2 6 3 ظاهرة التغير المفاجئ Surge Phenomenon 2 6 4 طرق التخلص من هذه الظاهرة		
10	2 6 2 غرفة الاحتراق combustion chamber 2-6-2-1 كيف تتم عملية الاحتراق 2 6 2 2 كيفية المحافظة على اللهبة 2 6 2 3 أنواع غرفة الاحتراق 2 6 2 4 مكونات غرفة الاحتراق - بعض العوامل المهمة في تصميم غرف الاحتراق		بغداد

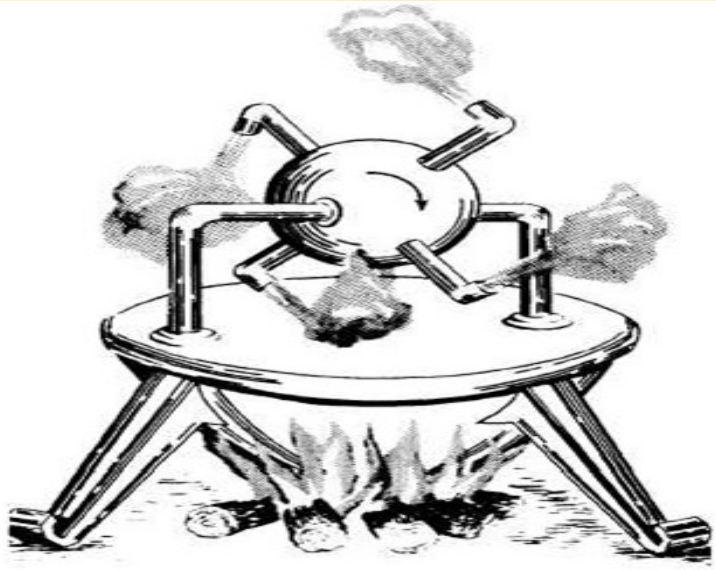
11	2 6 3 التوربينة TURBINE 2 6 3 1 اجزاء التوربينة 2 6 3 2 تركيب التوربين ودورة الغاز فيه 2 6 3 3 الاجهادات التي تتعرض لها ريشة التوربينة		بغداد
12	2 7 المنظومات المساعدة لتشغيل التوربين الغازي 1 منظومة ترشيح الهواء air filter system 2 منظومة زيت التزييت lubricating oil system 3 منظومة تجهيز الوقود fuel system 4 منظومة تجهيزالهواء air system 5 منظومة السيطرة control system 6 منظومة بدء التشغيل starting system 2 8 صناديق السرع Gear Box 2 9 خطوات تشغيل التوربين وتحميله ومراقبته		كركوك
13	2 10 الفحوصات والصيانة الشاملة والاضطرارية للتوربينات الغازية 2 11 تشخيص العطلات التي تطرأ عند تشغيل التوربين الغازي وملحقاته وطرق معالجتها Fault Finding During Operation Of Gas Turbines & Auxiliaries 2-12 ظاهرة الكبرته او التأكسد الحارSulfidation or Hot Corrosion 2-12-1 العوامل التي تعتمد عليها عملية التأكسد الحار 2-12-2 طرق منع حصول التأكسد الحار او التقليل منه		بغداد
14	2-13 غسل ريش ضاغطة الهواء Compressor blaedsWashing 1 - عملية الغسل بتدوير الضاغطة Crank soak washing 2 - عملية الغسل اثناء التحميل بالقذف بالجسيمات On-load particle washing 3 - عملية الغسل اثناء التحميل بالسوائل On-load liquid washing		بغداد
15	2- 14تطابق محاور المكائن الدوارة Alignment 2-14-1 عدم تطابق المحاور وحالاته 2-14-2 اسباب زيادة عدم تطابق المحاور misalignment 2-14-3 مقدار الحيد عن تطابق المحاور المسموح به allowable misalignment 2-14-4 كيفية تحديد الحدود المقبولة للحيد عن تطابق المحاور 2-14-5 طرق قياس تطابق المحاور Alignment measuring methods أ - طريقة مقياسي المؤشر ب -طريقة مقياس المؤشر المعاكس ت -طريقة الاكيولاين Acculign Method ث -طريقة داينالين Dvnalign Method_ ج -الطريقة البصرية Optical Method ح -طريقة انديكون Indicon Method		بغداد
16	امتحان		
	عدد الساعات الكلية		**128**

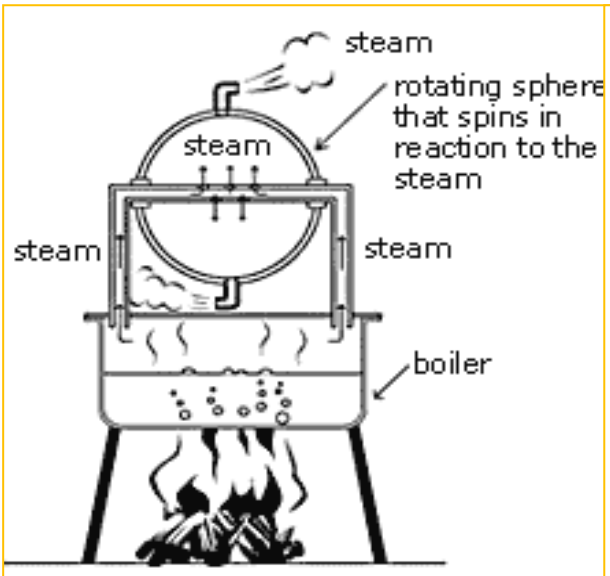
مقدمة :

عجلات الماء هي من أقدم أنواع التوربينات المعروفة. فلقد استخدمها الإغريق القدامى منذ عام 100ق.م لطحن الحبوب وعصر الزيتون. وبحلول القرن الرابع الميلادي، أدخل الرّومان العجلة المائيّة (الساقية) إلى أنحاء عدة في أوروبا.

وكانت أول طاحونة هوائية قد تم أنشاؤها في بلاد فارس (إيران حاليًا) في القرن السابع الميلادي، وكانت تستخدم هذه الطواحين الهوائية لطحن الحبوب وريّ المحاصيل. وفي القرن الثاني عشر الميلادي انتشرت هذه الطواحين في أوروبا ايضا . وفي القرن الخامس عشر الميلادي بدأ الناس في هولندا استخدام الطّواحين الهوائيّة لصرف مياه المستنقعات والبحيرات الواقعة بالقرب من البحر.

بقيت عجلات الماء وطواحين الهواء لعدّة قرون هي التوربينات الوحيدة المفيدة حتى صنع العالِم هيرو الإسكندري توربين بخار صغير الحجم في عام 130 قبل الميلاد وهو عبارة عن غلاية، مثبت فيه انابيب باتجاه متعاكس مجوفة تسمح للبخار المتولد في الغلاية للخروج منها باتجاه معاكس للانبوب الاخر مما يسبّب دوران الغلاية بسرعة اعتمادا على قوة النفث للبخار الخارج من الانابيب قيل بأنه إستعمل هذا الإختراع لفتح أبواب المعبد في ذلك الزمان وكما موضح بالشكل ادناه.





شكل توربينة هيرو الاسكندري

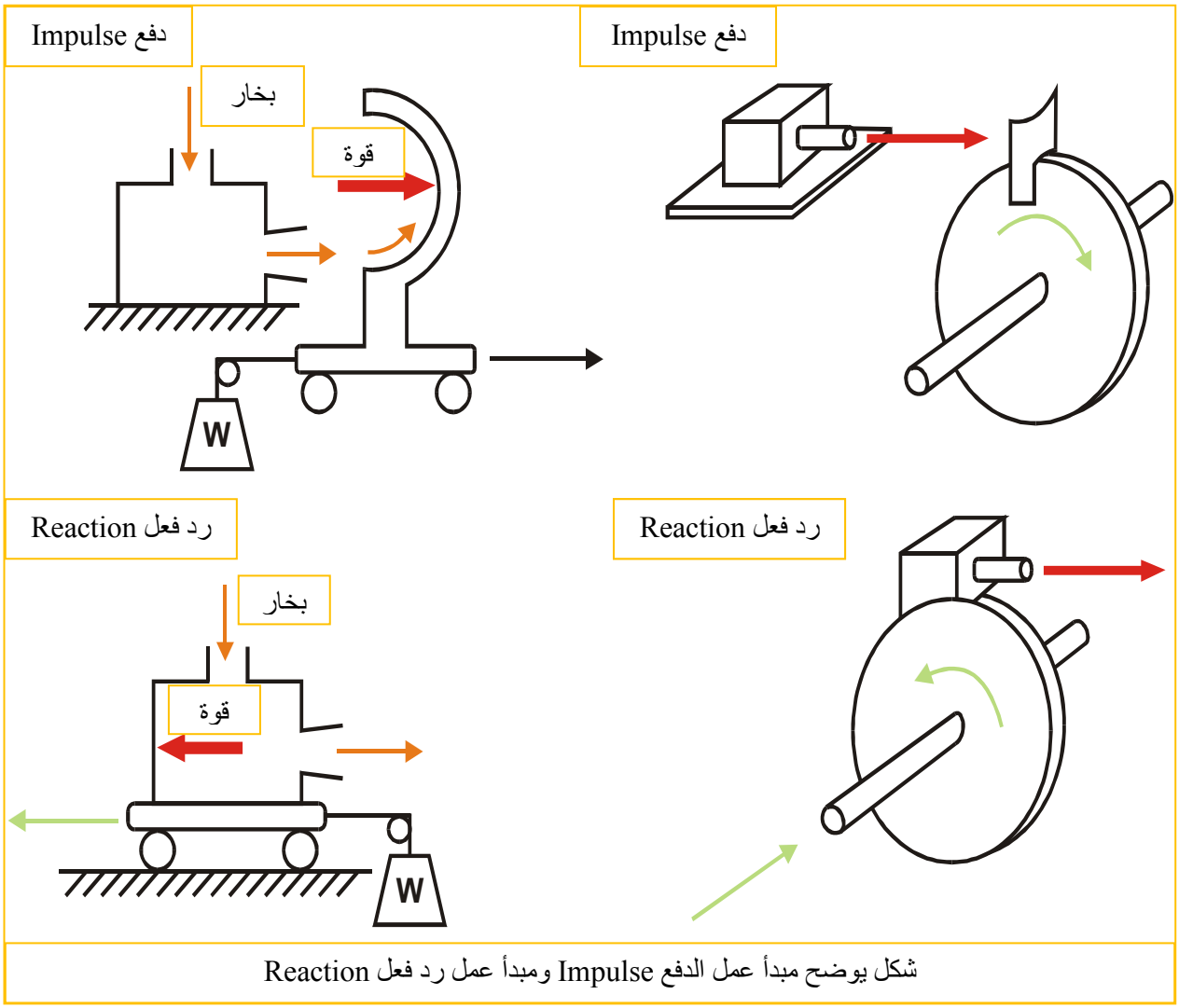
ان العجلات المائية والطواحين الهوائية أقل فعالية من التوربينات الحاليّة لأن معظم السّائل المتحرك ينساب حول أطراف مراوح العضو الدوّار فيها حتى القرن التاسع عشر الميلادي حيث بدأ المهندسون والمخترعون بتطوير توربينات مغلقة ذات فعاليّة أكبر. ففي عام 1824م، أدخل المهندس الفرنسي، كلود بيردن، كلمة **توربين** عن طريق تقديم ورقة علمية قدمها من قبله . ويعود أصل هذه الكلمة من اللفظ **تيربو**، وهي كلمة لاتينية **تعني الجسم الذي يدور** .في عام 1827م أنشأ المهندس الفرنسي بنوا فورنيرون أول توربين مائي مغلق ناجح، وبعد نجاح فورنيرون تغلّب المهندسون على معظم العقبات التي حالت دون إنشاء توربين مائي فعال.

تعريف التوربينات بشكل عام (العنفات Turbines):

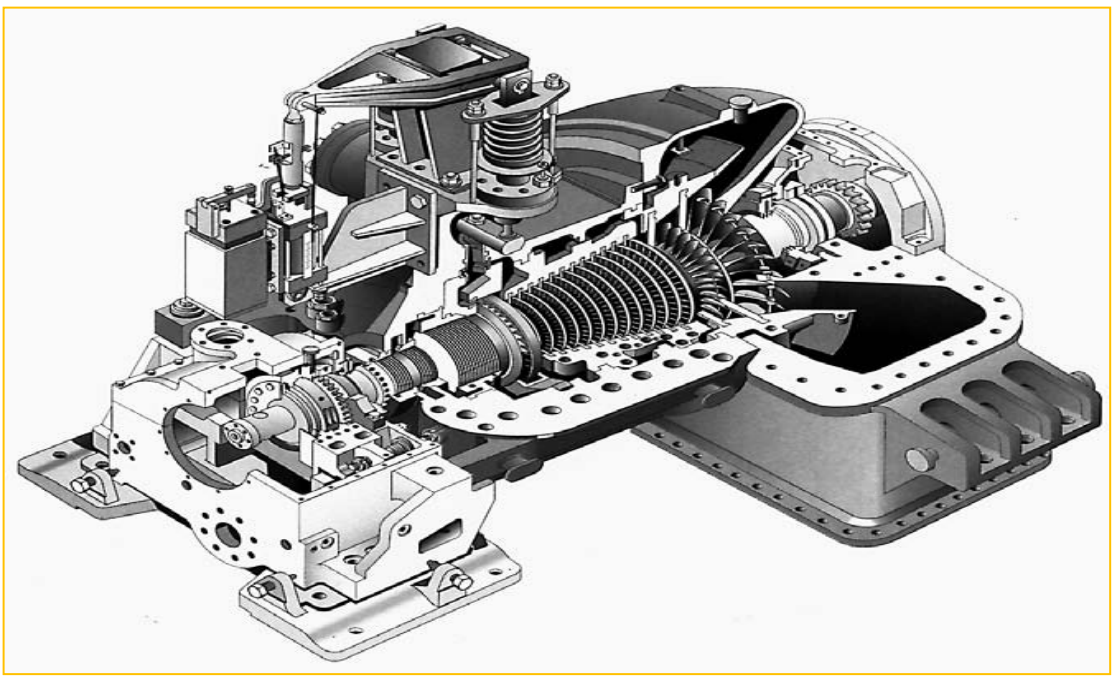
التُّوربِين هو محرك ذو عضو دوّار، يديره سائل أو غاز متحرّك، مثل الماء والبخار والغاز والهواء، ويسمى أيضًا العنَفَة. ويستخدم لتحريك الآلات الأخرى عن طريق دوران المحور في المولّدات الكهربائيّة ومضخات الماء و لتدوير مراوح السّفن وتُعدُّ جزءًا مهمًّا في محّرك الطّائرة النّفاثة.

مبادئ تشغيل التوربين بشكل عام:-

تدور عجلات التوربين بتأثير الدفع أو رد الفعل او كليهما. فلعبة الفرارة مثلاً، التي تبين توربين دفع بسيط، تدور بالنفخ عندما يهب الهواء على الشفرات. ورشاشة الماء في الحديقة مثال بسيط لتوربين رد الفعل. فالماء المندفع منها إلى الخارج تحت الضغط يؤدي إلى تدوير العجلة .



شكل يوضح مبدأ عمل الدفع Impulse ومبدأ عمل رد فعل Reaction

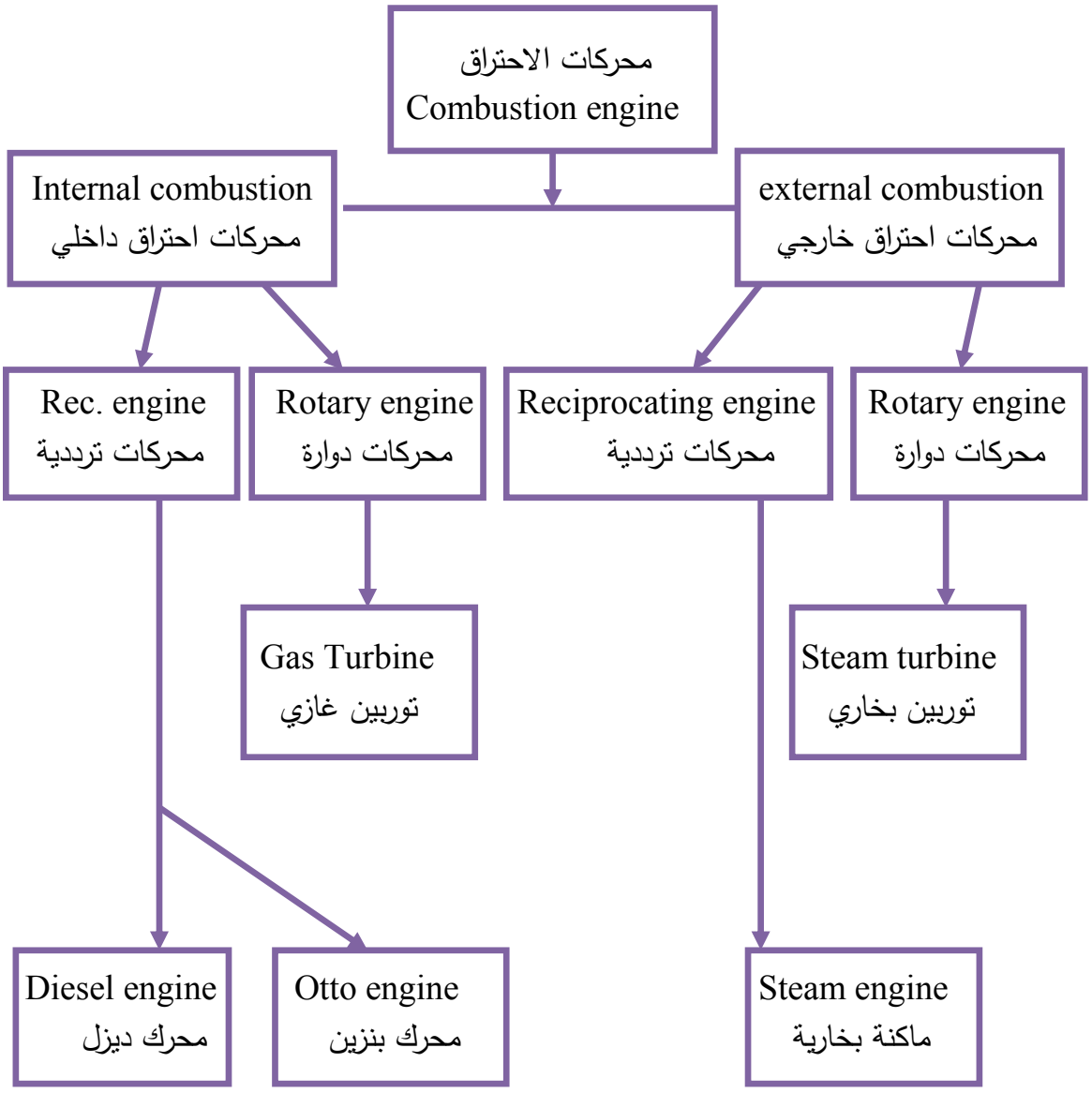


محركات الاحتراق (combustion engine)

وهي معدات من خلالها يمكن تحويل الطاقة الحرارية والاستفادة منها بطاقة ميكانيكية في تشغيل حمل (load) مثلاَ-[سيارة ، مضخة ، ضاغطة ، مولدة]

ملاحظة: محركات الاحتراق الداخلي هي المحركات التي تنجز نواتج الاحتراق بصورة مباشرة على الجزء الفعال في المحرك (يكون مجال الاحتراق من ضمن اجزاء المحرك)

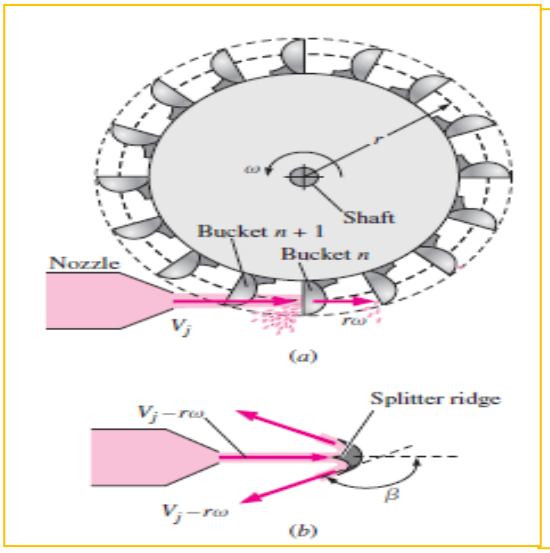
مخطط يبين تصنيف محركات الاحتراق

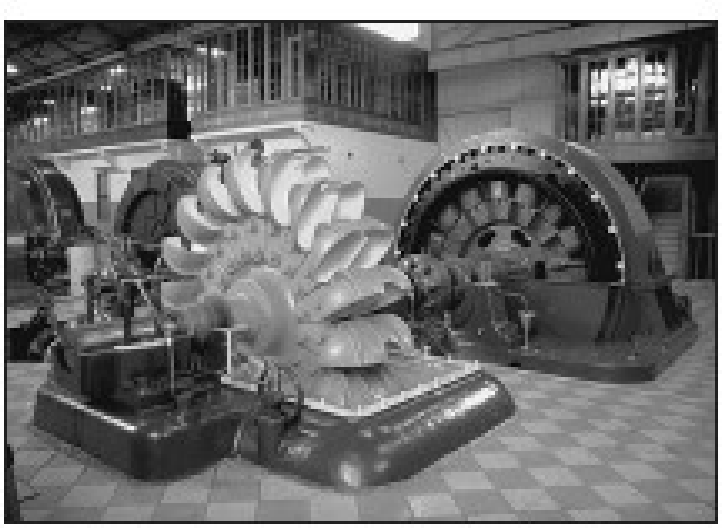


أنواع التوربينات (العنفات)Turbines Types:

1- تُقَسّم التوربينات حسب طريقة تشغيلها:-

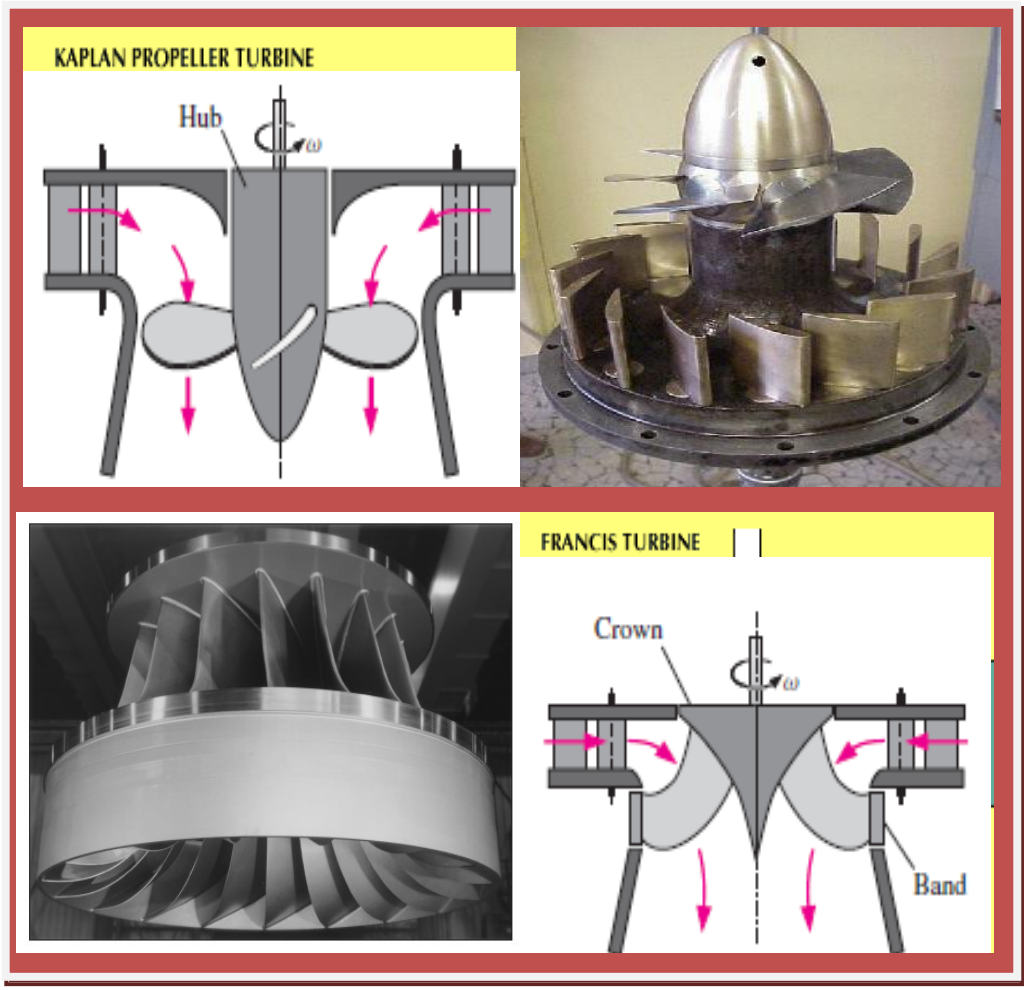
أ- توربينات الدّفع impulse turbines (توربين الدّفع يستفاد من قوّة ارتطام المائع بالريش فيسرع الحركة عندها للعضو الدّوار ويؤدي شغل) مثال على توربينات الدفع بيلتون توربين *Pelton turbines*.





ب- توربينات ردّ الفعلreaction turbines (توربين رد الفعل، يدور العضو الدّوار نتيجة لضغط المائع على الريشات) مثال على توربينات رد الفعل :

1-Francis turbines
فرانسيس توربين
2-Kaplan turbines
كابلن توربين
3-Bulb turbines
بالب توربين



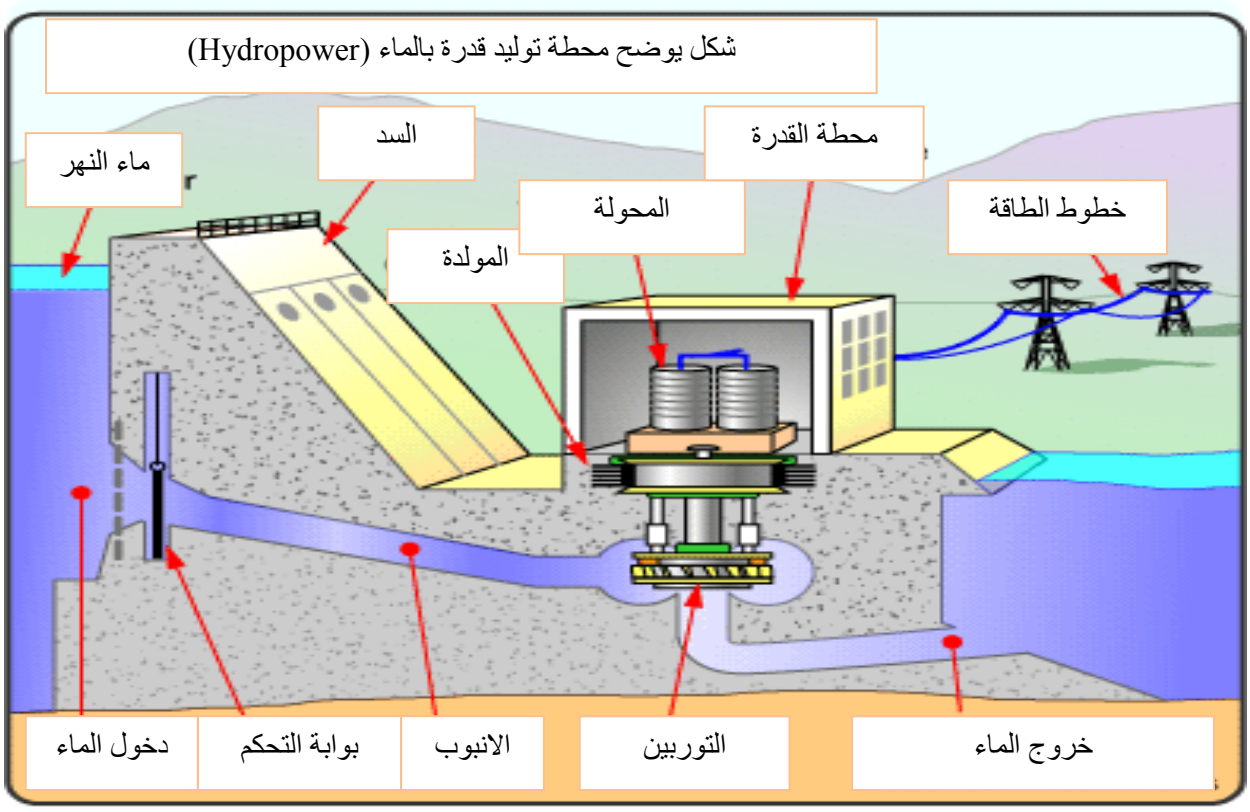
2- تقسم التوربينات اعتمدا على نوع المائع الذي يُديرها؛ وطبقًا لهذا التقسيم، هنالك أربعة أنواع من التوربينات:

أ- التوربين المائي
ب - التوربين الهوائي
ج- التوربين البخاري
ح- التوربين الغازي.

أ- التوربين المائي **
يسمّى كذلك التوربين الهيدرولي. معظم التوربينات المائية مياه مخزّنة خلف سدود. وتستخدم هذه التوربينات في تشغيل مولّدات كهربائية في محطّات القدرة الكهرومائية. وهناك ثلاثة أنواع رئيسيّة من التوربينات المائية:
1- عجلة بلتون
2- توربين فرانسيس
3- توربين كابلن.

ويعتمد نوع التوربين المستخدم في أي مصنع على ارتفاع الضّغط الموجود. وارتفاع الضّغط هو المسافة التي تسقطها المياه قبل أن ترتطم بالتوربين. ويتدرج ارتفاع الضغط من حوالي مترين ونصف المتر إلى أكثر من 300م.

من الانواع التي سناخذ شرح بسيط عنه هي عجلة بلتون: وهي توربينة تعمل بالدّفع وتستخدم عندما يكون ارتفاع الضّغط أكثر من 300م. يتكوّن العضو الدّوار في عجلة بلتون من عجلة واحدة فقط مركّبة على محور أفقي. وهذه العجلة فيها اناء على شكل أكواب مركبة على محيط قرص يسقط الماء عليه من بحيرة أو خزّان من خلال أنبوب طويل. وتزيد الهنافث (عددها من واحد إلى سِتّة) الموجودة في نهاية القناة، من سرعة تدفّق الماء، وتوجّه الماء إلى الاواني الموجودة على العجلة، فتدير قوة هذه النوافير المائية عالية السّرعة العجلة.



ب- التوربينات الهوائية **

وهي مشهورة باسم الطواحين الهوائية، وتشغلها الرياح. طوّرت هذه التوربينات قبل حوالي 1300 سنة، وكان استخدامها الرئيسي في الماضي هو طحن الحبوب وضخ الماء. وفي نهاية القرن الثّامن عشر الميلادي كان استخدام الطواحين الهوائية قد انتشر في بلدان كثيرة في جميع أنحاء العالم. وفي القرن التاسع عشر الميلادي، بدأ في بعض البلدان استبدالها بتوربينات مغلقة ذات فعاليّه أفضل. وخلال السبعينيات من القرن العشرين، أدى نقصان النفط إلى زيادة الرغبة في استخدام التوربينات الهوائية لتوليد الكهرباء ، هناك نوعان رئيسيان من التوربينات الهوائية:

1 -التوربين الهوائي ذو المحور الأفقي

2- التوربين الهوائي ذو المحور العمودي.

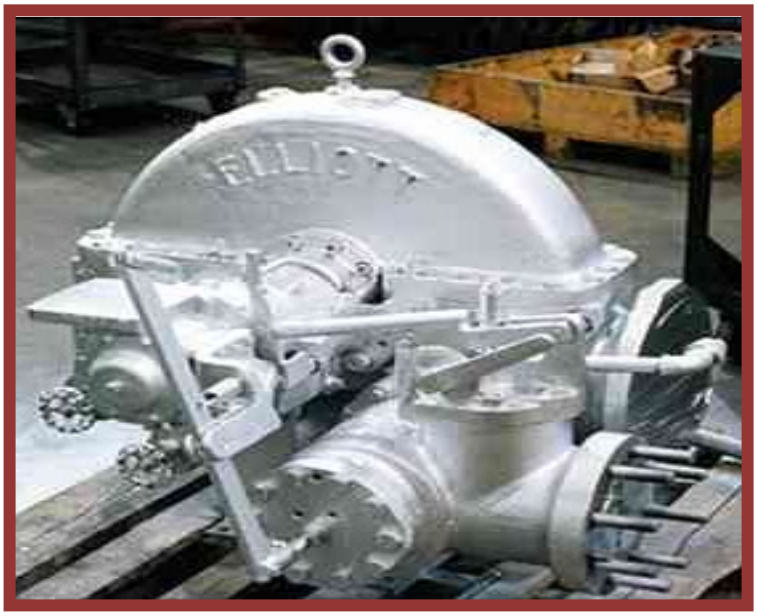
التوربينات الهوائية ذوات المحاور الأفقية: المتعارف عليه من هذا النّوع يكون فيه أعضاء دوّارة من عدة مراوح أو ريشات ويدخل ضمنها الطواحين الهوائية الهولندية والطواحين الهوائية الأمريكيّة .

الفصل الاول

التوربين البخاري

Steam Turbine

1- التوربين البخاري (steam turbine)



1-1 تعريف التوربين البخاري:-

وهو نوع من المحركات ذات الاحتراق الخارجي والتي من خلالها تتحول طاقة الحرارية للبخار الى شغل ميكانيكي وذلك في خطوتين واضحتين هي:-

1 -الطاقة الحرارية الموجودة بالبخار الداخل إلى التوربين والتي يتم تحويلها الى طاقة حركية بواسطة الفوهات (النوزل أو النفاث) والتي من خلالها يخرج البخار كنفاث بسرعة عالية.

2 -الطاقة الحركية يتم تحويلها إلى طاقة ميكانيكية بواسطة توجيه نفاث البخار مباشرة إلى الريش المثبتة على العضو الدوار أو بواسطة رد فعل النفاث نفسه في الممر المتمدد أذا كان الممر دوار.

المرحلة Stage:-

هو ذلك الجزء في الوحدة والذي فيه يحدث انخفاض ضغط أحادي مثل (الفوهة(النوزل) أو صف من الريش الثابتة) أو انخفاض السرعة مثل الريش الدوارة.

وهكذا فإن مرحلة الضغط هي المرحلة التي فيها يحدث انخفاض أحادي من خلال الفوهة وصف واحد أو أكثر من الريش الثابتة، ومرحلة السرعة هي المرحلة التي يكون هناك انخفاض أحادي في السرعة خلال صف واحد من الريش الدوارة.

وقد تطور التوربين البخاري نتيجة لقابليته على الاستفادة القصوى من تمدده إلى أحجام تعادل عدة مئات من المرات من حجمه الأصلي بعد مروره بالريش الدوارة وبذلك تستطيع امتصاص اكبر قدر ممكن من طاقته الحرارية وتحويلها إلى طاقة حركية ولم يكن ذلك ممكنا في ماكنة البخار المكبسية لأن تمدده فيها كان محدداً بحجم الاسطوانة فلا يمكن تمدد البخار والاستفادة من طاقته القصوى كما في التوربين الدوار.

2-1 مميزات المحرك البخاري (steam turbine) عن المحرك الديزل لنفس القدرة الحصانية المتوفرة :-

1- يحتاج الى مساحة اصغر

2- استهلاكه لزيت التزييت اقل.

3- عزمه التدويري منتظم.

4- لا يصاحب تشغيله اهتزازات عالية لعدم وجود الحركة الترددية.

5- يقل الاحتكاك فيه لعدم تماس الاجزاء المتحركة والثابتة إلا في أماكن المحامل.

6- كفاءته عالية وقادر على تحمل الاحمال الزائدة.

7- تكاليف الصيانة قليلة.

8- يعمل بصورة مستمرة لفترات اطول من محرك الديزل

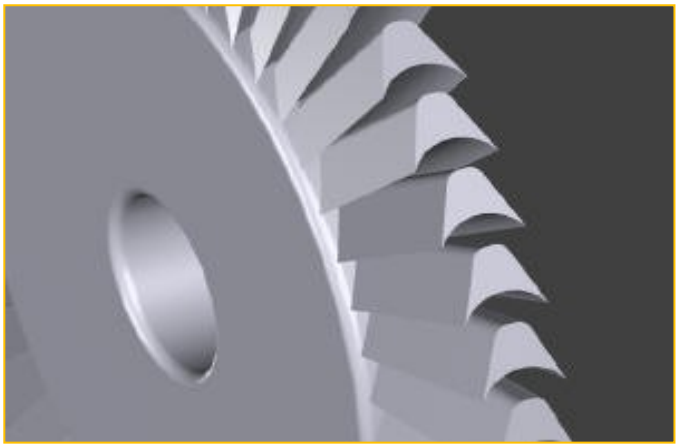
3-1 تصنيف التوربين البخاري :-

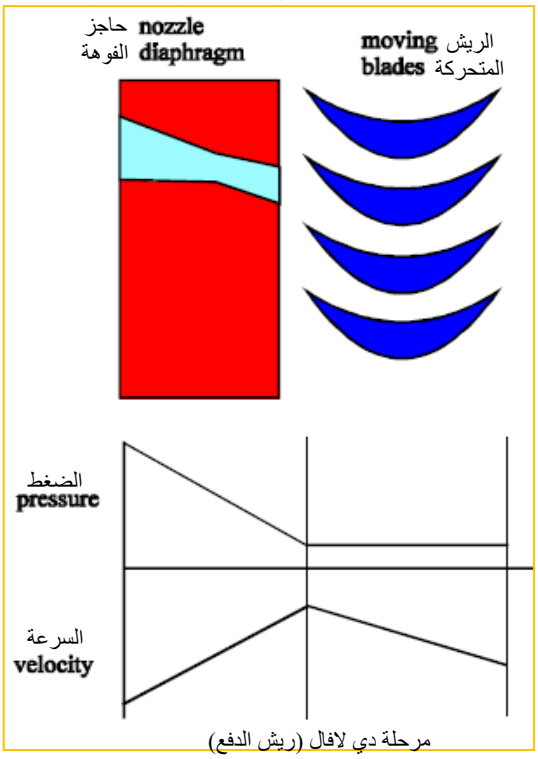
1-3-1 تصنيف على أساس طريقة تمدد البخار

أ- التوربينة الدفعية Impulse Turbine

1- البسيطة أو ذات المرحلة الأحادية De Laval stage simple or single stage)

في هذا النوع من التوربينات يتمدد البخار كلياً ويفقد ضغطه في النوزلات (nozzle) ونتيجة تغيير اتجاهه عند الخروج من النوزل (nozzle) يصطدم بالريش الدوارة من نوع زخم Impulse فتتولد قوة تدور الريش فتنخفض سرعة البخار مع ثبوت الضغط (يبقى ضغط البخار ثابت في الريش من نوع الزخم) كما في الشكل (1) (مرحلة De Laval stage للريشة الدفعية)

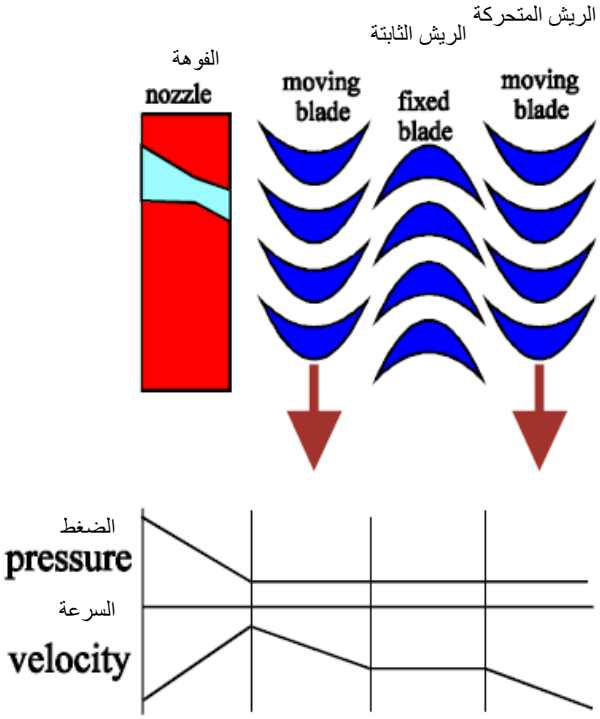




شكل(1) يوضح(مرحلة دي لافال)

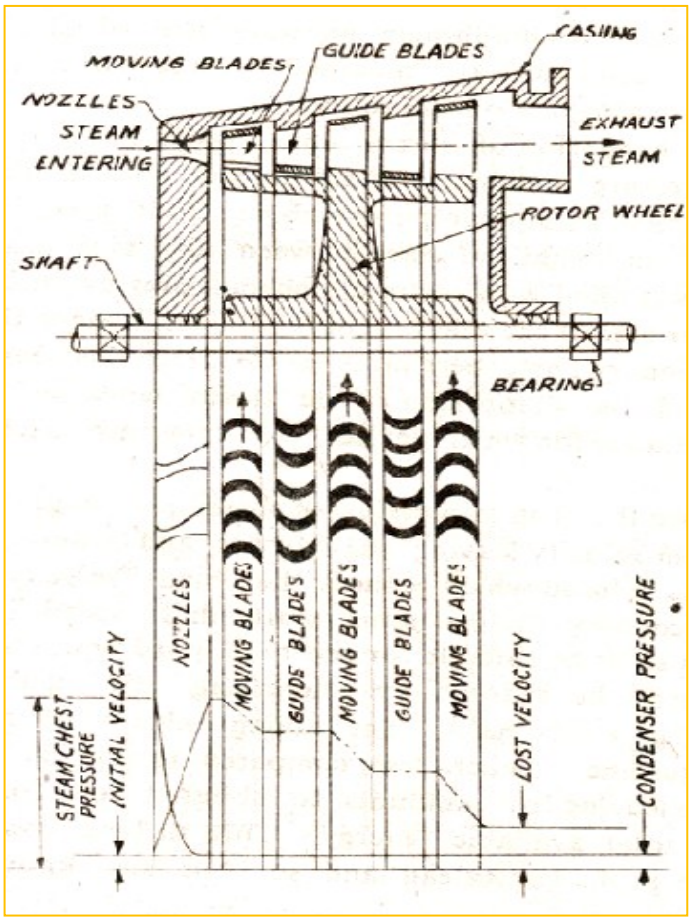
2 ذات السرعة المركبة velocity compounded turbine (CRUTIS stage)

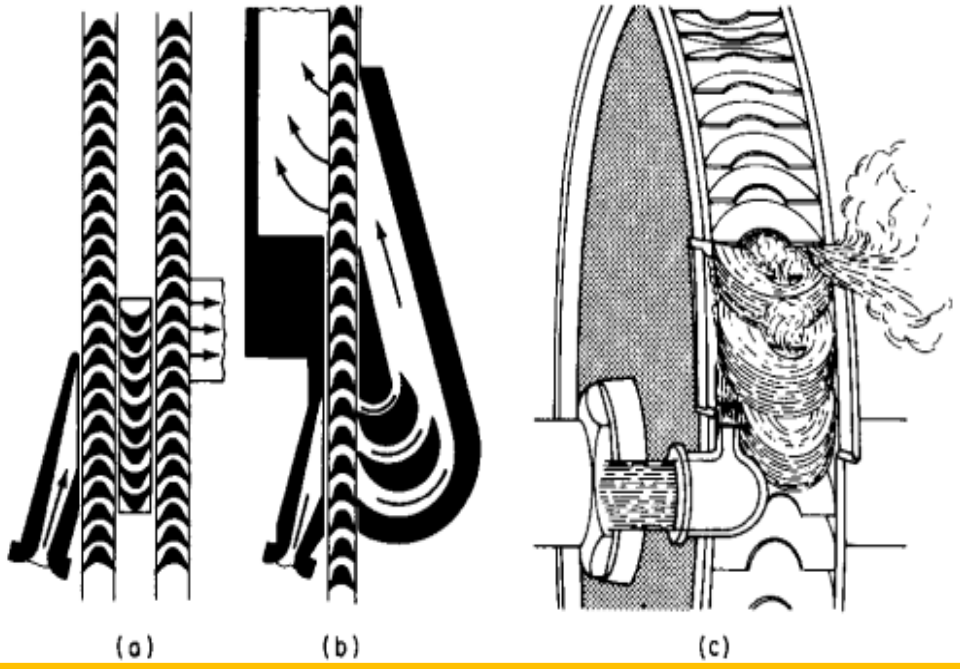
توربينة كيرتس (توربينة زخم بمركبة سرعة)



شكل(2) لتوربينة زخم بمركبة (سرعة)

تتكون توربينة السرعة المركبة (كيرتس) من مرحلة نوزل التي يتم فيه انخفاض الضغط وزيادة السرعة وصفين من الريش المتحركة نوع الزخم التي لا يتغير فيهما الضغط ولكن تتغير السرعة مع توسط لصف من ريش نوع الزخم تقوم بتوجيه البخار بين صفي الريش المتحركة دون ان تغير بالسرعة او الضغط. وبما ان الريش الثابتة والمتحركة ذات زوايا متساوية لذلك البخار المار لا يتغير فيه الضغط ولكن تتغير السرعة ، وتقل من الصف المتحرك الاول الى الصف المتحرك الثاني بنسبة النصف لكل منهما من سرعة البخار الداخلة كما موضح في الشكل (2) حيث تبين تغيرات الضغط والسرعة.



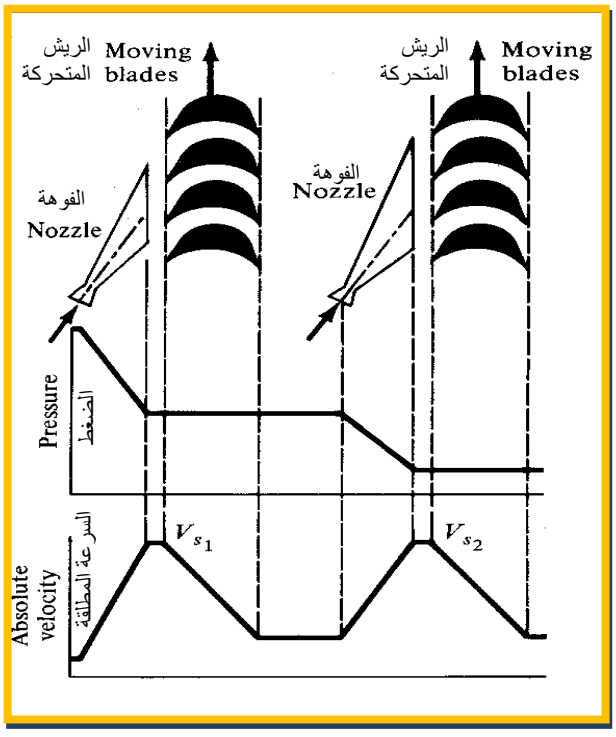


شكل يوضح مراحل مركبة السرعة: (a) مرحلة كيرتس; سريان البخار مرة واحدة خلالالريش المتحركة; (b)مرحلة اعادة دخول(او متكرر); سريان البخارة مرتان خلال الريش المتحركة (الدوارة) ; (c) مرحلة اعادة دخول; سريان البخار ثلاث مرات خلال الريش المتحركة (طبع النموذج من محطة قدرة في تموز

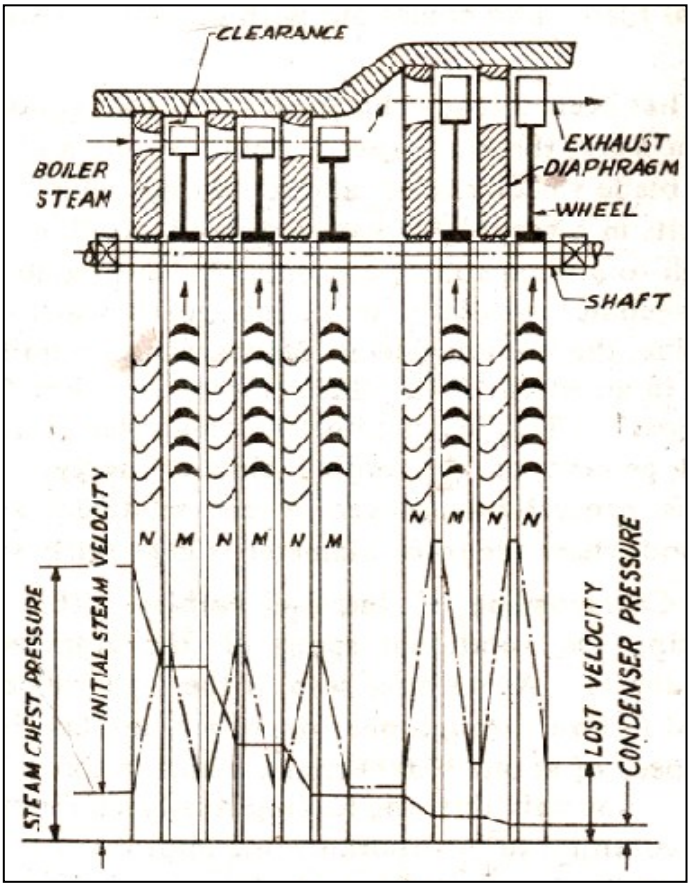
3 -ذات الضغط المركب pressure compounded

(توربينة رايتوRateau stage) توربينة زخم بمركبة ضغط

في توربينة الضغط المركب يكون فيها انخفاض الضغط على مرحلتين حيث تتكون من مرحلتي نوزل وصفين من الريش المتحركة نوع الزخم وكما موضح بالشكل (3) حيث يبين تغيرات السعة والضغط ويكون تغير السرعة متساوي خلال صفي الريش المتحركة

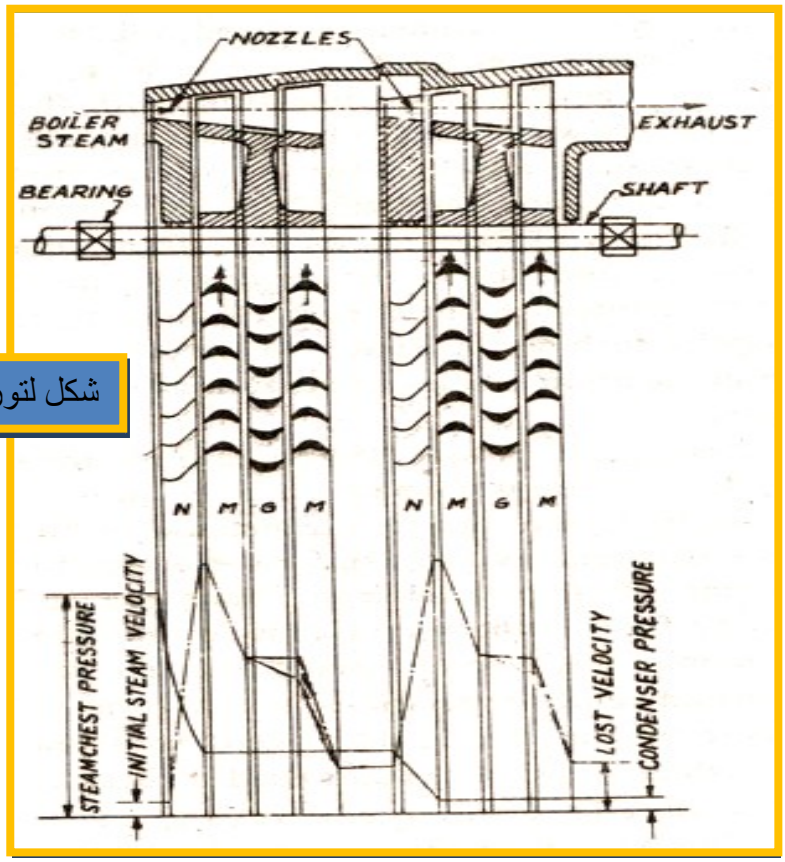


شكل(3) لتوربينة زخم بمركبة (ضغط)



4 ذات ضغط وسرعة مركبة velocity and pressure compounded turbines

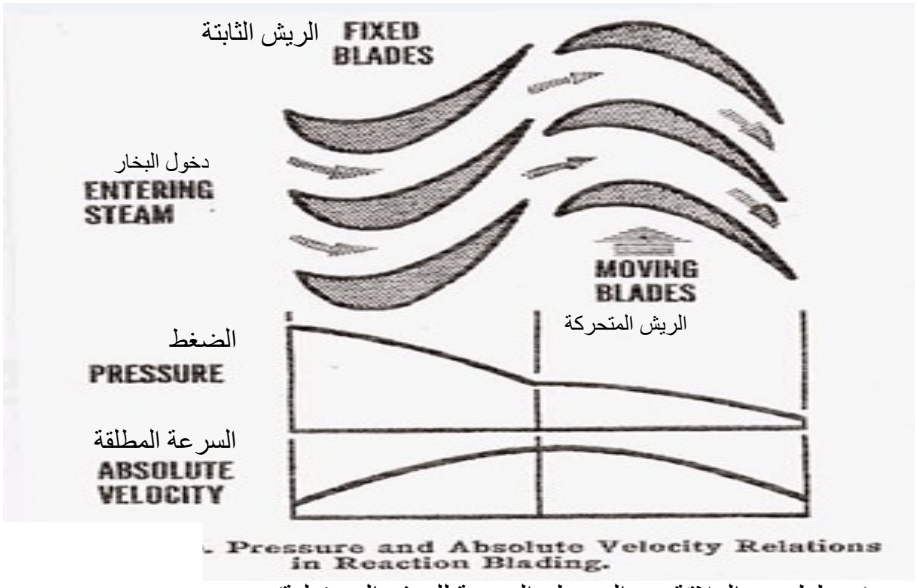
تزداد كفاءة التوربينات الكبيرة عند استخدام مركبة الضغط والسرعة في تصميمها لان السرعة العالية التي تتولد من النوزلات للمرحلة الاولى وللمرحلة الثانية تمكنها من استخدام عدة مراحل لصفوف الريش المتحركة والثابتة مما يزيد من القدرة الخارجة من التوربين



شكل لتوربينة زخم بمركبة (سرعة – ضغط)

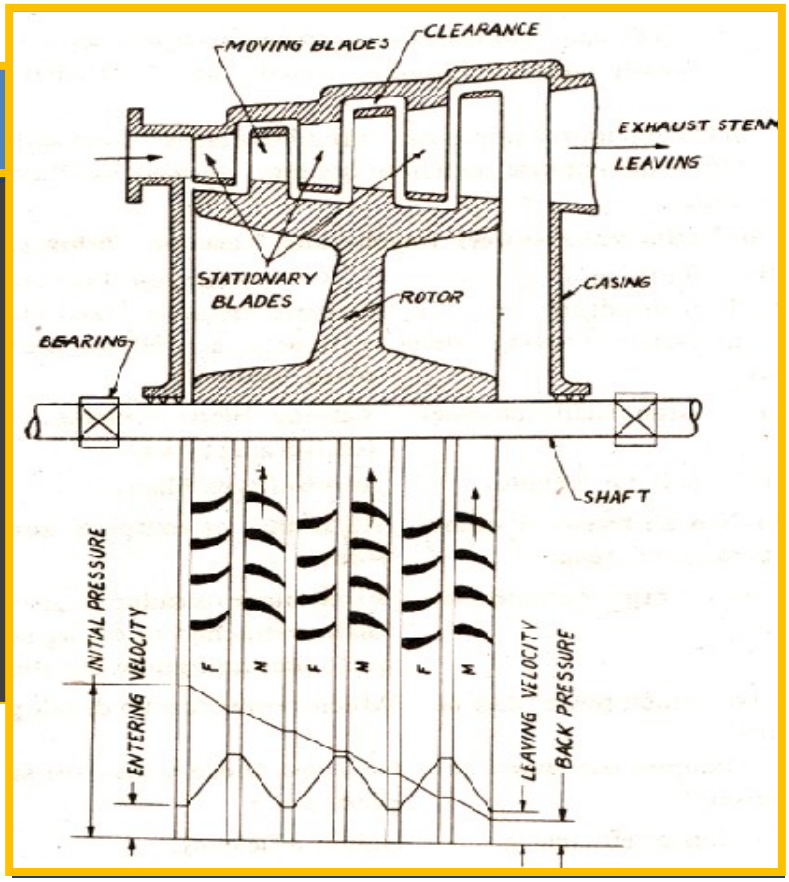
ب-التوربينة الرد فعلية Reaction Turbine

في هذا النوع من التوربينات عندما يدخل البخار على الصف الأول من الريش الثابتة التي تعمل عمل النوزل في التوربين تستغل طاقته الحرارية ويتمدد فينخفض ضغطه وتزداد طاقته الحركية ثم يتوجه إلى الصف الثاني من الريش الدوارة من نوع Reaction رد الفعل فتستغل طاقته المتبقية وتتمدد مرة أخرى فينخفض ضغطه وتنخفض سرعته أيضا نتيجة استغلالها في تدوير هذا الصف من الريش فالذي نلاحظ إن طاقة البخار في هذا النوع من التوربينات تقل تدريجياً كلما ازداد عدد المراحل وتسمى مرحلة بارسون .Parsons stage



(مخطط يبين العلاقة بين الضغط والسرعة للريش الرد فعلية)

شكل لتوربينة رد فعل بمركبة (ضغط)



- مقارنة بين توربين مركبة السرعة ومركبة الضغط:-

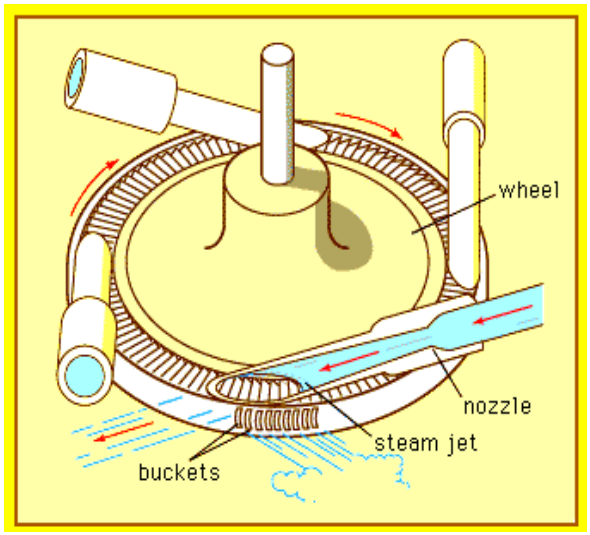
توربينة مركبة الضغط	توربينة مركبة السرعة
1-هبوط السرعةِ مساوٍ لكُلّ مرحلة	**1- هبوط السرعة غير متساوي لكل مرحلة**
2- هبوطَ ضغطِ غير متساوي لكلّ مرحلةِ	**2- هبوط ضغط متساوي لكل مرحلة**
3-القدرة المتساوية لكلّ مرحلةِ	**3- القدرة غير متساوية لكل مرحلة**
4-خسائر الإحتكاكِ المنخفضةِ بسبب سرعةِ بخارِ مخفّضةِ	**4- خسائر الاحتكاك عالية بسبب السرعة العالية للبخار**
5-يوصى به للتوربينات المتعددة المراحل	**5- غير مجدية لاكثر من مرحلتين**
6-تسرب البخار كبير	**6- لاتوجد هناك مشاكل بالتسرب بالنسبة للبخار**
7-مناسبة للتوربينات الكبيرة	**7- مناسبة للتوربينات الصغيرة وايضا للتوربينات الكبيرة ذات المرحلة الواحدة**

تطورات التوربين البخاري حسب تصميم الريش

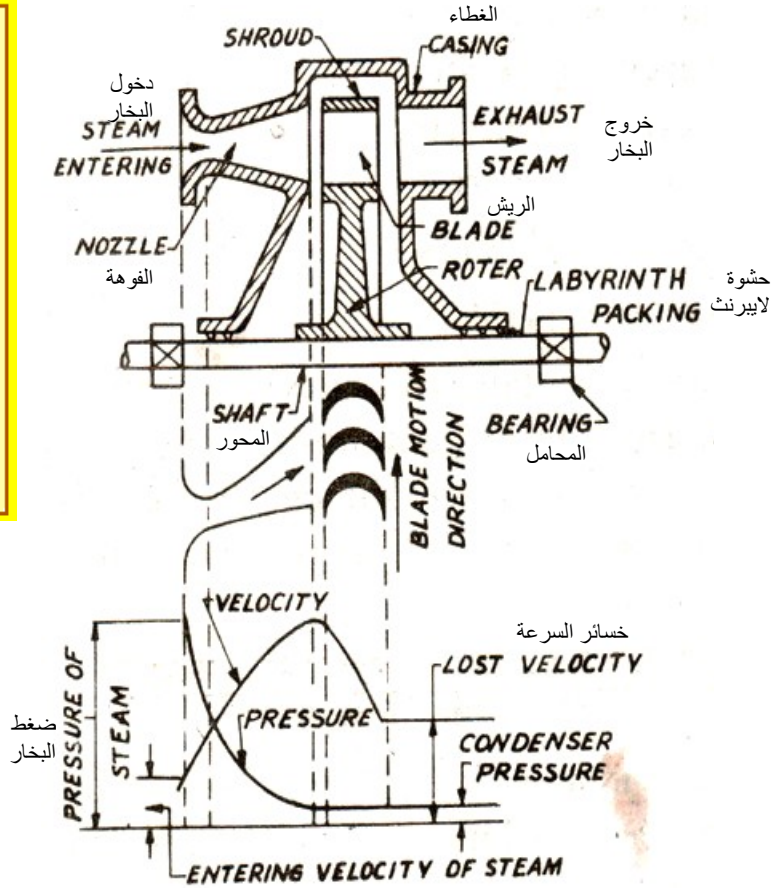
Steam turbine development due to blades designed

لقد كان اختراع التوربين البخاري نتيجة لجهود عدة مخترعين منهم (دي لافال) السويدي و (جارلس بارسون1884) الانكليزي وداتو الفرنسي وكرتس الامريكي في نهاية القرن التاسع عشر حيث بدا دي لافال (1849-1913) بصنع توربين في عام 1888 من نوع توربينة زخم Impulse ذو مرحلة واحدة صغيرة وسرعته 30000 rpm وكانت عملية ومعتمدة وحمل هذا التوربين اسمه فيها وكان له الفضل في استخدام النوزلات في ذلك الوقت وهذا النوع يستخدم لحد ألان ووضعت وحدة أخرى سنة 1891 م وركبت على سفينته حتى سنة 1892 م حيث صنعت توربينة أخرى ذات قرصين كل قرص ذو قدرة 15 حصان استخدم أحداهما لتسيير السفينة الى الإمام والأخر إلى الخلف وتتكون المرحلة الواحدة من ممر ضيق ثم موسع وتوضع عدة ممرات حول قرص المحور حيث يفقد البخار الضغط كله وتتحول طاقته الحرارية الى سرعة عالية في نهاية هذه الموسعة (nozzle) ويرتطم هذا البخار السريع بصف من الريش المرتبة على قرص دوار فيفقد طاقته الحركية بالريش فتتحرك الريش وتزداد سرعتها الى أن تصل الى نصف سرعة البخار ففي هذا النوع من التوربينات تصل سرعة البخار الى حوالي 1600m/sec عند نهاية الموسعة وتصل سرعة الريش الدوارة الى 1800m/sec فيفقد البخار معظم طاقة السرعة ويبقى ضغطه ثابت إثناء تدوير الريش والتي يكون تصميمها من نوع زخم

كما في الشكل أدناه حيث يتمدد البخار في الريشه لكونها مقعرة ومستوية من الأمام عند الحافتين والزاوية مابين ميل الريشة في البوابة ومحور الدوران (20°) .



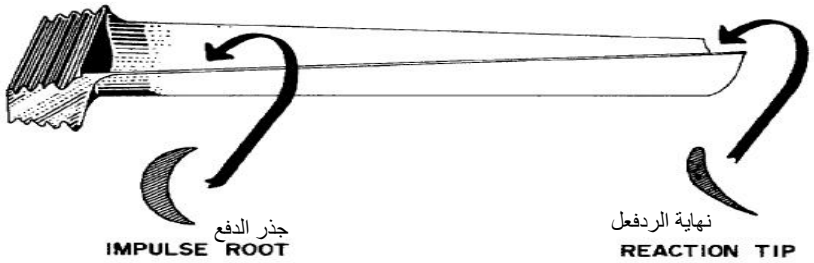
المهندس



شكل يمثل توربين دي لافال

دي لافال

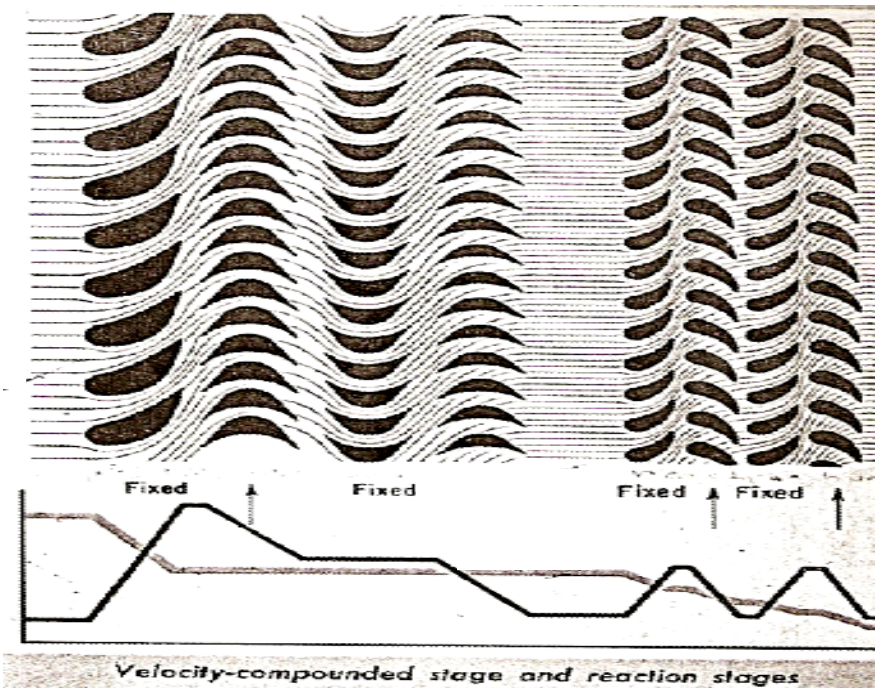
ج-التوربينة الدفعية الرد فعلية Impulse & Reaction Turbine



في هذا النوع من التوربين يكون عدد من المراحل نوع الزخم او الدفع والمراحل المتبقية نوع رد الفعل لتقليل عدد المراحل الرد فعلية والاستفادة من الضغط العالي في تحريك مراحل الزخم وبذلك تقلل من طول التوربينة ومساحة الحيز المطلوبة لتجهيزه وفي نفس الوقت تقلل من تكلفته وبالاضافة الى انه كلما كان العدد للمراحل الرد فعلية كثير كلما ساعد ذلك على زيادة الاهتزازات لذلك تقلل وتعطى لمراحل نوع زخم لتقليل العدد.

مثال : ارسم مخطط لتوربين بخاري ذو اربعة مراحل المرحلتين الاولى من نوع زخم Impulse والمرحلتين الاخيرة من نوع رد فعل Reaction ؟

Steam turbine with four stages, two -stage impulse and the other two –stage reaction



Velocity-compounded stage and reaction stages

س1/ ارسم مخطط يوضح تغيرات طاقة البخار في توربين بخاري كرتس ذو مرحلتين impulse turbine

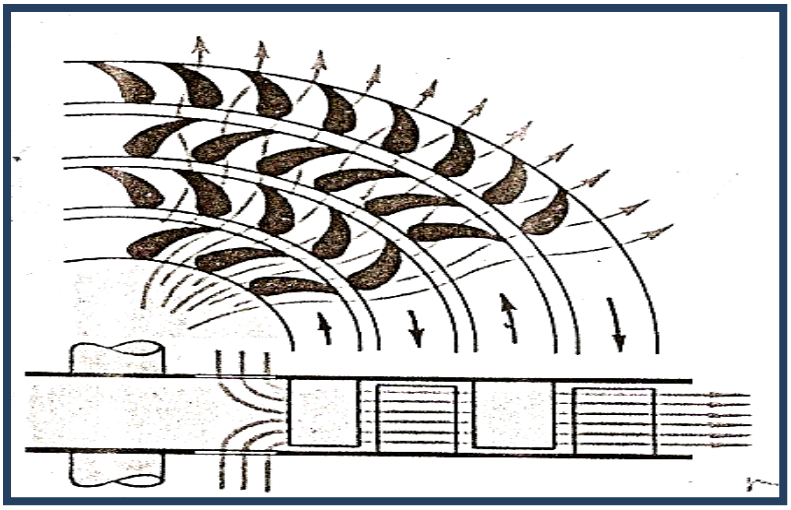
س2/ ارسم مخطط يوضح تغيرات طاقة البخار في توربين بخاري داتو من نوع impulse مع استخدام مرحلتين من النوزلات

1 3 2تصنيف على أساس اتجاه جريان البخار

أ- مع العلاقة بالمحور:-

1 نصف قطريRadial

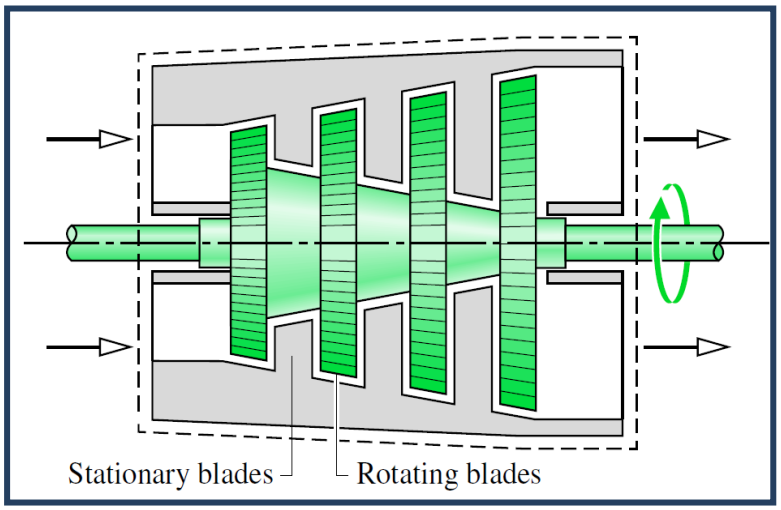
في هذا النوع من التوربينات يمر البخار بشكل عمودي على المحور من قاعدة الريشة الى قمة الريش لكل المراحل والرسم الموجود ادناه يبين توربين من نوع radial flow ذو قرصين دوارين ويحتوي فقط على ريش دوارة من نوع رد الفعل reaction وهذا الجزء يكون داخل اسطوانة والتي هي الغلاف الخارجي للتوربين



شكل يوضح توربينة ذات سريان بخار باتجاه نصف قطري

2 موازي للمحور (محوري)Axial

يسري البخار فيه موازي لمحور الدوران وهو يسمح غالبا بأي درجة مطلوبة لتمدد البخار وذلك بواسطة التزود بعدد مناسب من المراحل أو التمددات مع الريش ذات التحديد المسبق للطول

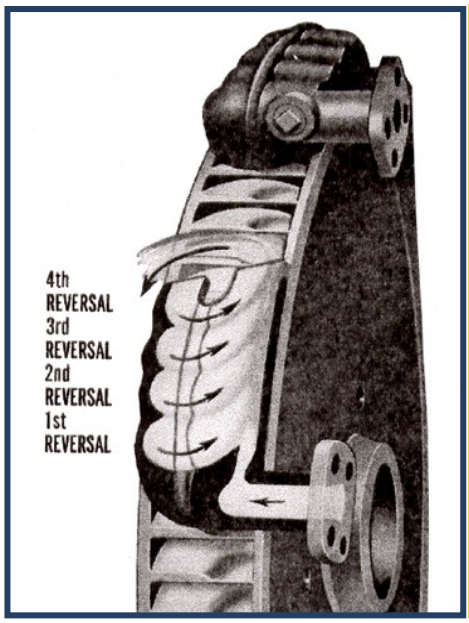


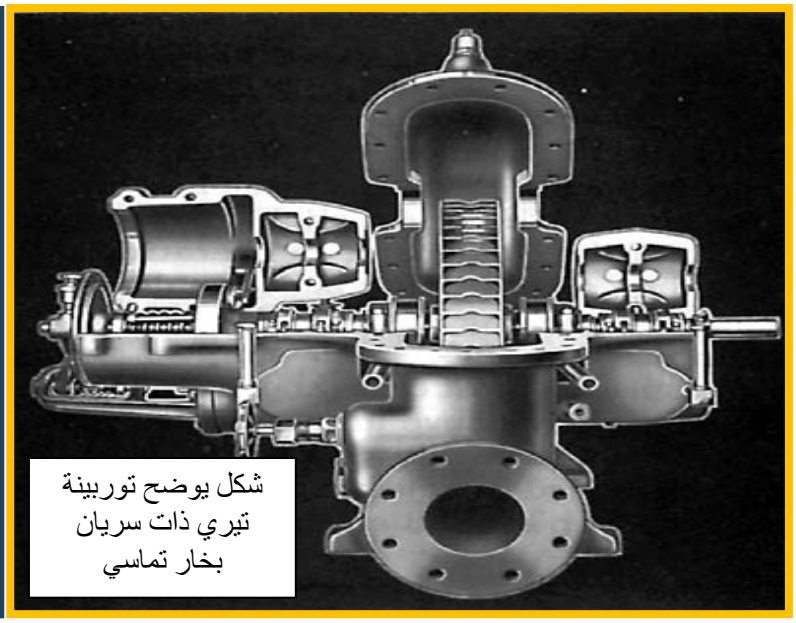
شكل يوضح توربينة ذات سريان بخار باتجاه محوري

3 تماسي Tangential

ويسمى أيضا سريان اهليجي يصمم هذا النوع للتوربينات التي يدخل البخار فيها من خلال فوهات (نوزلات) محدد وضعها في الغلاف بحيث إن البخار يصطدم مع العضو الدوار عند نقطة تقريبا تكون تماس مع محيط العجلة الحاملة لريش التوربين.

وهذا النظام لسريان البخار الاهليجي نجد فيه إن الريش الشبه دائرية تكون مفروزة داخل طوق Rim عند زاوية معينة والريش الشبه دائرية التي على الحافة الخارجية للعجلة تعيد توجيه البخار إلى أطواق الريش (Buckets) وهي مجموعة ريش نصف دائرية المواجهة لها مثبتة على السطح الاسطواني الداخلي للغلاف وهذه أطواق الريش تسمى غرفة عاكسة. وهذا موضح كما في الشكل ادناه وشكل لتوربينة من النوع تيري Terry



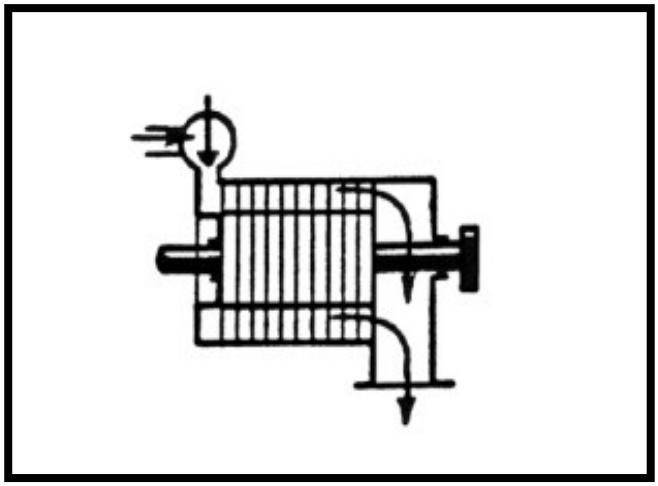


شكل يوضح توربينة تيري ذات سريان بخار تماسي

ب مع الارتباط بالنظام:

1 سريان أحادي Signal Flow

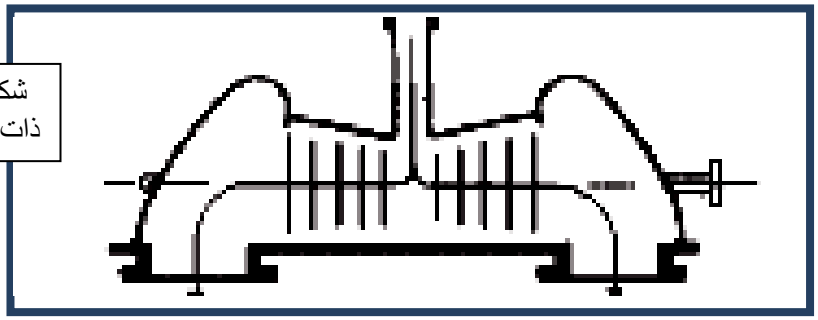
التوربينات ذات السريان الأحادي هي من الطراز الذي فيه يدخل البخار من طرف واحد ويمر عبر الريش التي تكون تقريبا موازية لمحور الدوران وتخرج متمدد كلياً من عند الطرف الأخر حيث أنها تسري إلى الجو الخارجي أو توربينة أخرى او مكثف .



شكل يوضح توربينة ذات سريان بخار احادي

2 - سريان ثنائي Double Flow

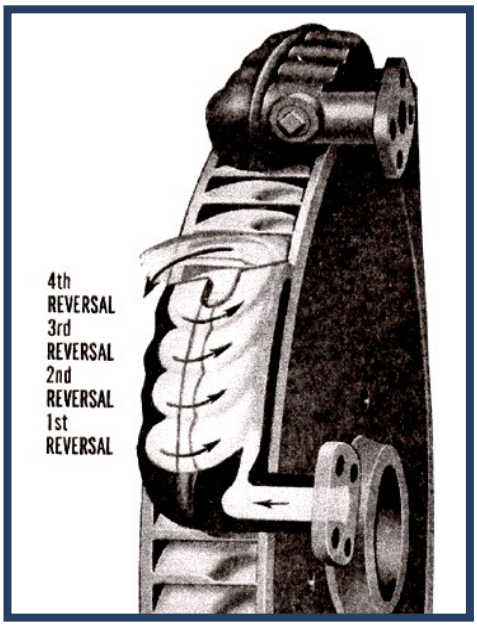
وهي من الطراز الذي فيه يدخل البخار من عند المركز ثم يتفرع محوريا في اتجاهات متضادة من خلال أطقم منفصلة من الريش وتحتوي على فتحتين للعادم وذلك يساعد على التقليل من القوة المحورية على الطرفين .



شكل يوضح توربينة ذات سريان بخار ثنائي

3 - حلزوني Helical

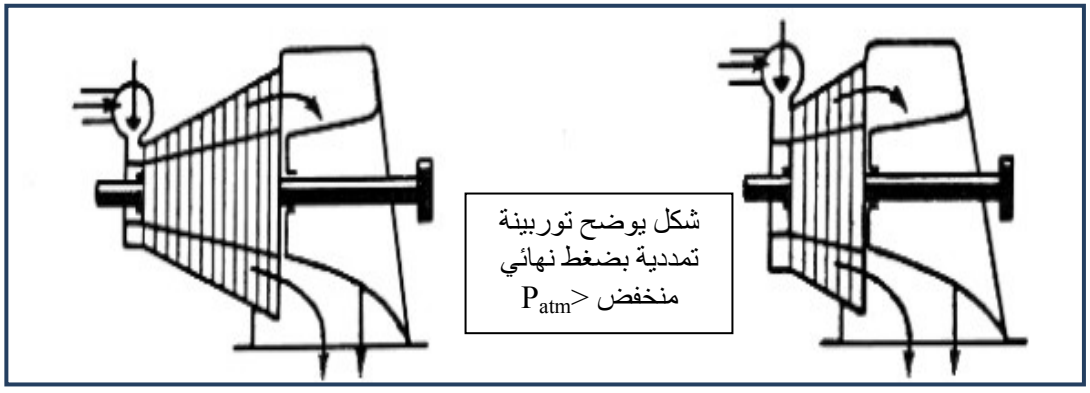
4 - المتكرر Repeated



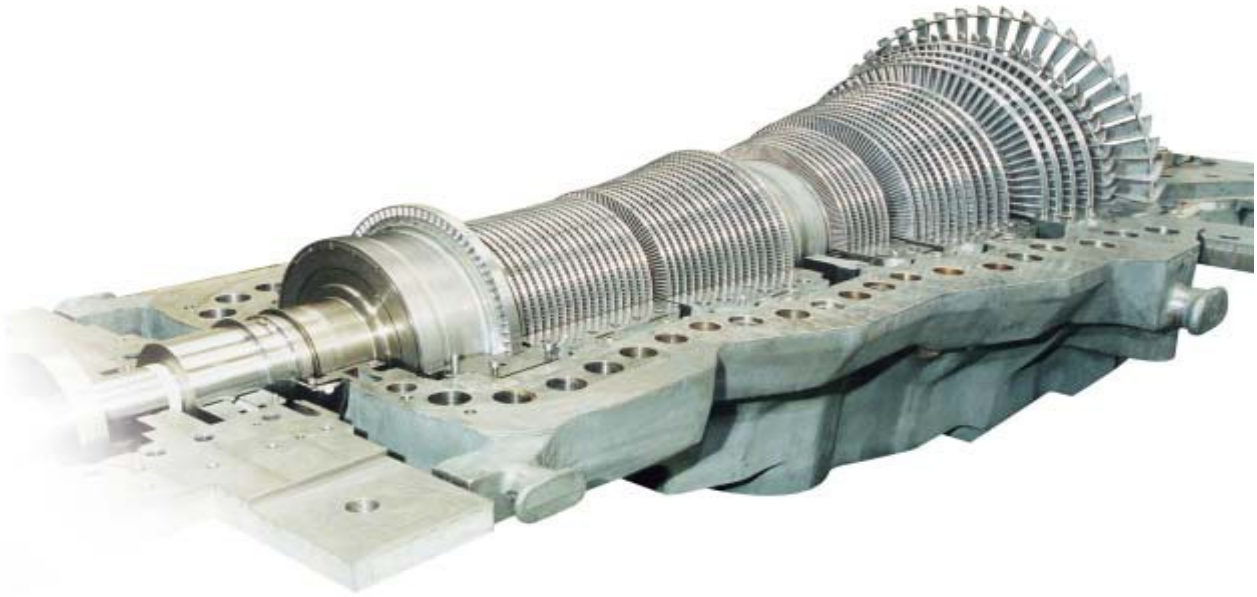
ويطلق هذا المصطلح على التوربينات ذات المرحلة الواحدة حيث ان البخار بعد مروره من خلال الريش يعود مرة اخرى بواسطة غرفة عاكسة ثم يتوجه مرة اخرى الى الريش . هذا النوع من التوربينات يستخدم للوحدات الصغيرة المساعدة في اغلب الاحيان حيث ان المطلوب من هكذا تصميم هو زيادة في الاقتصاد بدون اضافة صف اخر من الريش .وبالرغم من ان المستخدم هو فقط الصف لمرحلة واحدة الا ان اعادة دخول البخار توضح ايضا ان تصنيف التوربينة هو توربينة مركبة السرعة.

1-3-3 تصنيف على أساس حالات الاستخدام

1 - تمددي Condensing ضغط نهائي منخفض Low back pressure



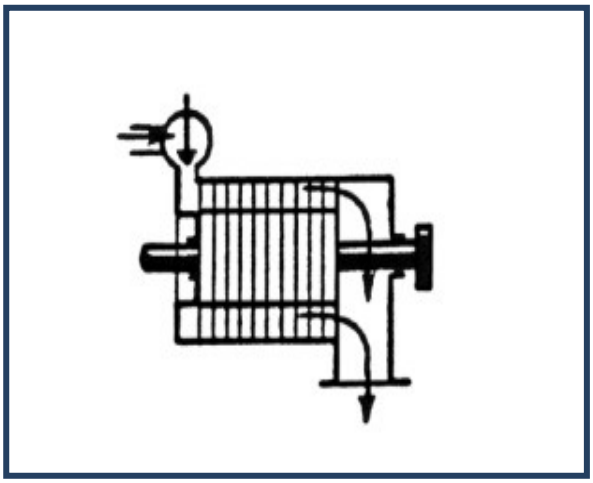
شكل يوضح توربينة تمددية بضغط نهائي منخفض P_{atm}>

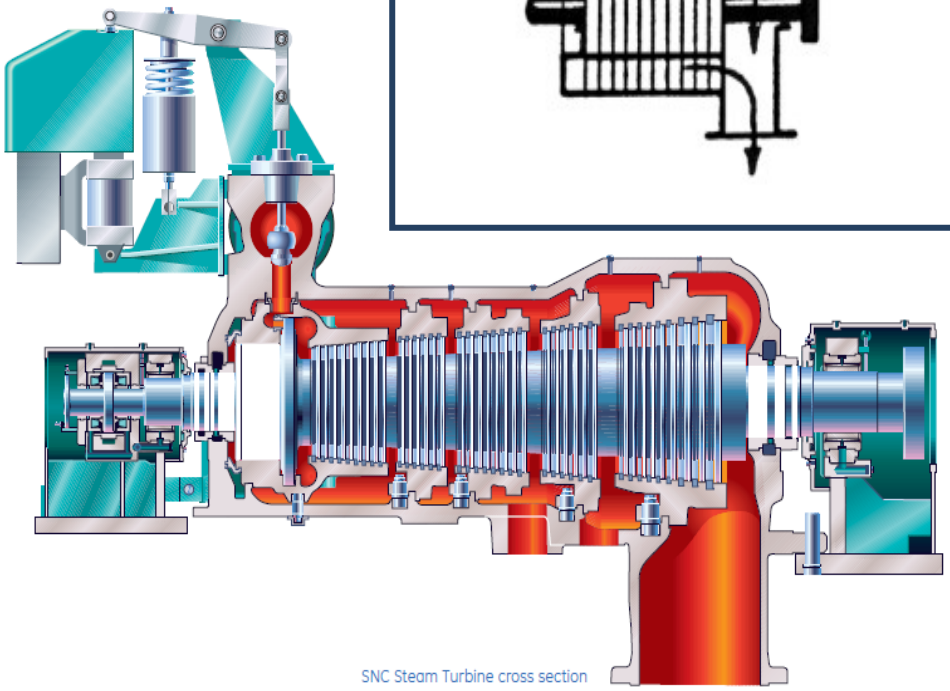


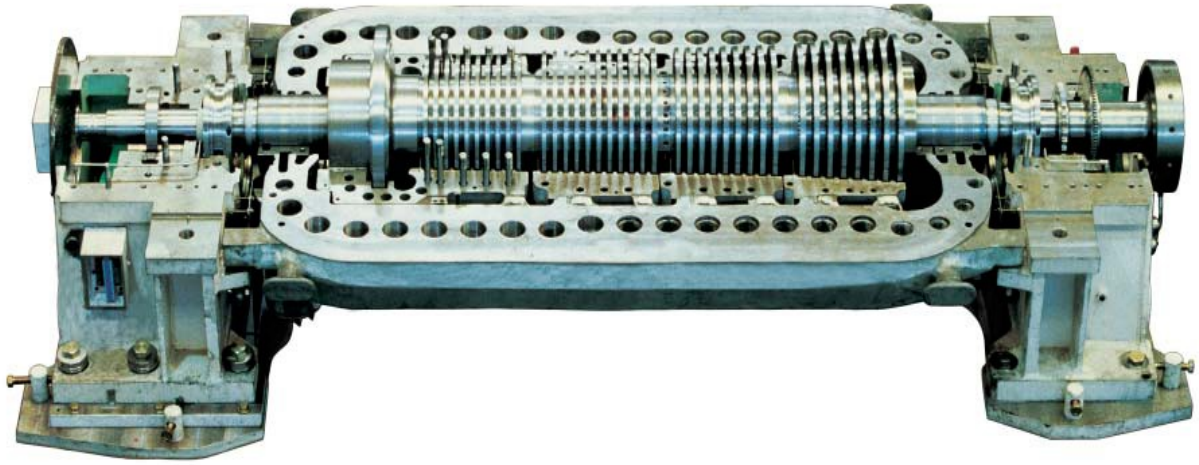
في هذا النوع من التوربينات البخار الخارج يكون اقل من الضغط الجوي قد يصل الى (0.4 من الضغط الجوي) لذا يحول الى مكثف لغرض تحويله من بخار الى ماء لامكانية رفعه بمضخة التغذية للمراجل لاعادة تدويره الى التوربين

2 غير تمددي Non-condensing

شكل يوضح توربينة تمددية بضغط نهائي منخفض $P_{atm}<$





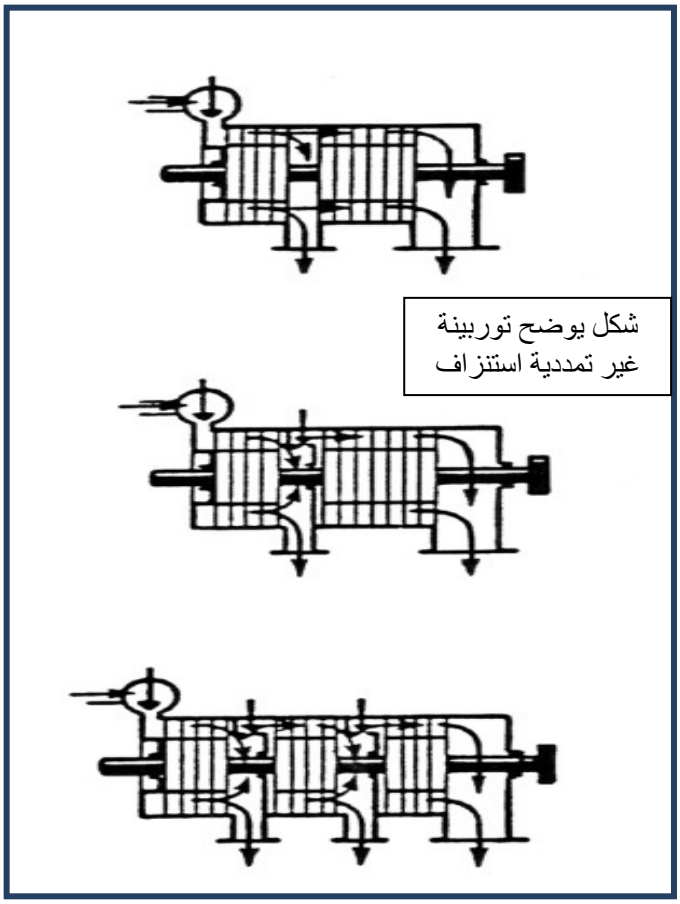


في هذا النوع من التوربينات البخار الخارج من التوربين ذو ضغط نهائي عالي يمكن استخدامه في تشغيل توربينة اخرى (وحدة صغيرة) (small unit) او مجال صناعي اخر

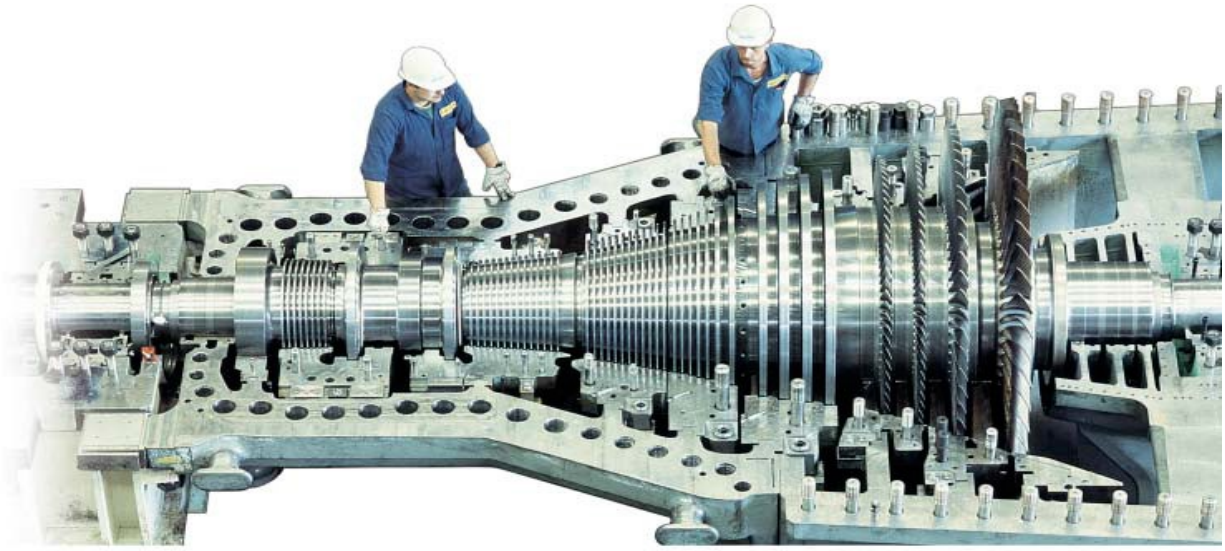
3 –توربينة استنزاف (Extraction)

في هذا النوع من التوربينات يستنزف بخار من بعض مراحل التوربين قد يكون (H.p.s بخار ضغط عالي ، L.p.s بخار ضغط واطئ ، M.p.s بخار ضغط متوسط) وقد يكون اثنان او اكثر ،وتكون قيم الاستنزاف اعتمادا على عدد انابيب السحب الموجودة على التوربين فقد يكون (Single مفرد ، Double اثنان ، Triple ثلاثة).

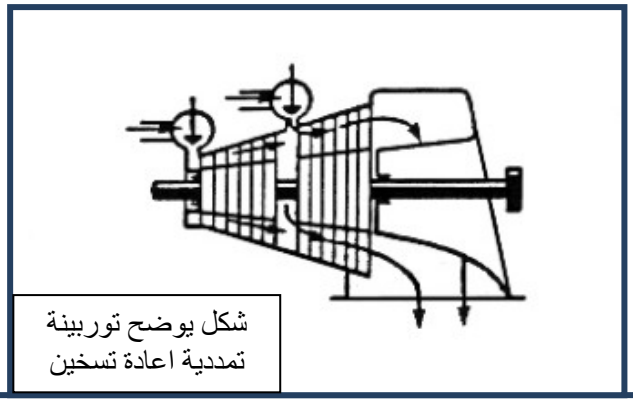
ويسحب هذا البخار لتلبية حاجة المنشأة للبخار بمواصفات مختلفة عن البخار الرئيسي المنتج ويستخدم لاغراض صناعية مختلفة مثل تشغيل وحدات توربينية صغيرة وهي احد الطرق لتحسين كفاءة التوربين البخاري



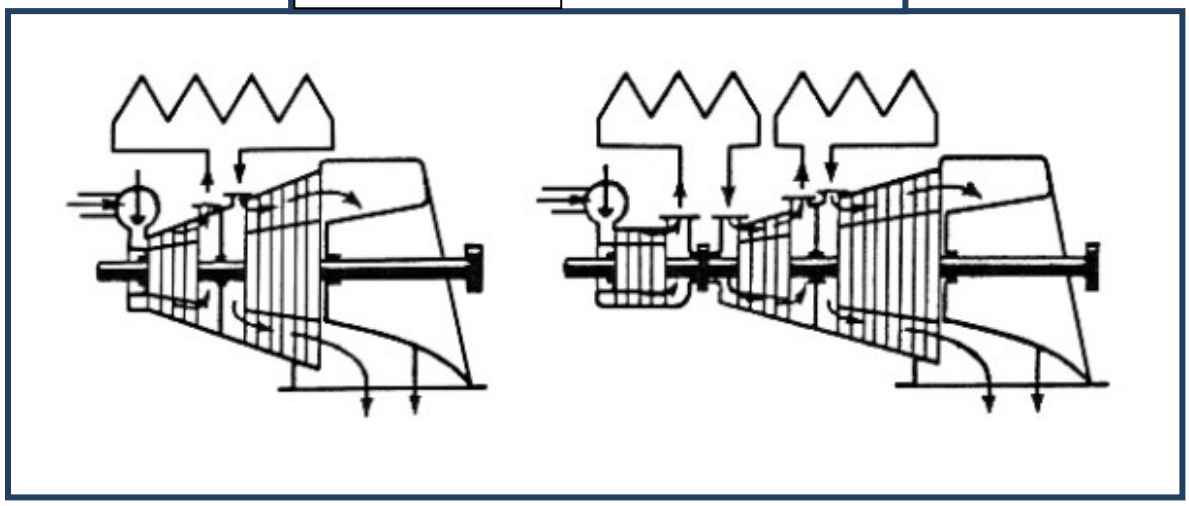
شكل يوضح توربينة غير تمددية استنزاف



4- توربينة إعادة التسخين (Reheating turbine)



شكل يوضح توربينة
تمددية اعادة تسخين



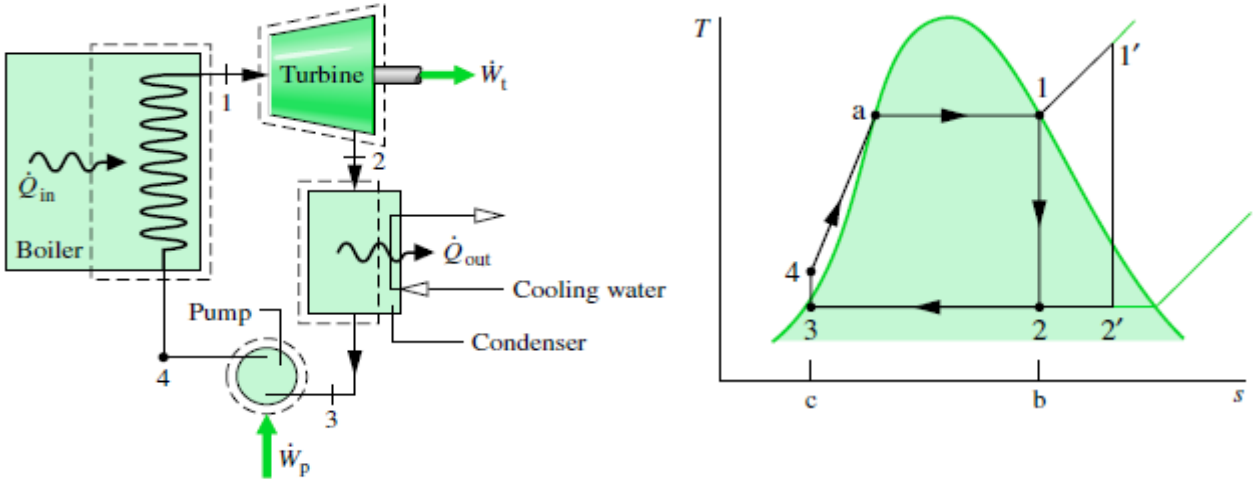
في هذا النوع من التوربينات يضاف بخار الى التوربين في بعض مراحله من اجل تنشيط طاقة البخار ويكون بمواصفات مناسبة للمرحلة التي يدخل من خلالها وقد يكون (M.p.s ، H.p.s ، L.p.s) ويربط عند منطقة الدخول على انبوب اضافة الضغط منظم سرعة لكي ينظم كمية البخار الداخلة وقد تكون توربينة اضافة الضغط ذو ضغط نهائي منخفض كما واضح بالمخطط اعلاه وقد يكون ذو ضغط نهائي عالي وقد يكون التوربين اضافة ضغط وبنفس الوقت توربينة استنزاف وتعتبر هذه الطرق في الربط اسلوب من اساليب تحسين كفاءة التوربين .

1-4 الدورات الحرارية التي تعمل عليها التوربينات البخارية:-

1-4-1 دورة رانكن المثالية والحقيقة البسيطة

أ -دورة رانكن المثالية البسيطة:-

تتألف دورة رانكن المثالية من أربعة إجراءات انعكاسية كما مبين في الشكل (1-4-1-أ) مع فرض عدم وجود احتكاك وعدم وجود هبوط في الضغط وعدم فقدان حرارة للمحيط.



شكل رقم (1-4-1-أ) دورة رانكن البسيطة المثالية

1 +الإجراء (1-2) هي عملية تمدد اديباتيكي (adiabatic) للبخار خلال التوربين من حالة البخار المشبع إلى ضغط المكثف.

2 +الإجراء (2-3) وهي عملية تكثيف مزيج البخار والماء المشبع وتحوله إلى ماء داخل المكثف تحت ضغط ثابت.

3 +الإجراء (3-4) يضخ الماء المشبع في المضخة ويرفع ضغطه إلى ضغط المرجل البخاري (boiler).

4 +الإجراء (4-1) وهي عملية تسخين الماء وتحويله إلى بخار تحت ضغط ثابت.

تحليل الطاقة في دورة رانكن المثالية

المكونات الأربعة لدورة رانكن (المضخة،المرجل البخاري،التوربين،المكثف) كلها ذات جريان مستقر (steady state) وتأثير كل من الطاقة الحركية والطاقة الكامنة يكون قليل بحيث يمكن إهمالها.

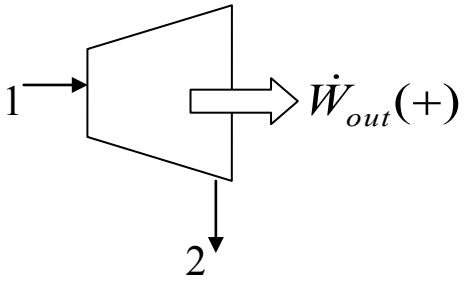
$$\frac{1}{\dot{m}}\frac{dE}{dt} = \frac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_{CV}}{\dot{m}} + (h_{in} - h_{out}) + 1/2(V_{in}^2 - V_{out}^2) + g(z_{in} - z_{out})$$

$$0 = \frac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_{CV}}{\dot{m}} + (h_{in} - h_{out})$$

1→2 Turbine (**تمدد أديباتي**)

$$0 = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{m}} + (h_1 - h_2)$$

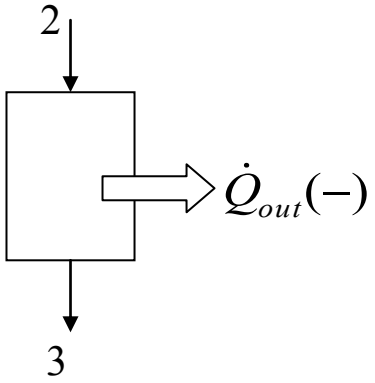
$$w_{out} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{m}} = (h_1 - h_2)$$



2→3 Condenser (**إزالة حرارة**)

$$0 = \frac{-\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}}{\dot{m}} + (h_2 - h_3)$$

$$q_{out} = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} = (h_2 - h_3)$$

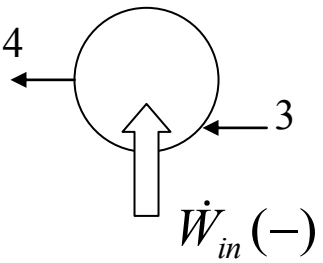


3→4 Pump (**انضغاط أديباتي**)

$$0 = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} - \frac{-\dot{W}_{in}}{\dot{m}} + (h_3 - h_4)$$

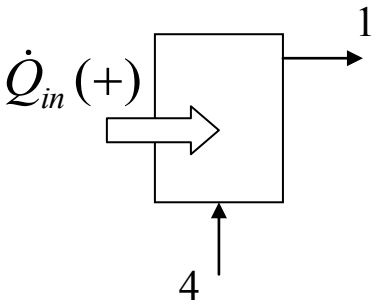
$$w_{in} = \frac{\dot{W}_{in}}{\dot{m}} = (h_4 - h_3)$$

$$w_{in} = \left(\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}}\right)_{\substack{\text{int} \\ rev}} = \int_3^4 v dP = v_3(P_4 - P_3)$$



4→1 Steam Generator (إضافة حرارة)

$$0 = \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}}{\dot{m}} + (h_4 - h_1)$$



$$q_{in} = \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = (h_1 - h_4)$$

الكفاءة الحرارية لدورة رانكن Rankine Cycle Thermal Efficiency

$$\eta = \frac{\text{net work out}}{\text{heat input}} = \frac{(\dot{W}_{out}/\dot{m}) - (\dot{W}_{in}/\dot{m})}{\dot{Q}_{in}/\dot{m}} = \frac{w_{out} - w_{in}}{q_{in}}$$

$$\eta_{Rankine} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4}$$

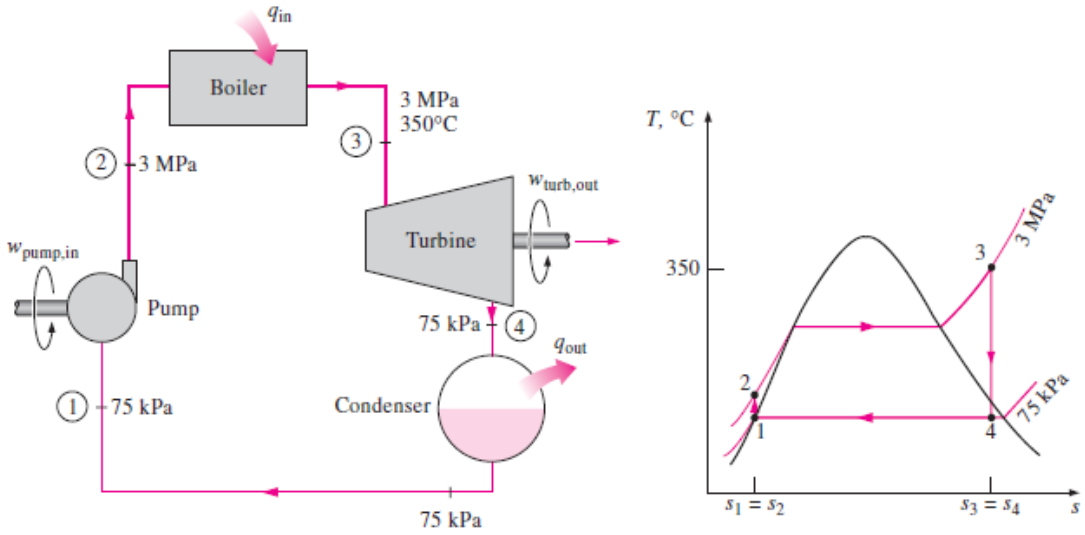
Back Work Ratio (bwr) **نسبة الشغل الراجع**

$$bwr = \frac{\text{work input (pump)}}{\text{work output (turbine)}} = \frac{\dot{W}_{in}/\dot{m}}{\dot{W}_{out}/\dot{m}} = \frac{w_{in}}{w_{out}}$$

$$bwr = \frac{h_4 - h_3}{h_1 - h_2}$$

مثال1

في دورة رانكن المثالية شكل (1-4-1-ب) يدخل البخار إلى التوربين بضغط مقداره (3MPa) وبدرجة حرارة ($350C^0$) ويكثف في المكثف تحت ضغط مقداره (75KPa). جد مقدار الكفاءة الحرارية لهذه الدورة.



شكل(1-4-1-ب) رسم ومخطط (T-S) للدورة رانكن

الحـل:solution

أولا نجد مقدار الانثالبيا في جميع نقاط الدورة باستخدام جداول البخار(A-2) و (A-3)

State 1: $P_1 = 75\ kPa$, $Sat.\ liquid$

$$h_1 = h_{f@75kPa} = 384.39\ kJ/kg$$

$$v_1 = v_{f@75kPa} = 0.001037\ m^3/kg$$

State 2: $P_2 = 3\ MPa$, $s_2 = s_1$

$$w_{pump,in} = v_1(P_2 - P_1) = (0.001037\ m^3/kg)(3000 - 75)\ kPa = 3.03 \quad kJ/kg$$

$$h_2 = h_1 + w_{pump,in} = (384.39 + 3.03)kJ/kg$$

State 3: $P_3 = 3\ MPa$, $T_3 = 350^O C$

$$h_3 = 3115.3\ kJ/kg$$

$$s_3 = 6.7428\ kJ/kg.K$$

State 4: $P_4 = 75\ kPa$, $s_4 = s_3$ $(Sat. \quad Mixture)$

$$x_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6.7428 - 1.213}{6.2434} = 0.886$$

$$h_4 = h_f + x_4 h_{fg} = 384.39 + 0.886(2278.6) = 2403.2\ kJ/kg$$

Thus,

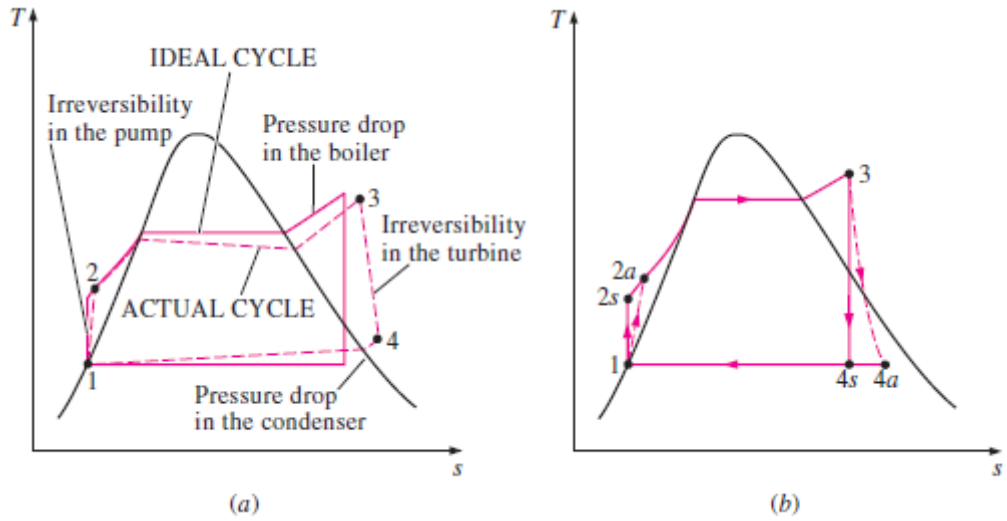
$$q_{in} = h_3 - h_2 = (3115.3 - 387.42)kJ/kg = 2727.88\,kJ/kg$$

$$q_{out} = h_4 - h_1 = (2403.2 - 384.39)kJ/kg = 2018.81\,kJ/kg$$

and $$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{in}}{q_{out}} = 1 - \frac{2018.81}{2727.88} = 0.26 = 26\,\%$$

ب حيود دورة البخار الحقيقية عن الدور المثالية:-

تختلف دورة البخار الحقيقية عن دورة البخار المثالية لدورة رانكن وكما موضح في الشكل (1-4-1-ج) ويعود السبب في ذلك إلى الضائع في مختلف أجزاء مكونات الدورة وهذا بدوره يؤدي إلى عدم الانعكاسية. إن احتكاك المائع وفقدان الحرارة للمحيط هذان المصدران سببا عدم الانعكاسية. حيث يسبب احتكاك المائع هبوط الضغط في المرجل البخاري والمكثف وفي الأنابيب في مختلف أجزاء مكونات الدورة.وكنتيجة لذلك يخرج البخار من المرجل بضغط منخفض إلى حد ما. كما إن الضغط الداخل للتوربين يكون اقل من الضغط الخارج من المرجل بسبب هبوط الضغط في أنابيب التوصيل بين التوربين والمرجل البخاري. ويسبب هذا الانخفاض في الضغط وجوب ضخ الماء الداخل للمرجل إلى ضغط أعلى من ضغط البخار الذي يغادر المرجل مما يتطلب شغل ضخ إضافي. إما بالنسبة للضائع في المكثف فهبوط الضغط في المكثف يكون عادة صغير جدا كما إن التبريد تحت درجة حرارة تشبع السائل الخارج من المكثف يعتبر ضائع أيضا لأنه يستلزم انتقال حرارة إضافية لرفع درجة حرارة الماء إلى درجة حرارة التشبع. أما بالنسبة للضائع في التوربين والمضخة فهو نتيجة أللانعكاسية المصاحبة لانسياب المائع وانتقال الحرارة إلى المحيط وقد تسبب وسائل التحكم أيضا فقدا في التوربين وخاصة إذا استخدم إجراء خنق للتحكم في التوربين. وللحفاظ على نفس المستوى من صافي الشغل الناتج والذي يؤدي بدوره إلى نقصان في كفاءة الدورة يحتاج إضافة مزيد من الحرارة للبخار في المرجل من اجل تعويض الفقدان في الحرارة.



شكل (1-4-1-ج) حيود الدورة الفعلية عن المثالية لدورة رانكن

الكفاءة الايسنتروبك (isentropic efficiencies) للمضخة والتوربين يمكن أن تعطى بالصيغة التالية.

$$\eta_p = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

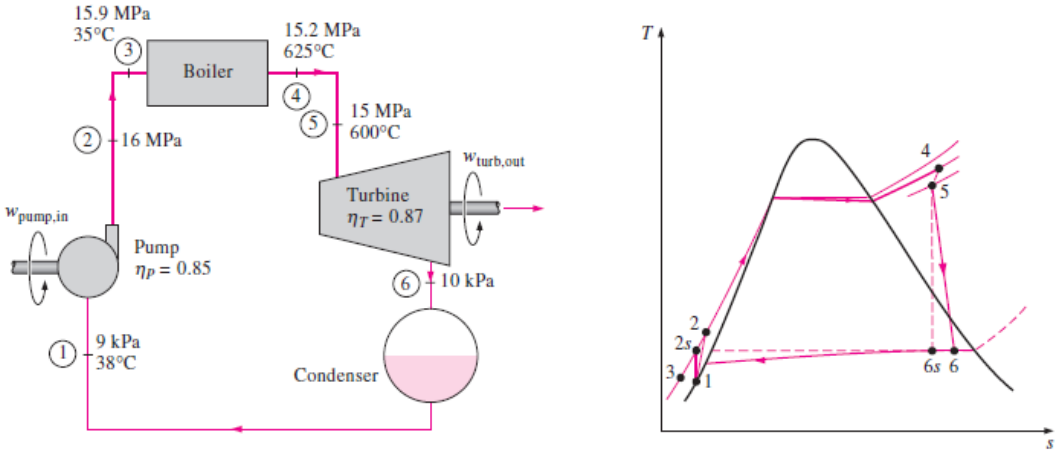
$$\eta_T = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}}$$

مثال2

محطة توليد القدرة بالبخار تعمل على الدورة المبينة في الشكل (1–5). إذا كانت كفاءة التوربين (87%) وكفاءة المضخة (85%). جد مقدار كل مما يأتي.

1- الكفاءة الحرارية للدورة

2 -مقدار صافي القدرة الناتجة من المحطة وللمعدل جريان (15kg/s).



شكل (1-5) دورة رانكن الحقيقية

الحل: solution

- بداية نستخرج قيمة شغل المضخة

$$w_{a,pump,in} = \frac{w_{s,pump,in}}{\eta_p} = \frac{v_1(P_2 - P_1)}{\eta_p} \frac{(0.001009\ m^3/kg)(16000-9)}{0.85} = 19\ kJ/kg$$

- نستخرج قيمة شغل التوربين الخارج عن طريق كفاءة التوربين

$$w_{a,turbine,out} = \eta_T w_{s,turbine,out} = \eta_T (h_5 - h_6) = 0.87(3582.3 - 2114.9) = 1276.6 kJ/kg$$

- نستخرج قيمة الحرارة المضافة من قبل التوربين

$$q_{in} = h_4 - h_3 = (3647.3 - 160.1) = 3487.2\ kJ/kg$$

$$w_{net} = w_{a,turbine,out} - w_{a,pump,in} = (1276.6 - 19) kJ/kg = 1257.6\ kJ/kg$$

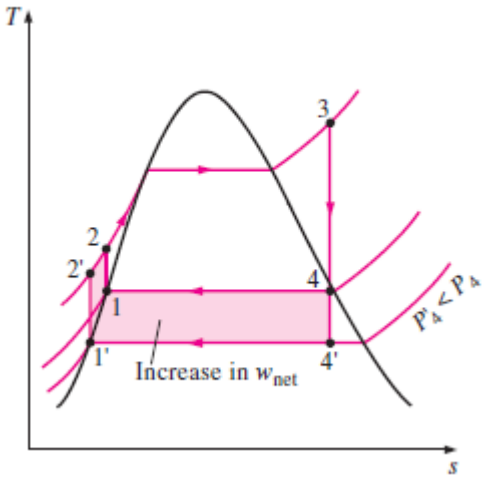
$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{1257.6}{3487.2} = 0.361 \quad or \quad 36.1\%$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{m}(w_{net}) = (15 kg/s)(1257.6\ kJ/kg) = 18864\ kW$$

1-4-2 تأثير الضغط ودرجة الحرارة في دورة رانكن

1 - تأثير انخفاض ضغط المكثف:Effect of Lowering the Condenser Pressure

يوضح الشكل (1-4-2-أ) تأثير ضغط المكثف ودرجة حرارته على كفاءة دورة رانكن والمبينة على مخطط (T-S). حيث تمثل المساحة الملونة على مخطط (T-S) الزيادة في الشغل الصافي والذي هو نتيجة لانخفاض الضغط من P_4 إلى P'_4 . وتمثل المساحة الملونة تحت المنحني (2-2') الزيادة في الحرارة المنتقلة للبخار ولأكن هذه الزيادة صغيرة جدا. وهكذا فان التأثير الإجمالي لانخفاض الضغط في المكثف يؤدي إلى زيادة الكفاءة الحرارية للدورة. وهذا واضح أيضا من أن درجة الحرارة المتوسطة التي تطرد عندها الحرارة قد انخفضت. إن خفض الضغط يسبب زيادة في الرطوبة التي يحتويها البخار الخارج من التوربين. وهذا هام لأنه إذا تعدت الرطوبة في مراحل الضغط المنخفض في التوربين 10% فان ذلك لايسبب انخفاض كفاءة التوربين فحسب بل إن تآكل الريش يصبح مشكلة خطيرة.

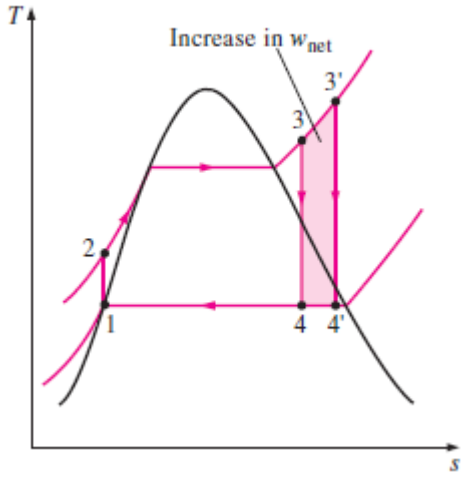


شكل (1-4-2-أ) يبين تأثير انخفاض ضغط المكثف على دورة رانكن

2 -تأثير تحميص البخار إلى درجات حرارة عالية:

Effect of superheated steam to maximum temperature

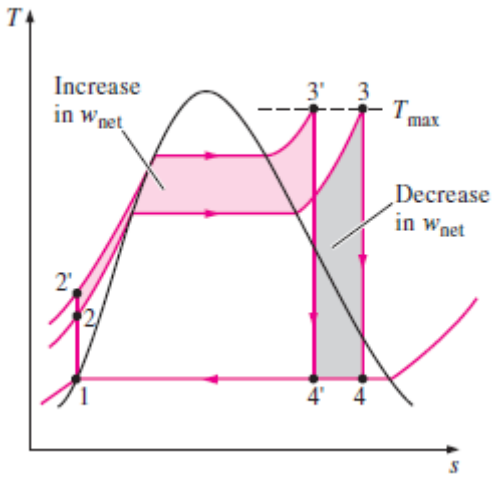
إن تأثير تحميص البخار في المرجل يؤدي إلى زيادة الحرارة المنتقلة إلى البخار وارتفاع درجة الحرارة المتوسطة وبدون زيادة ضغط المرجل. ويوضح الشكل (1-4-2-ب) تأثير تحميص البخار والمبين على مخطط (T-S). حيث تمثل المساحة الملونة على المخطط الزيادة في الشغل الصافي. وتمثل المساحة الكلية تحت المنحني (3-3') الحرارة المضافة. وهكذا فان الزيادة في الشغل الصافي والحرارة المضافة هو نتيجة لتحميص البخار إلى درجة حرارة عالية.إن التأثير الإجمالي هو زيادة الكفاءة الحرارية للدورة. ونلاحظ أيضا انه بتحميص البخار فان كسر جفاف البخار الخارج من التوربين يزداد.



شكل (1-4-2-ب) يبين تأثير تحميص البخار إلى درجة حرارة عالية على دورة رانكن

3 – تأثير زيادة ضغط المرجل: Effect of Increasing the Boiler Pressure

يبين الشكل (1-4-2-ج) تأثير زيادة الضغط الأقصى للبخار (ضغط المرجل) والمبين على مخطط (T-S). حيث تؤدي زيادة ضغط المرجل إلى ارتفاع درجة الحرارة المتوسطة إثناء إجراء إضافة الحرارة مع بقاء درجة الحرارة القصوى للبخار وضغط المكثف ثابتين.ونلاحظ من خلال المخطط إن الشغل الصافي يزداد بمقدار المساحة الملونة العليا ويقل بمقدار المساحة الملونة على جهة اليمين. أما بالنسبة للحرارة المطرودة فتقل وبذلك تزداد الكفاءة الحرارية لدورة رانكن. تؤدي زيادة ضغط المرجل إلى انخفاض كسر جفاف البخار الخارج من التوربين. وخلاصة الكلام انه يمكن زيادة كفاءة دورة رانكن بخفض ضغط المكثف وزيادة الضغط أثناء إضافة الحرارة وكذلك بتحميص البخار. يزداد كسر جفاف البخار الخارج من التوربين بتحميص البخار ويقل بخفض ضغط المكثف وبزيادة الضغط أثناء إضافة الحرارة.



شكل (1-4-2-ج) يبين تأثير زيادة ضغط المرجل على دورة رانكن

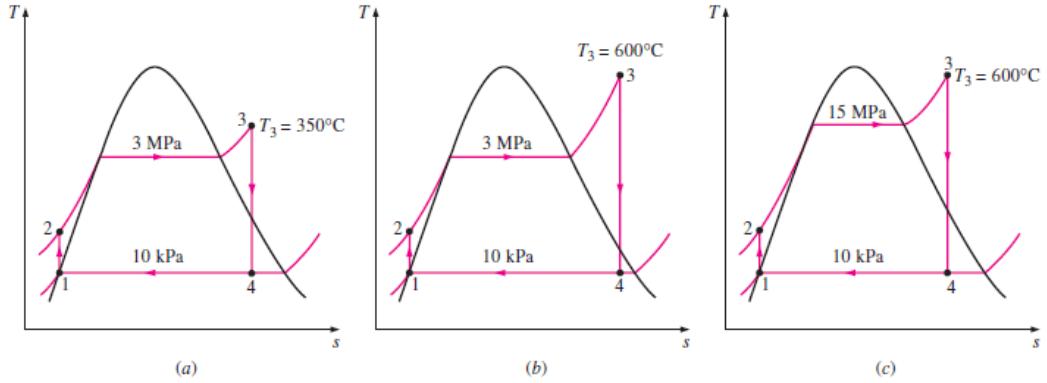
مثال:3

محطة توليد القدرة بالبخار تعمل على دورة رانكن المثالية وكما مبين في الشكل (1-4-2-د) حيث يدخل البخار إلى التوربين عند (3MP) و ($350C^O$) ويتكفث البخار في المكثف عند ضغط مقداره (10KPa). جد مقدار الكفاءة الحرارية للحالات التالية.

1 – الكفاءة الحرارية لدورة رانكن للمخطط (a).

2 – الكفاءة الحرارية إذا حمص البخار إلى ($600C^O$) بدلا من ($350C^O$) للمخطط (b).

3 – الكفاءة الحرارة إذا ارتفع ضغط المرجل إلى (15MPa) مع بقاء درجة حرارة البخار الداخلة للتوربين ثابتة كما مبين في المخطط (c).



شكل(1-4-2-د) يبين مخططات (T-S) للحالات الثلاثة في المثال

الحل: solution

أولا نجد مقدار الانثالبيا في جميع نقاط الدورة باستخدام جداول البخار(A-2) و (A-3)

State 1:
$$\left.\begin{matrix} P_1 = 10\ kPa \\ Sat.\ liquid \end{matrix}\right\} \quad h_1 = h_{f@75kPa} = 191.83\ kJ/kg \quad v_1 = v_{f@75kPa} = 0.00101\ m^3/kg$$

State 2:
$$\left.\begin{matrix} P_2 = 3\ MPa \\ s_2 = s_1 \end{matrix}\right\}$$

$$w_{pump,in} = v_1(P_2 - P_1) = (0.00101\ m^3/kg)(3000 - 10)\ kPa = 3.02 \quad kJ/kg$$

$$h_2 = h_1 + w_{pump,in} = (191.83 + 3.02)kJ/kg = 194.85kJ/kg$$

State 3:
$$\left.\begin{matrix} P_3 = 3\ MPa \\ T_3 = 350^O C \end{matrix}\right\} \quad h_3 = 3115.3\ kJ/kg \quad s_3 = 6.7428\ kJ/kg.K$$

State 4: $\left.\begin{matrix} P_4 = 10\ kPa \\ s_4 = s_3 \end{matrix}\right\}$ $(Sat.\quad Mixture)$

$$x_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6.7428 - 0.6493}{7.5009} = 0.8124$$

$$h_4 = h_f + x_4 h_{fg} = 191.83 + 0.8124(2392.8) = 2135.7\ kJ/kg$$

Thus, $q_{in} = h_3 - h_2 = (3115.3 - 194.85)kJ/kg = 2920.5\,kJ/kg$

$$q_{out} = h_4 - h_1 = (2135.7 - 191.83)kJ/kg = 1943.9\,kJ/kg$$

and $$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{in}}{q_{out}} = 1 - \frac{1943.9}{2920.5} = 0.335 = 33.5\,\%$$

ثانيا: الحالات 1و2 تبقى نفسها في هذه الحالة والانثالبيا في الحالة 3 (3MPa و $600C^0$) والحالة 4

($s_4=s_3$ و10Kpa)

$h_3 = 3682.3kJ/kg$

$h_4 = 2379.9kJ/kg \qquad (x_4 = 0.914)$

Thus, $q_{in} = h_3 - h_2 = (3682.3 - 194.84)kJ/kg = 3487.5\,kJ/kg$

$$q_{out} = h_4 - h_1 = (2379.9 - 191.83)kJ/kg = 2188.1kJ/kg$$

and $$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{in}}{q_{out}} = 1 - \frac{2188.1}{3487.5} = 0.373 = 37.3\,\%$$

ثالثا: تبقى الحالة 1 نفسه في هذه الحالة أما بالنسبة لبقية الحالات فتتغير. الانثالبيا في الحالة 2 (15MPa و

$S_2=S_1$)، الحالة 3 (15Mpa و$600C^0$)، والحالة 4 (10KPa و $S_4=S_3$)

$h_2 = 206.97kJ/kg$

$h_3 = 3582.3kJ/kg$

$h_4 = 2114.9kJ/kg \qquad (x_4 = 0.804)$

Thus, $q_{in} = h_3 - h_2 = (3582.3 - 206.97)kJ/kg = 3375.3\,kJ/kg$

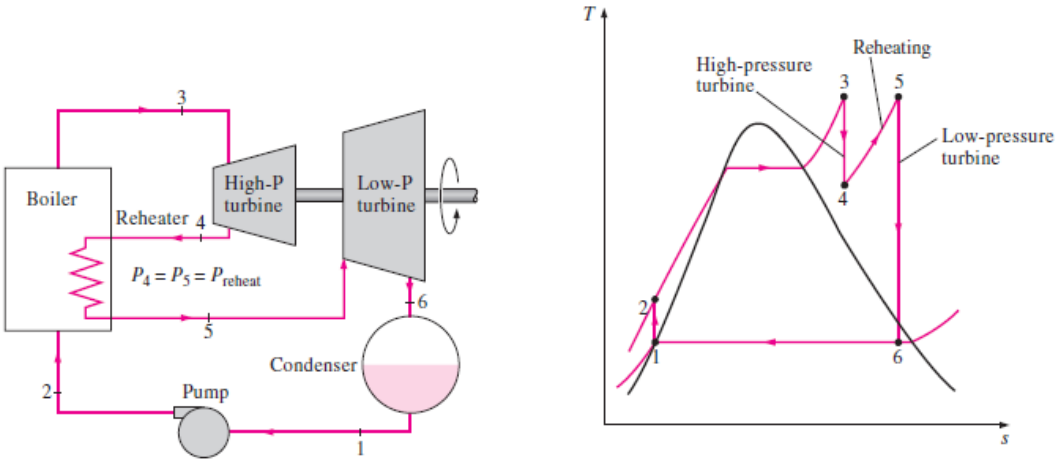
$$q_{out} = h_4 - h_1 = (2114.9 - 191.83)kJ/kg = 1923.1kJ/kg$$

and $$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{in}}{q_{out}} = 1 - \frac{2188.1}{3487.5} = 0.373 = 37.3\,\%$$

3-4-1 محسنات دورة رانكن

أ - دورة إعادة التسخين المثالية: The ideal reheat Rankine cycle

تزداد كفاءة دورة رانكن بزيادة الضغط في إجراء إضافة الحرارة والذي تم توضيحه في الفقرة السابقة والذي بدوره يؤدي إلى زيادة الرطوبة في البخار في مراحل الضغط المنخفض من التوربين. لقد استحدثت دورة إعادة التسخين للاستفادة من الكفاءة العالية المقترنة بالضغط العالي ولتفادي الرطوبة الزائدة في مراحل الضغط المنخفض للتوربين. يبين الشكل (1-4-3-أ) مخطط (T-S) لدورة إعادة التسخين. إن السمة المميزة لهذه الدورة هي إن البخار يتمدد إلى ضغط متوسط في التوربين. ثم يعاد تسخينه في المرجل وبعد ذلك يعاد للتوربين ليتمدد إلى ضغط المكثف. ونلاحظ من خلال المخطط إن الزيادة في الكفاءة من إعادة تسخين البخار قليلة لان متوسط درجة الحرارة المتوسطة التي تضاف عندها الحرارة لم يتغير كثيرا ولكن الميزة الرئيسية هي تقليل الرطوبة في البخار في مراحل الضغط المنخفض في التوربين إلى درجة مأمونة.



شكل (1-4-3-أ) إعادة التسخين لدورة رانكن المثالية

الحرارة الكلية المضافة والشغل الصافي لدورة إعادة التسخين تصبح كما يأتي

$$q_{in} = q_{primary} + q_{reheat} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$$

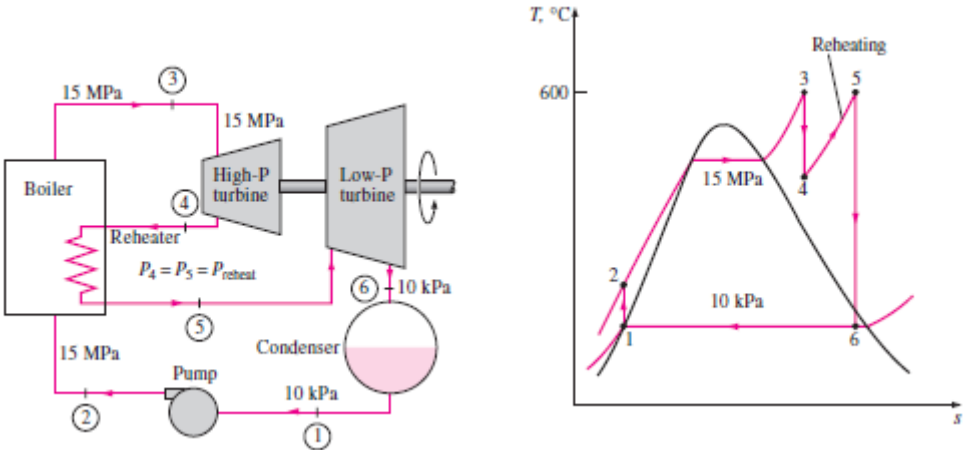
$$w_{turbine,out} = w_{turb,I} + w_{turb,II} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$$

مثال:4

محطة توليد القدرة بالبخار تعمل على دورة إعادة التسخين لدورة رانكن المثالية وكما مبين في الشكل (1-4-3-ب) حيث يدخل البخار إلى توربين الضغط العالي عند (15MPa) و ($600C^{O}$) ويتكفث البخار في المكثف عند ضغط مقداره (10KPa). إذا كان محتوى الرطوبة للبخار الخارج من توربين الضغط المنخفض(low pressure) لا يتجاوز 10.4%. جد مقدار كلا مما يأتي.

1 مقدار الضغط في خط إعادة التسخين

2 مقدار الكفاءة للدورة. افرض إن قيمة درجة حرارة إعادة التسخين هي نفسها الداخل إلى توربين الضغط العالي.



شكل (1-4-3-ب) إعادة تسخين لدورة رانكن

1 نجد مقدار ضغط إعادة التسخين من خلال الحالة 5 والحالة 6 حيث تكون الانتروبي متساوية.

State 6:

$$P_6 = 10\ kPa$$
$$x_6 = 0.896 \quad (Sat.\ Mix.)$$
$$s_6 = s_f + x_6 s_{fg} = 0.6493 + 0.896(7.5009) = 7.370\ kJ/kg.K$$
$$h_6 = h_f + x_6 h_{fg} = 191.83 + 0.896(2392.8) = 2335.8\ kJ/kg$$

State 5:

$$\left.\begin{aligned} T_5 &= 600^{O} C \\ s_5 &= s_6 = 7.370 kJ/kg.K \end{aligned}\right\} P_5 = 4.0\ MPa$$
$$h_5 = 3674.4\ kJ/kg$$

لذلك ينبغي إن يعاد تسخين البخار عند ضغط مقداره 4MPa لكي يكون مقدار محتوى الرطوبة أعلى من 10.4%.

2 -لحساب مقدار كفاءة الدورة ينبغي حساب الانثالبيا لكل الحالات.

$$\left.\begin{array}{l} P_1 = 10\ kPa \\ Sat.\ Liquid \end{array}\right\}$$

State 1: $h_1 = h_{f@10kPa} = 191.83\ kJ/kg$

$v_1 = v_{f@10kPa} = 0.00101\ m^3/kg$

State 2: $\left.\begin{array}{l} P_2 = 15MPa \\ s_2 = s_1 \end{array}\right\}$

$$w_{pump,in} = v_1(P_2 - P_1) = (0.00101\ m^3/kg)(15000-10)kPa = 15.14\,kJ/kg$$
$$h_2 = h_1 + w_{pump,in} = 191.83 + 15.14 = 206.97\ kJ/kg$$

State 3: $\left.\begin{array}{l} P_3 = 15MPa \\ T_3 = 600^O C \end{array}\right\} h_3 = 3582.3kJ/kg;\quad s_3 = 6.6776\ kJ/kg.K$

State 4: $\left.\begin{array}{l} P_4 = 10\ kPa \\ s_4 = s_3 \end{array}\right\} h_4 = 3154.3\quad kJ/kg$

$$q_{in} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) = (3582.3 - 206.97) + (3674.4 - 3154.3) = 3895.4\ kJ/kg$$
$$q_{out} = (h_6 - h_1) = (233.5 - 191.83) = 2144\ kJ/kg$$

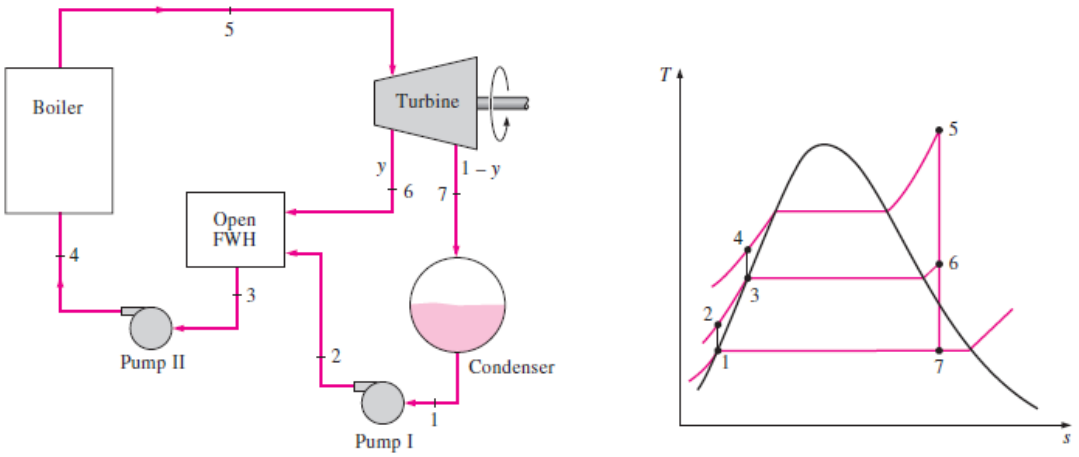
$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{2143.3}{3896.1} = 0.45 \text{ or } 45\%$$

ب - دورة الاسترجاع المثالية : The ideal regenerative Rankine cycle

تتضمن دورة الاسترجاع استخدام مسخنات لماء التغذية (feedwater heaters).وهناك نوعين من مسخنات ماء التغذية وهي المسخنات المفتوحة والمغلقة.

1 - مسخنات ماء التغذية المفتوحة: Open Feedwater Heaters

يبين الشكل (1-4-3-ج) دورة الاسترجاع مع مسخن مفتوح حيث يدخل البخار في الحالة (5) الى التوربين وبعد أن يتمدد إلى الحالة (6) يخرج بعض البخار ويدخل إلى مسخن ماء التغذية. أما البخار الذي لم يخرج فيتمدد في التوربين إلى الحالة (7) ثم يكثف بعد ذلك في المكثف. يضخ البخار المكثف إلى داخل مسخن ماء التغذية حيث يختلط بالبخار الخارج من التوربين. يجب أن يكون البخار الخارج بالقدر المناسب لتسخين ماء التغذية بحيث يترك المسخن مشبعا عند الحالة (3) . لاحظ أن هذا السائل لم يضخ إلى ضغط المرجل ولكن فقط إلى ضغط مناظر للحالة 6وتلزم مضخة أخرى لضخ السائل الخارج من المسخن إلى ضغط المرجل. والنقطة الهامة هي إن درجة الحرارة المتوسطة التي أضيفت عندها الحرارة قد ارتفعت. وتتميز مسخنات ماء التغذية المفتوحة بالرخص وبان انتقال الحرارة فيها أحسن بالمقارنة بالمسخنات المغلقة. أما بالنسبة لمساوئها فهي تحتاج إلى مضخة لماء التغذية بين كل مسخن.



شكل (1-4-3-ج) دورة الاسترجاع المثالية لرانكن مع مسخن مفتوح

يمكن التعبير عن الحرارة والشغل لدورة الاسترجاع المثالية مع مسخن مفتوح كما يلي:

$$q_{in} = h_5 - h_4$$

$$q_{out} = (1-y)(h_7 - h_1)$$

$$w_{turb,out} = (h_5 - h_6) + (1-y)(h_6 - h_7)$$

$$w_{pump,in} = (1-y)w_{pumpI,in} + w_{pumpII,in}$$

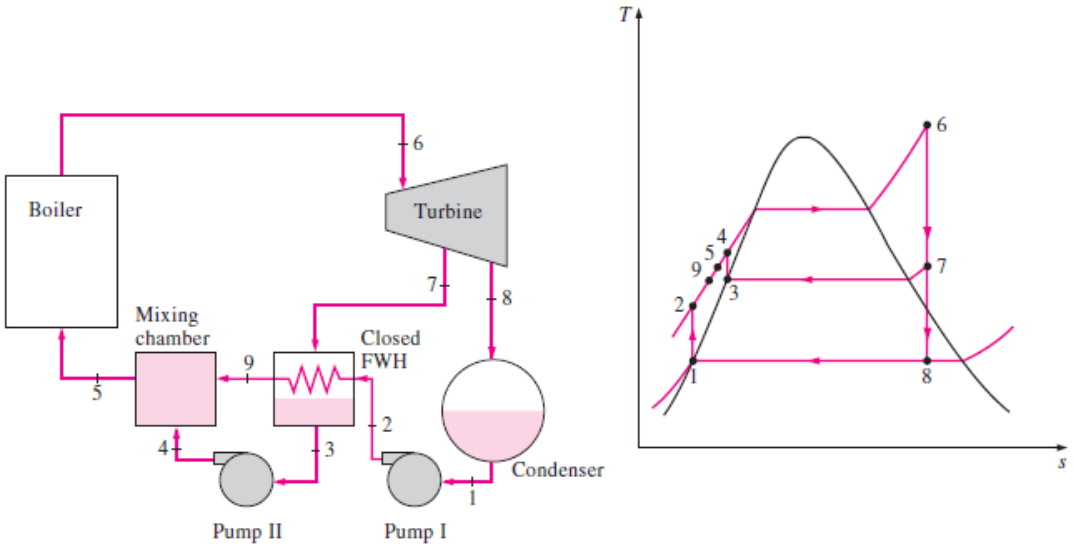
$y = \dfrac{\dot{m}_6}{\dot{m}_5}$ حيث (y) تمثل البخار المستنزف

$$w_{pumpI,in} = v_1(P_2 - P_1)$$

$$w_{pumpII,in} = v_3(P_4 - P_3)$$

2 – مسخنات ماء التغذية المغلقة: closed Feedwater Heaters

في هذا النوع من المسخنات لايختلط ماء التغذية بالبخار ولكن تنتقل الحرارة من البخار المستخرج عندما يتكثف خارج الأنابيب في الوقت الذي يجري فيه ماء التغذية خلال الأنابيب في المسخن المغلق. قد يكون البخار وماء التغذية عند ضغوط مختلفة وقد يضخ البخار المتكاثف إلى خط ماء التغذية أو يزال عن طريق مصيدة (المصيدة جهاز يسمح بخروج السائل إلى منطقة ضغط منخفض ويحجز البخار) إلى مسخن ذي ضغط منخفض ا والى المكثف الأساسي كما في الشكل(1-4-3-د) .



شكل (1-4-3-د) دورة الاسترجاع المثالية مع مسخن مغلق

تمارين رياضية

س1:

في دورة رانكن يخرج البخار من المرجل ويدخل إلى التوربين عند (4MPa) و ($400C^o$). ضغط المكثف (10KPa). احسب كفاءة الدورة.

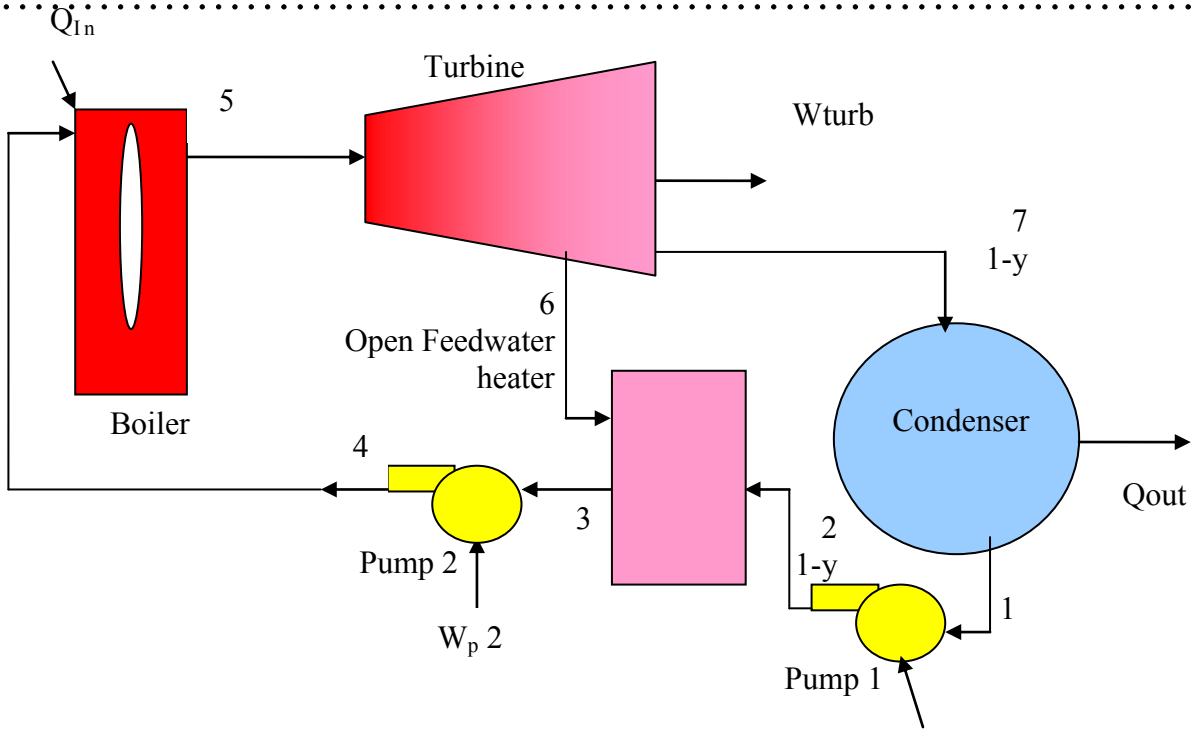
س2:

دورة إعادة تسخين تستخدم بخارا يترك المرجل ويدخل إلى التوربين عند (4MPa) و ($400C^o$). بعد تمدد البخار في التوربين إلى (400KPa) أعيد تسخين البخار إلى ($400C^o$) ثم يتمدد البخار بعد ذلك في توربين الضغط المنخفض إلى (10KPa). احسب مقدار الكفاءة الحرارية للدورة.

س3:

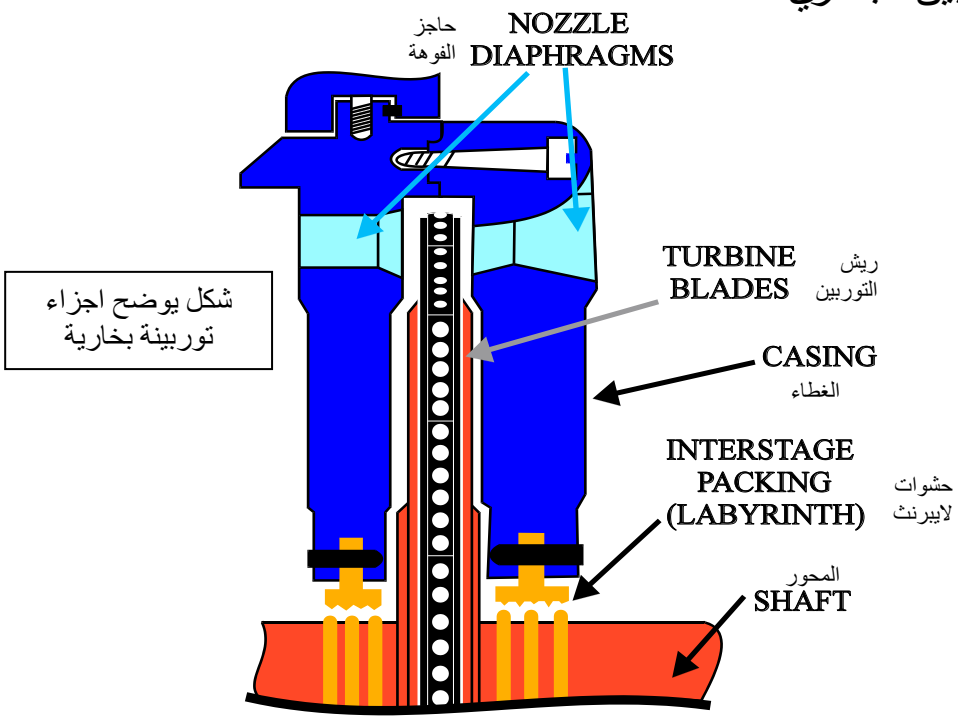
محطة توليد القدرة بالبخار تعمل على دورة الاسترجاع لدورة رانكن المثالية وكما مبين في الشكل (1-4-3-هـ). حيث يدخل البخار إلى التوربين بضغط (3MPa) ودرجة حرارة ($500C^0$) ويخرج بضغط (10KPa). استخدم مسخن ماء تغذية مفتوح ويعمل عند ضغط قدره (0.5MPa) جد مقدار الكفاءة الحرارية للدورة. استعمل البيانات المعطاة في الجدول أدناه .

State	P kPa	T ^oC	h kJ/kg	s kJ/(kg K)	v m^3/kg
1	10		191.8		0.00101
2	500				
3	500		640.2		0.00109
4	500				
5	3000	500	3456.5	7.2338	
6	500		2941.6	7.2338	
7	10		2292.7	7.2338	



شكل (1-4-3-هـ) دورة الاسترجاع المثالية مع مسخن ماء تغذية مفتوح

1-5 أجزاء التوربين البخاري :



شكل يوضح اجزاء توربينة بخارية

1 5 1الاجزاء الثابتة:-

1-5-1-1غطاء التوربين Casing:

يصنع هذا الجزء من مواد قابلة للتشكيل باشكال معقدة يتطلبها تصميم غطاء التوربين حيث تأخذ الاجزاء الداخلية تصميما وشكلا يحافظ على الطاقة داخل التوربين ويكون المعدن المصنع منه ذو خواص فيزيائية جيدة وله القابلية على اللحام والمكننة الدقيقة .

تشكل الأغلفة عامة من نصفين مقسمين أفقيا بطول المحور للعضو الدوار مع تكامل أغلفة الحاصر على كل طرف للتوربينات الصغيرة ويتم تربيطها ببراغي لإتاحة منفذ للدخول في التوربينات الكبيرة.

فبالنسبة لدرجات الحرارة التي تصل حتى 450° ف (232° م) والمناسبة لذلك هو الحديد الزهر وحتى درجة 800° ف (427° م) مناسبة لاستخدام الصلب. وبالنسبة لدرجات الحرارة الأعلى يصبح من الضروري استخدام انواع خاصة من الصلب يتم سبكها مع المولبيدوم والكروم والنيكل والفناديوم الى اخره. وهذا الاستخدام للسبائك يكون بصفة أساسية نتيجة للانخفاض السريع لقوة الشد والزيادة في الزحف **Creep** لانواع الصلب العادية عند درجات الحرارة العالية.

والاغلفة اما ان تكون مصبوبة أو مصنعة بواسطة لحام القوس الكهربائي لمصبوبة الاجزاء او المدلفنة او المطروقة او المركبة حيث ان الأغلفة تكون كبيرة او مشتبكة التصميم وفي النوع المبني **built** صندوق البخار وفتحات الاستنزاف ووصلات العادم تكون عامة مصبوبة منفصلة ثم يتم لحامها بعد ذلك.

وطريقة التصنيع تمر بالمراحل التالية:

1 -سباكة التلدين او تجميع باللحام

2 -تخشين السطح الخارجي

3 -الاختبار هيدروستاتيكيا

4 -تشطيب السطوح المتقابلة

5 -الغلاف التشريحي (مجاري الغلاف)

وجميع الاغلفة يجب ان تخضع لاختبار هيدروستاتيكي ويكون على الاقل مرة ونصف مثل الحد الاقصى لضغط التشغيل قبل الدخول في الخدمة، بينما الاغلفة او المصبوبات الغير تامة تجرى لها فحوصات لدرجة الحرارة العالية او خدمة الضغط او الفحص بالاشعة .

1-5-1-2النوزلات **Nozzle**:

الفوهة او الفونية او النوزل في ابسط اشكالها هي فتحة ذات حافات داخلها وخارجها مستديرة او مربعة والتي من خلالها يتمدد البخار ويحول جزء من الحرارة المتاحة الى طاقة حركية او سرعة. ومع ذلك فان كل الحرارة المتاحة لا يتم تحويلها الى سرعة نتيجة الاحتكاك وفقودات اخرى في الفوهة، وكفاءة الفوهة تتاثر بامور اخرى مثلا الحالة التي يكون عليها البخار وشكل الدخول والخروج وطول الفوهة وكذلك تسوية التشطيب للفوهة.

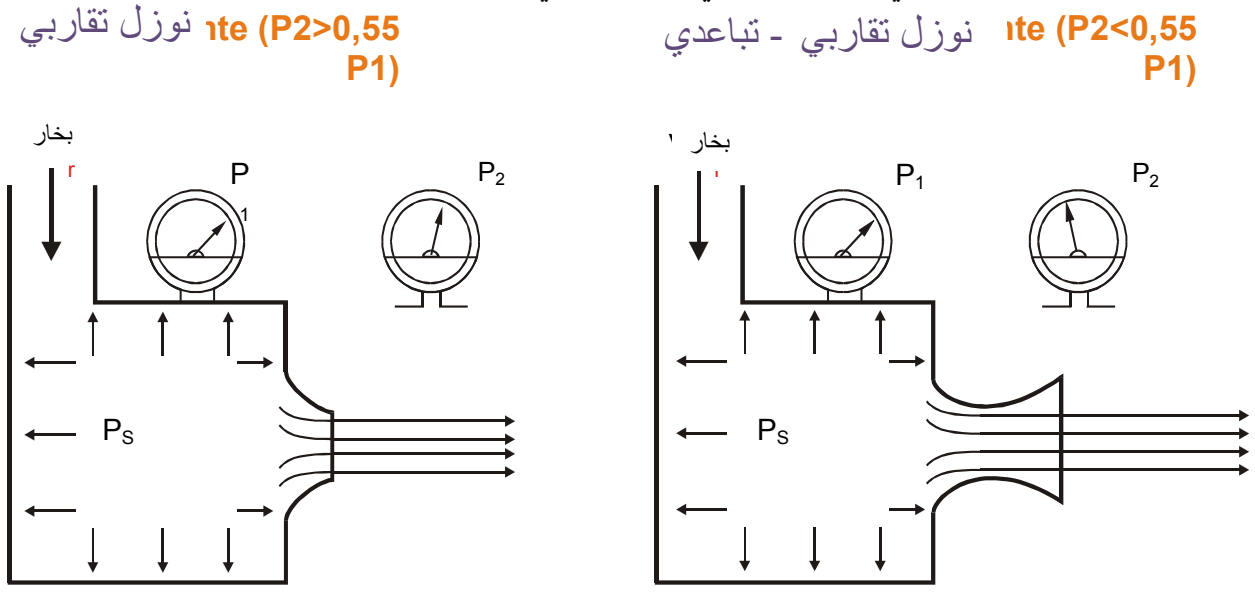
وتصنع الفوهة عادة من الصلب المقاوم للتاكل او سبيكة اخرى تكون ملائمة فبالنسبة للتوربينات الصغيرة او التي تكون ذات درجات حرارة متوسطة يستخدم فيها سبيكة من النحاس والنيكل. والتي يمكن ان تكون ذات مقاطع مربعة ومستطيلة او مستديرة ويتم تصنيعها على شكل قطاعات مصمتة او مصنعة بواسطة استخدام الريش الثابتة او بواسطة تقسيمات لاحظ شكل 1-5-1-3(أ وب).

والفوهات اما ان تكون من الطراز المتقارب المتباعد او المتقارب ويعتمد ذلك على نسبة الضغط الحرج. وهذه النسبة تكون حوالي 0,547 للبخار المحمص، من 0,58-0,59 للبخار المشبع. والطراز المتقارب يستخدم عندما لا يقل الضغط الخارج عن الضغط الحرج او للبخار المشبع عند 100 رطل مطلق للضغط الداخل والضغط الخارج لا يقل عن 58 رطل مطلق شكل 1-5-1-2.

عندما يكون الضغط الخارج اقل من الضغط الحرج فلا يستكمل التمدد في الفوهة ولكن فقط بعد ان يمر البخار من فتحة الخروج للفوهة، وهذا التمدد الغير متحكم فيه يحدث حالة دوامية مع الفقد المباشر للطاقة الحركية. وللاستفادة من الطاقة الاضافية التي تمت بواسطة التمدد خلف الخنق يثبت الجزء المتباعد للفوهة المتقاربة والاتحاد يصبح طراز متقارب متباعد. والجزء المتباعد يزيد من سرعة الخرج ولكن لا تغير السرعة او الحجم النوعي عند الخنق ولذلك فان الضغط الخارج الذي يقل عن الضغط الحرج سوف لا يكون له تاثير على كتلة البخار المطرود بواسطة الفوهة.

والفوهات المتقاربة تسمى عامة فوهات غير تمددية والفوهات المتقاربة المتباعدة تسمى بالفوهات التمددية.عدد الفوهات ذات الضغط العالي التي تستخدم في توربينة لاي مرحلة واحدة يعتمد على القدرة المطلوبة وارتفاع الريش وتغير الحمل المطلوب للخدمة الى اخره.

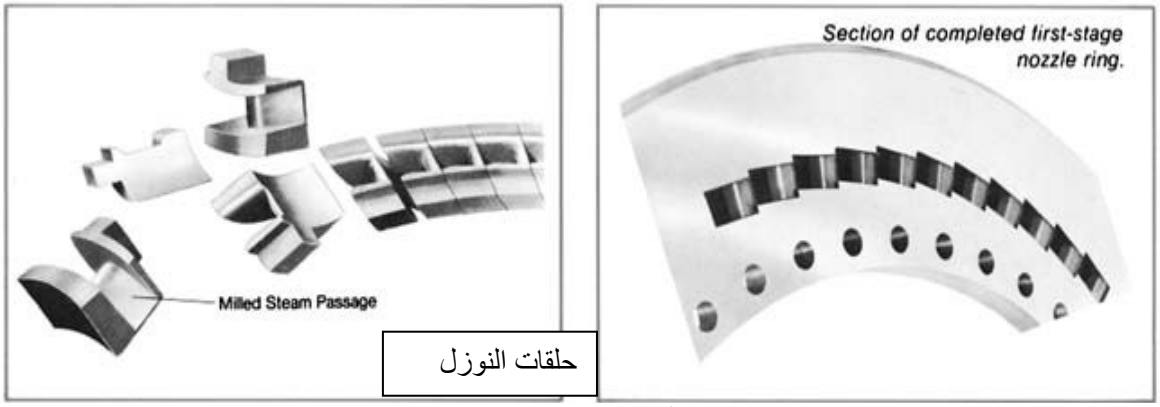
وتقوس قطعة الريشة الثابتة المستخدمة في المراحل المركبة للسرعة يعتمد فقط على قوس الفوهة. بينما الفوهات التي تكون مركبة في الحواجز فهي عامة تمتد حول الحاجز الكلى .



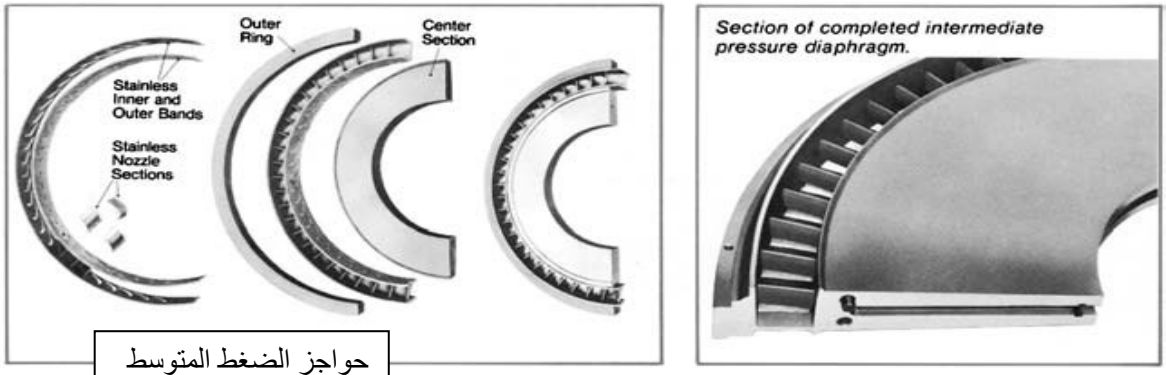
شكل 1-5-1-2 يوضح الفوهات المتقاربة والمتقارب- متباعد وفروقات الضغط للبخار المحمص

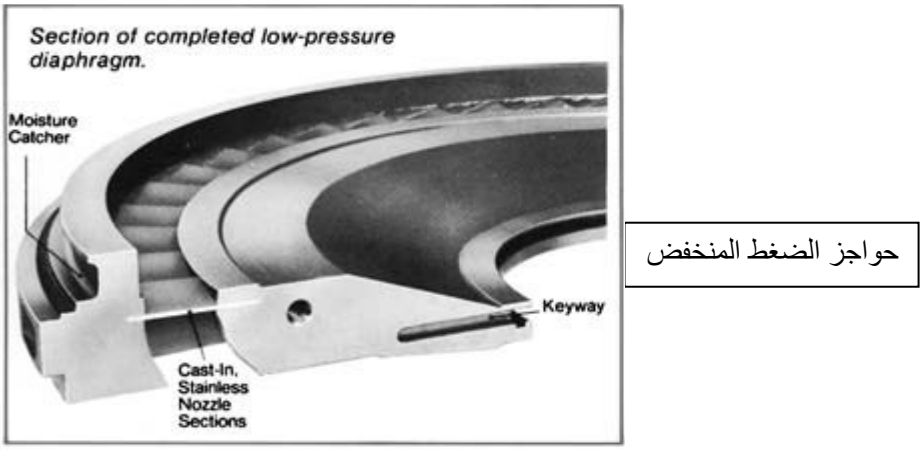
1-5-1-3حلقة تثبيت النوزلات Nozzle Diaphragm:

تظهر هذه الحلقة على الجهة الداخلية من غلاف التوربين تحتوي على جيوب تثبيت النوزلات مع اخاديد توجيه البخار بدون تسريب خلال النوزلات شكل 1-5-1-3(أ و ب وج) لحلقات تثبيت النوزلات .



شكل 1-5-1-3أ حلقات تثبيت النوزلات للمرحلة الاولى

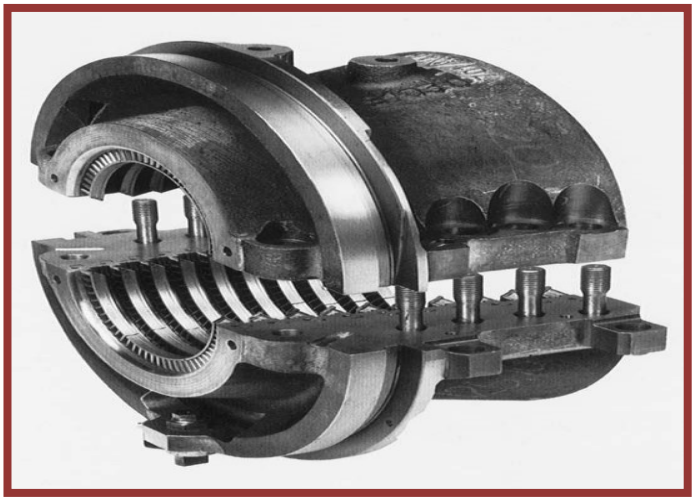




شكل 1-5-1-3ب حلقات تثبيت النوزلات للضغوط المنخفضة والمتوسطة

تستخدم الحواجز **diaphragm** بين المراحل المتتالية في التوربينات الدفعية وهي تعمل كدعامة للفوهة(النوزل) وتمنع مرور البخار من مرحلة الى اخرى . وهي تصنع من نصفين ومشقوقة بطول خط مركز الغلاف وفي كل نصف من الغلاف يتم تصميم تجويفات بحيث يمكن رفع النصف العلوي بسهولة.

ويمكن ان تكون مصنعة من الحديد الزهر لدرجات تصل الى 450° ف(232° م) وفي مثل تلك الحالة الريش المصنوعة من مادة الصلب المقاومة للتاكل تكون مصبوبة بالتكامل مع الحواجز او يمكن ان تكون من لوح صلب او صلب مصبوب وفي هذه الحالة ريش الفوهة تكون ملحومة مع الحواجز.



شكل 1-5-1-3ج حلقات تثبيت النوزلات على غلاف التوربين

1-5-2الأجزاء الدوارة Rotors:

تصنع الأجزاء الدوارة من الصلب المطروق او يتم تصنيعها من عدة مطروقات اصغر.
والمطروقات تصنع من مصبوبات مصنعة بواسطة عملية القلب المفتوح أو عملية البواتق أو الفرن الكهربائي. ويتم سبك أنواع الصلب حيث يمكن تواجدها حتى درجات الحرارة التي تزيد عن 800° ف(427° م) وهي كما يلي:

1-5-2-1المحور Shaft:

بما إن التوربين يعمل تحت درجات حرارة عالية وسرع عالية فأن المادة التي يصنع منها هذا الجزء يجب إن تكون على درجة عالية من النقاوة والتجانس حيث إن الشوائب تسبب الشقوق تحت الضغوط ودرجات الحرارة العالية ويكون المحور ذو صلابة عالية ومقاومة للاجهادات المختلفة التي يتعرض لها وهو يحمل الأقراص الدوارة .

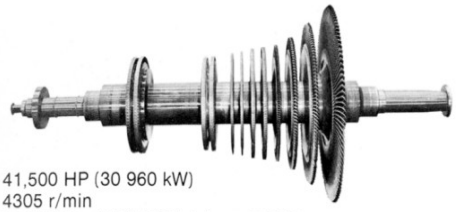
1-5-2-2القرص الدوارDisc:

وهو مساحة سطحية كبيرة يثبت على المحور الدوار وبعض الأحيان يصنع كقطعة واحدة مع المحور ،الهدف من القرص الدوار هو امتصاص حرارة الريش وتوزيعها على مساحة سطحية كبيرة لتقليل الاجهادات على محور التوربين بالإضافة إلى نقله للطاقة الميكانيكية من الريش المثبتة حول المحيط الى محور التوربين .

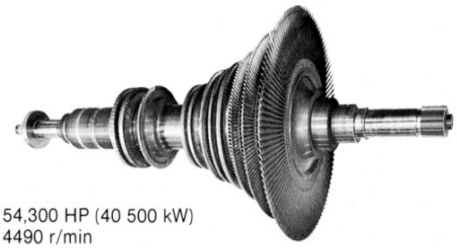
المحور الدوار قطعة واحدة مع الاقراص التي تحمل الريش

المحور الدوار مثبت عليه الاقراص التي تحمل الريش بواسطة الخابور

تمددي احادي

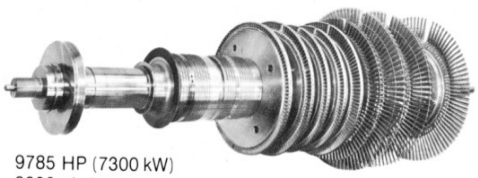


Power: 41,500 HP (30 960 kW)
Speed: 4305 r/min
Inlet steam: 890 PSIG—875° F (61.3 bar—468°C)
Exhaust steam: 4″ HGA (135 mbar)

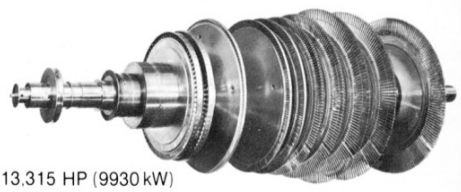


54,300 HP (40 500 kW)
4490 r/min
1592 PSIG—941° F (110 bar—505°C)
3.15″ HGA (107 mbar)

تمددي ثنائي



Power: 9785 HP (7300 kW)
Speed: 9030 r/min
Inlet steam: 800 PSIG—800° F (55.1 bar—427°C)
Exhaust steam: 4.5″ HGA (152 mbar)



13,315 HP (9930 kW)
5490 r/min
600 PSIG—590° F (41.3 bar—310°C)
3.5″ HGA (119 mbar)

1-5-2-3الريش الدوارة Moving blades:

تثبت الريش الدوارة على القرص الدوار وتعتبر عنصر التشغيل بالنسبة للتوربين البخاري(حتى اكتشف التوربين البخاري الذي يعمل بدون ريش **Bladeless turbine** والذي لا يتعدى المحركات الصغيرة إلى حد ألان وذو قدرات قليلة) حيث يتم من خلالها تحويل واستغلال الطاقة التي يحملها

البخار إلى طاقة تعطى للريشة والتي من خلالها يتم نقل هذه الطاقة إلى محور التوربين لإنتاج الطاقة الميكانيكية لتشغيل الحمل المربوط على التوربين تكون الريش في التوربينات الدفعية قصيرة فلا يوجد فيها تغير في زاوية ميل الريشة اما في حالة الريش الدوارة في التوربينات الرجعية (رد الفعل) تكون الريش طويلة وقد تصل في بعض التصاميم إلى متر فتكون الريش طويلة جدا لهذا نلاحظ إن هناك تغير في زاوية ميل الريشة عند دخول البخار وخروجه من قاعدة الريشة إلى رأسها وذلك للحصول على سرعة متغيرة تتناسب مع هذا الطول.

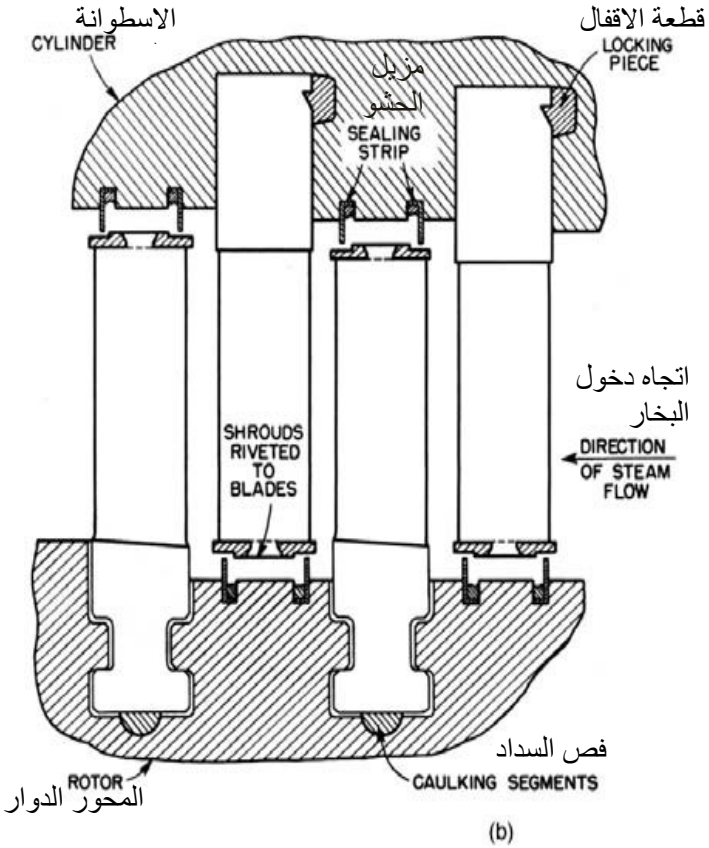
أ -أجزاء ريشة التوربين البخاري :

1 * المقطع الانسيابي للريشة / وهو الجزء الظاهر من ريشة التوربين ويعتبر عنصر التشغيل في التوربين يتم من خلاله تحويل الطاقة بنوعيها الحراري والحركي وتصمم الريشة بزاوية ميل مختلفة حسب تصميم التوربين لضمان عدم التذبذب نتيجة اختلاف سرعة دخول البخار .

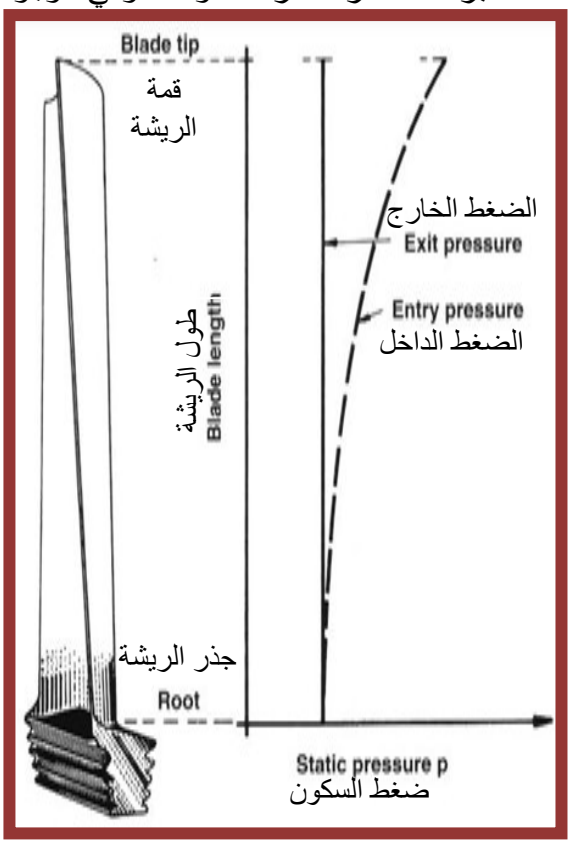
2 * قاعدة إسناد الريشة / يقوم هذا الجزء بإسناد السطح الانسيابي للريشة على القرص الدوار ويظهر في بعض الأحيان بشكل واضح وفي بعض التوربينات لا يكون له وجود .

3 * جذر الريشة / وهو الجزء الذي يقوم بتثبيت الريشة بالقرص الدوار كذلك ينقل الحركة من مساحة مقطع الريشة إلى القرص ثم المحور والجذر له عدة أنواع شائعة مثل /الشجرة المقلوبة **fire tree** / وهناك جذور تشبه حذاء الفرس وجذور صلدة و/ ذيل الحمام /.

4* الإشارة المعدنية / وهي قطعة معدنية توضع على رأس الريشة أو قريبة من الرأس الغرض من وجودها هو المحافظة على الريشة من التذبذب نتيجة سرعة البخار المسلطة عليها وكذلك تعتبر حافة عزل للمرحلة الواحدة وهي موجودة في بعض أنواع الريش .



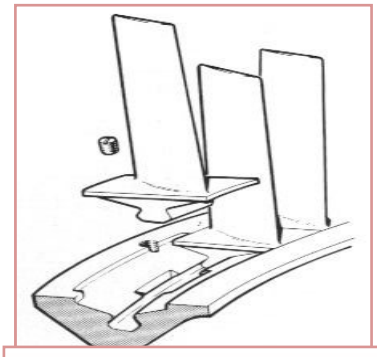
(b)



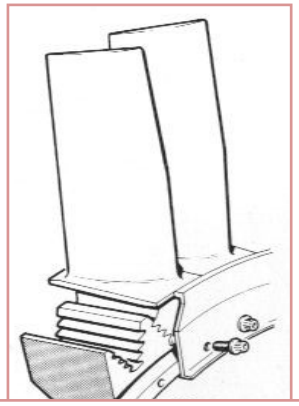
خصائص المواد الأكثر ملائمة لمتطلبات درجة الحرارة لصناعة الريشة بالنسبة للضغط العالي والمنخفض:

1 -المقاومة العالية عند كل من درجة الحرارة العالية والمنخفضة
2 -مقاومة عالية للتعب أو الكلل
3 -مقاومة التآكل
4 -مقاومة للنحات نتيجة البخار الرطب
5 -قابلية التشغيل بالمكنات
6 -قابلية الالتحامية

ب-طرق ربط الريشة

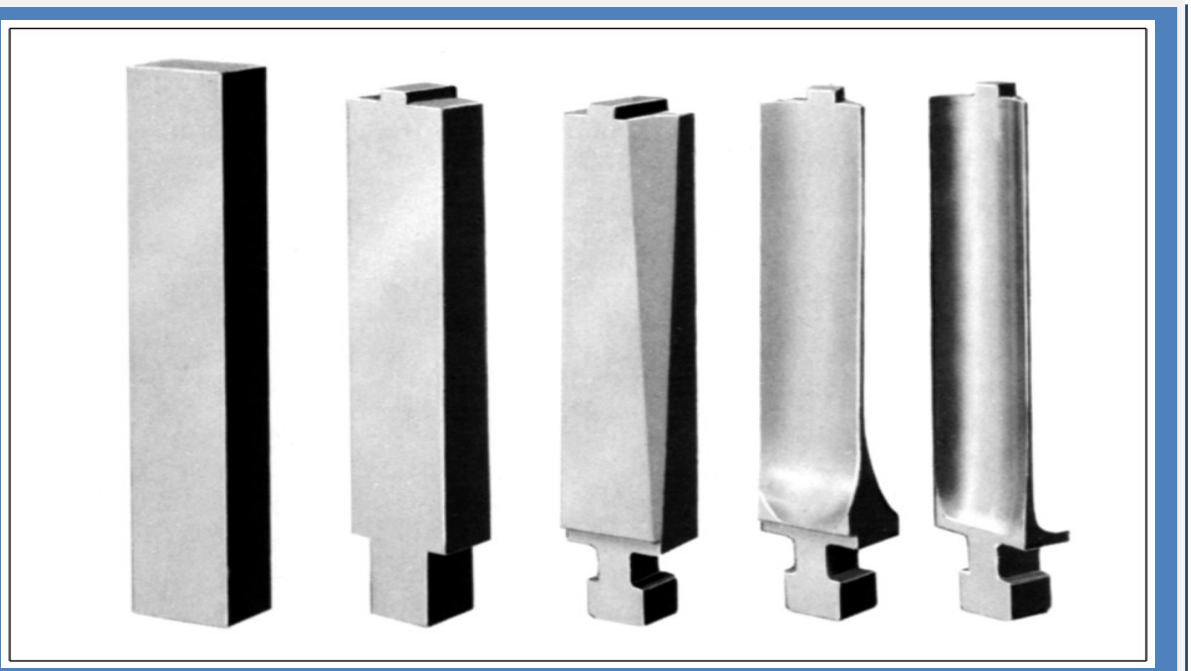


1 -ريشة ذات جذر نوع ذيل الحمام Dovetail root تربط بواسطة برغي قفل locking screw

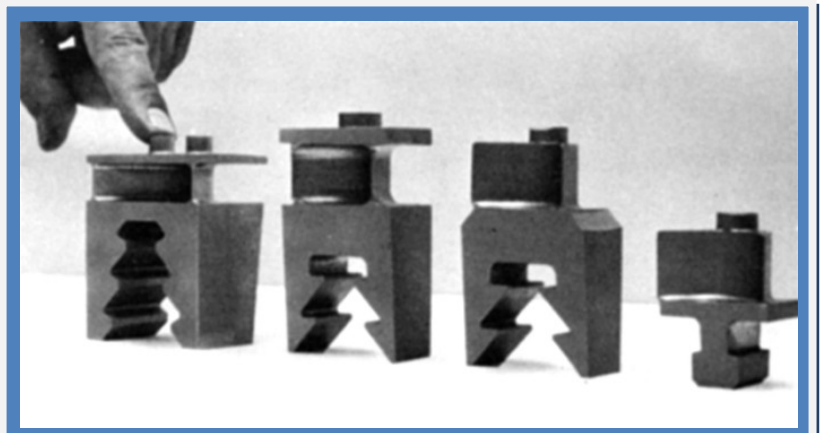


2- ريشة ذات جذر نوع شجرة النار Fir-tree root او تدعى الشجرة المقلوبة تربط بواسطة شريحة قفل Locking plate

3- ريشة ذات جذر تربط بواسطة مسمار مع قفل



شكل يبين مراحل تشغيل الريشة



شكل يبين أنواع جذور الريشة

1-6مانع التسرب :

1-6-1تعريفه:

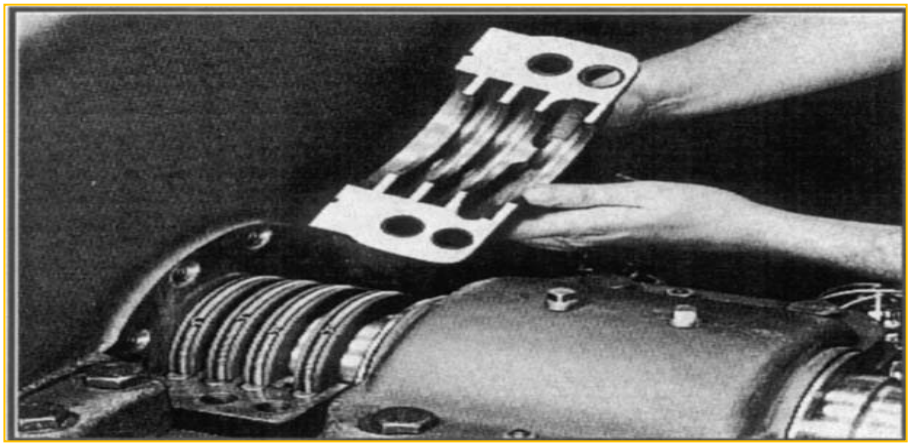
هو عبارة عن حلقات تصنع بتصاميم مختلفة الغرض منها منع تسرب الطاقة (البخار) بحيث يمكن إن تظهر سلبياتها على كفاءة التوربين .

1-6-2اهمية مانع التسرب بالنسبة للتوربين:

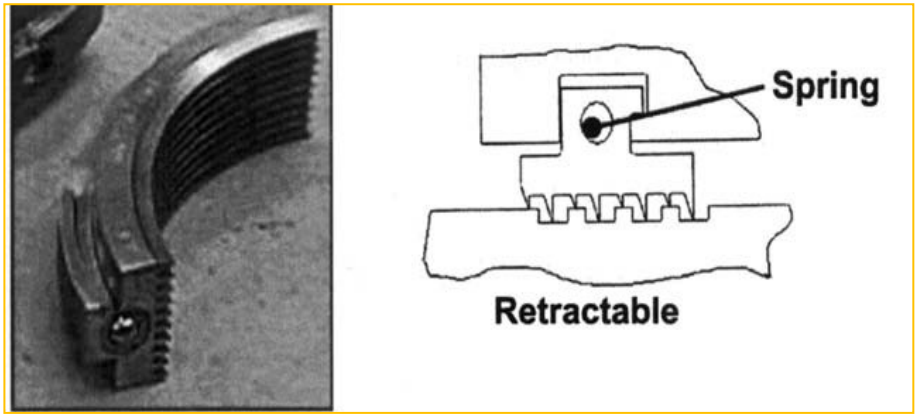
1 * منع تسرب البخار من داخل التوربين من جهة الضغط العالي إلى خارجه من خلال منطقة خروج المحور من غلاف التوربين .

2 * منع دخول الهواء الى داخل التوربين من الجهة الخلفية وخصوصا في توربينة الضغط الواطئ كون ضغط البخار اقل من الضغط الجوي فيميل الضغط الجوي للدخول إلى التوربين من منطقة بروز المحور من غلاف التوربين .

3 * منع تسرب البخار من مرحلة إلى أخرى من خلال قمة الريش الدوارة وغلاف التوربينة من خلال قمة الريشة الثابتة وقرص التوربين .



شكل يوضح الحشوات الكاربونية مع صندوق الحشوات



شكل يوضح حشوة نوع لابيرنث

1-6-3أنواع مانع التسريب :

1* مانع التسرب الميكانيكي < الحلقات الكاربونية > /

يستخدم هذا النوع في التوربينات الصغيرة وذات القدرات القليلة ودائما يكون على أطراف التوربين.

2* مانع التسرب المشطي /

ويعمل هذا النوع بدون استخدام ضغط مائع في عملية منع التسرب بين المراحل .

3*مانع التسرب المشطي وبضغط مائع /

يستخدم هذا النوع في التوربينات الكبيرة جدا حيث يزود بضغط بخار عالي من مصدر ضغط اعلى من ضغط المرحلة التي تلي مانع التسرب وفي حالة اختلاط الهواء مع البخار في منطقة مانع التسرب في الجهة الخلفية للتوربين يوضع جهاز يسمى صائد البخار **steam traip**

1-7المحامل Bearing:

1-7-1 تعريفها:

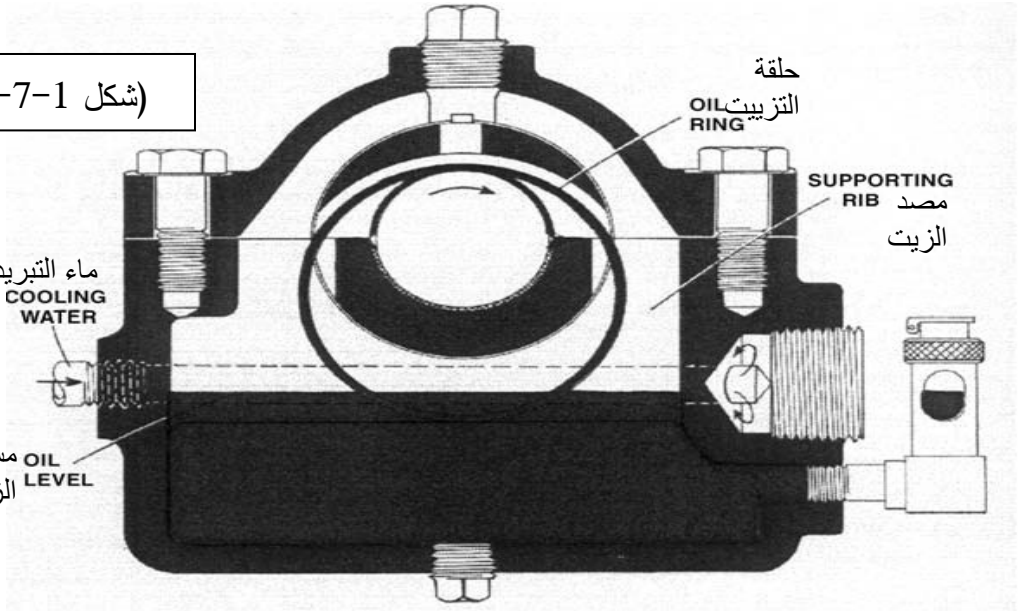
وهي عبارة عن أجزاء تستخدم لإسناد المحاور الدوارة ومنع الحركة المتولدة نتيجة الدوران بالاتجاهين المحوري والعمودي والمتولدة من فرق الضغط على طول المحور وكذلك اختلاف الحمل بين طرفي المحور.

1-7-2 أنواع المحامل المستخدمة في التوربينات البخارية /

محاور التوربينات يمكن تدعيمها نصف قطريا بواسطة محامل من النوع (الكروية ، الكمي (بوشة) ذات التزييت الذاتي ، والمحامل الضغطية). حيث تستخدم المحامل الكروية للتوربينات الصغيرة ولكن الأفضلية تعطى للمحامل الكمية (البوش بيرنك) ذات التزييت الذاتي.

عملية التزييت الذاتي وخصوصا للمحامل ذات الكمي أو البوشة يستخدم فقط للتوربينات الصغيرة التي عادة لا تتعدى قدراتها 100 حصان وتتكون من حلقة أو حلقتين تدوران على العامود وتكونان منغمستان في خزان الزيت وتقومان بإمداد الزيت من خلال التحميل العلوي وتكون مصنوعة من النحاس الأصفرفي اغلب الاحيان وهذا يمكن ملاحظته في (شكل 1-7-2). وفي اغلب التوربينات يستخدم التزييت الضغطي للمحامل وخصوصا الكبيرة الحجم ذات السرع العالية.

(شكل 1-7-2)

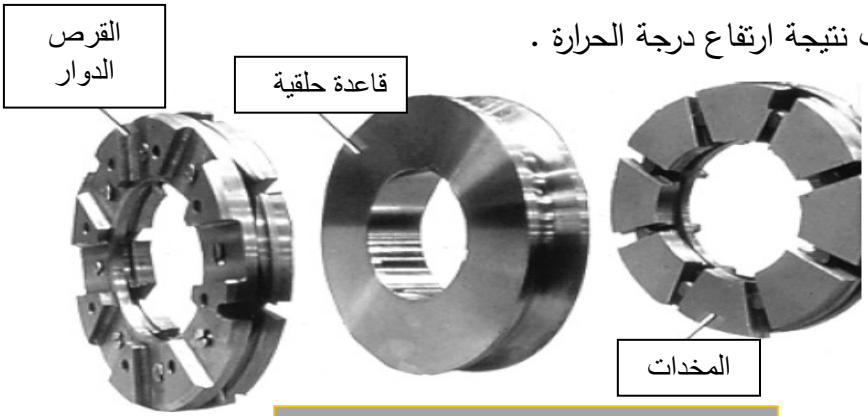


ومن اشهر الانواع المستخدمه من المحامل هو :-

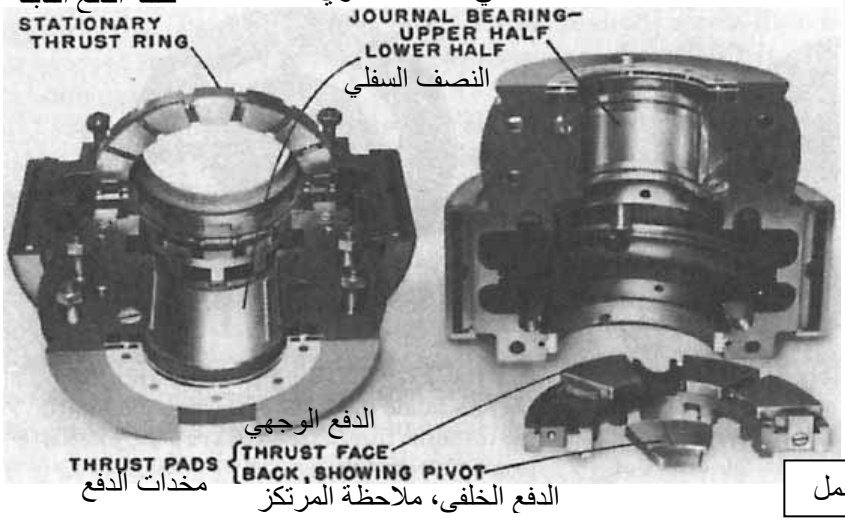
المحامل الساندة JOURNAL BEARINGS

وهي محامل هايدروديناميكية تستعمل لدعم التوربينات البخارية والتي تحتاج إلى سماحية قليلة بين الجزء الثابت والجزء الدوار ، حيث يجب إن تكون ذات تعديل جيد للمحاور alignment بدون إي اختلافات بسبب التآكل أو ما شابه الذي يحدث في المحور وخصوصا اماكن المحامل وتكون عادة مغطاة بطلاء رقيق لمعدن البابيت الناعم Babbitt (soft metal) لكي تتحمل سرعات عالية وتتحمل الاحتكاك الناتج عنها وتكون ذات تصاميم محتوية على أخاديد بداخلها لكي تحوي بداخلها على زيت إضافي يساعدها على التخلص من الحرارة الناتجة من الاحتكاك وحتى تبقى عند ظروف درجات حرارة ملائمة حيث إن معظم الأنواع تشتغل عند درجات حرارة تصل إلى 90 سيليزية .

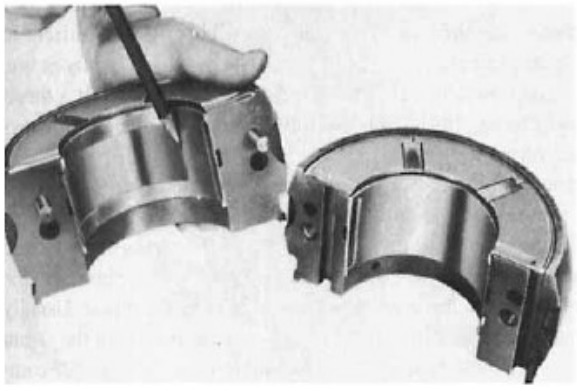
توجد في اغلب التوربينات الكبيرة الحجم منظومة لرفع الضغط للزيت الذي يستخدم بالمحمل oil-lift system (jacking oil) حيث يساعد على رفع الضغط عند بدء التشغيل لتقليل الحمل على مضخة الزيت الترسية والتي تاخذ حركتها من محور التوربين وكذلك لتكوين فلم للزيت يحيط بالمحمل لأنه يحتاج إلى ضغط عالي حتى تصل التوربينة إلى سرعتها المقرر وتقوم بذلك المضخة الميكانيكية (الترسية) بإكمال مهمة إيصال الزيت إلى المحمل وعند انطفاء التوربين كذلك تحافظ منظومة رافع الضغط على الضغط العالي لكي يبقى الفلم الزيتي في المحامل عند انخفاض سرعة التوربين وهذا يؤدي إلى المحافظة على أجزاء التوربين من التلف نتيجة ارتفاع درجة الحرارة .

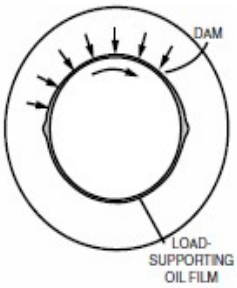


شكل يوضح اجزاء محمل نوع تايلت المحوري

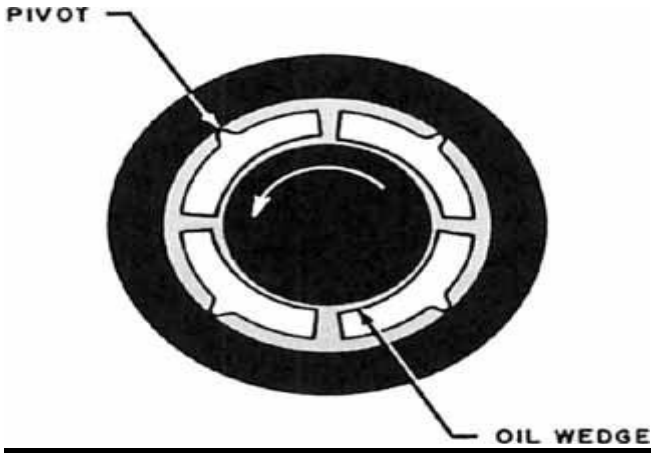


يعتمد عمل المحمل الساند على ظاهرة تسمى oil whip or oil whirl دوران الزيت بضغط عالي مابين المحمل والمحور الدوار وهذا العمل يعتمد على ثلاث عوامل رئيسية هي (الحمل،السرعة،لزوجة الزيت) حيث هذه العوامل يجب إن تتوفر لكي ينجح عمل المحمل الساند وهي التي تمركز المحور في وسط المحمل.





(((يمثل الشكل أعلاه محامل ضغطية Pressure bearing من نوع ***JOURNAL BEARINGS*** الأخاديد العريضة المؤشر عليها في الصورة هي الأخاديد التي تساعد على وجود ضغط من الزيت داخل الأخاديد مما يعطي الزيت مقاومة عالية لكي يخفض درجة الحرارة وأيضا يقوي الفلم المتكون من الزيت)))



(((نوع أخر للمحامل ذات المساند يحتوي على أربعة فصوص تساعد على استقرارية المحمل مولدة خيط من الزيت يدعى الفلم يسمى أيضا هذا النوع Tilting-pad antiwhip bearingالمخدة المتميلة او المتارجحة)))

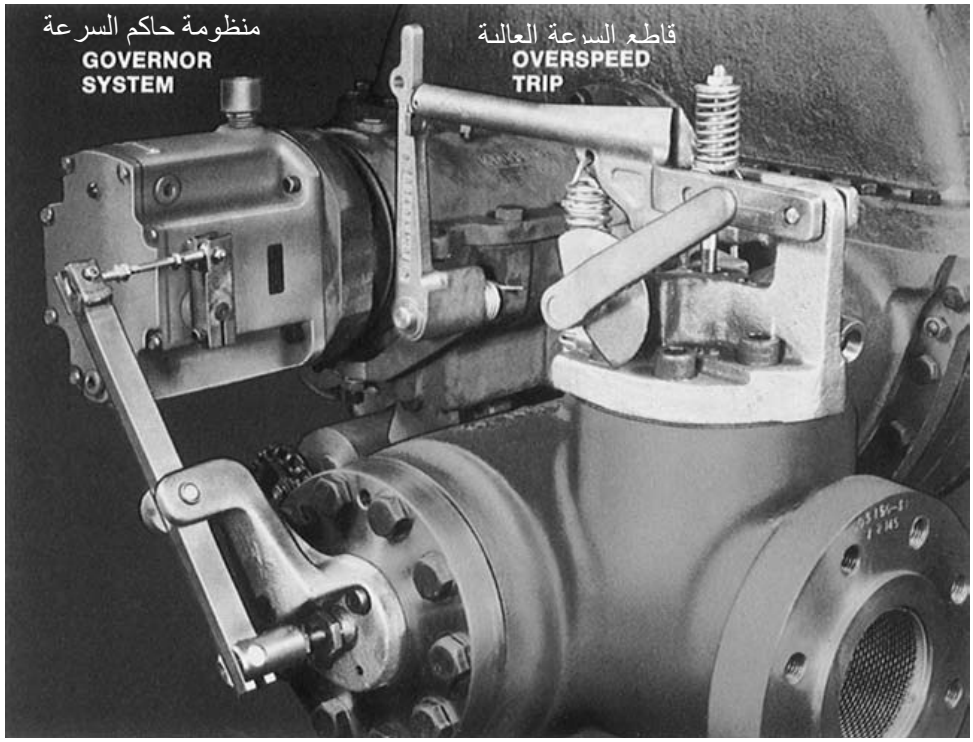
1-8حاكم السرعة

(Speed Governor)

وهو جهاز سيطرة على التوربين لضبط سرعته التي يختارها المشغل اعتمادا على مواصفات التوربين من الشركة المصنعة له بالرغم من تغير الحمل عليه زيادةً أو نقصاناً ويكون على تصاميم مختلفة(ميكانيكية ، هيدروليكية ، هيدروليكية/ إلكترونية ، كهربائية/ إلكترونية) .

يقوم هذا الجهاز بالتحكم في كمية البخار المار من صمام الدخول للتوربين (steam inlet valve) وذلك بتغير سعة فتحته ، وهناك حاكم آخر للسرعة الزائدة (Over Speed Governor) يتدخل عندما تزداد سرعة التوربين بصورة فجائية والتي تكون في بعض انواع التوربينات إلى أكثر من (10%) من سرعة التوربين المحددة وذلك بغلق صمام دخول البخار أو صمام آخر في طريق البخار.

وتحصل هذه الحالة عندما يكون هناك خلل في أداء عمل حاكم السرعة مما يجعلهُ غير قادر على السيطرة على التوربين في هذه الحالة فيتم إيقاف التوربين فوراً عن العمل منعاً لانفلات سرعة التوربين إلى سرع أعلى من ذلك تُحْدث ضرراً للأجزاء الداخلية للتوربين البخاري لاحظ الشكل 1-8.

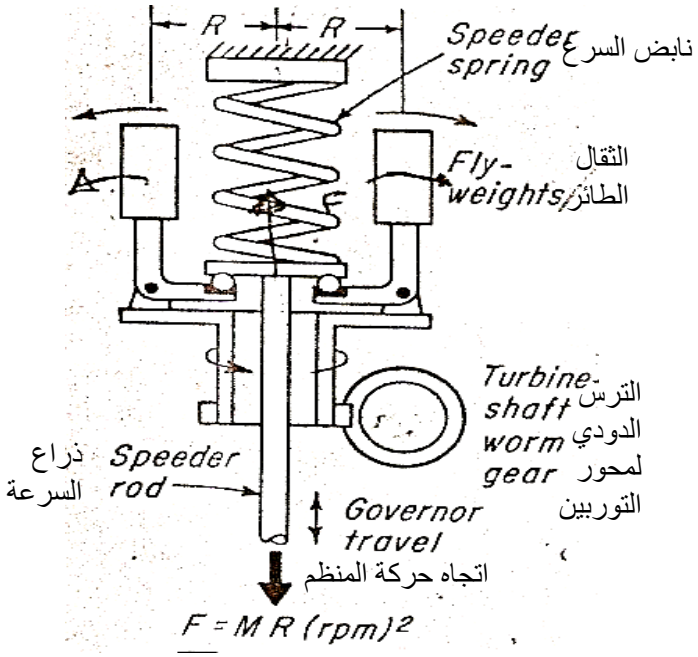


الشكل 1-8 يوضح منظومة حاكم السرعة مع منظومة قاطع السرعة العالية

1-8-1 منظم السرعة الميكانيكي : [flyweight governor]

يرتبط منظم السرعة الميكانيكية بسرعة التوربين عن طريق مسنن متصل بمحور التوربين، حيث تتغير سرعة التوربين اعتمادا على مقدار الحمل المربوط مع المحور فإذا قل الحمل بشكل مفاجئ تزداد سرعة التوربين وعليه تزداد سرعة الثقالات في منظم السرعة الميكانيكية والذي يتم عن طريق المسنن

وبذلك تزداد قوة الطرد المركزي المتولدة من دوران الثقالات فعليه تتغلب قوة الطرد المركزي على القوة المسلطة على النابض فيرتفع النابض إلى الأعلى ويرفع معه ذراع السرعة المرتبط بمنظومة نقل الحركة المؤثرة على فتحة دخول البخار الى التوربين لاحظ شكل 1-8-1.



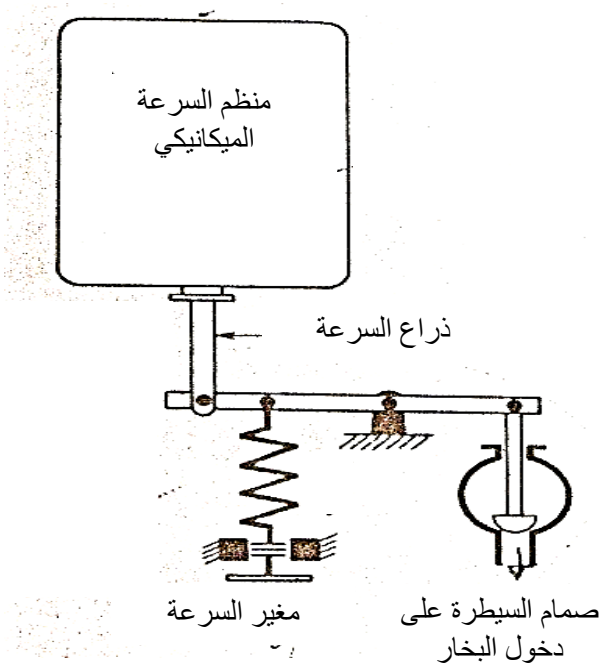
شكل 1-8-1 يوضح اجزاء منظم السرعة الميكانيكي

1-8-2منظومة نقل الحركة من منظم السرعة الميكانيكي إلى صمام البخار الرئيسي /

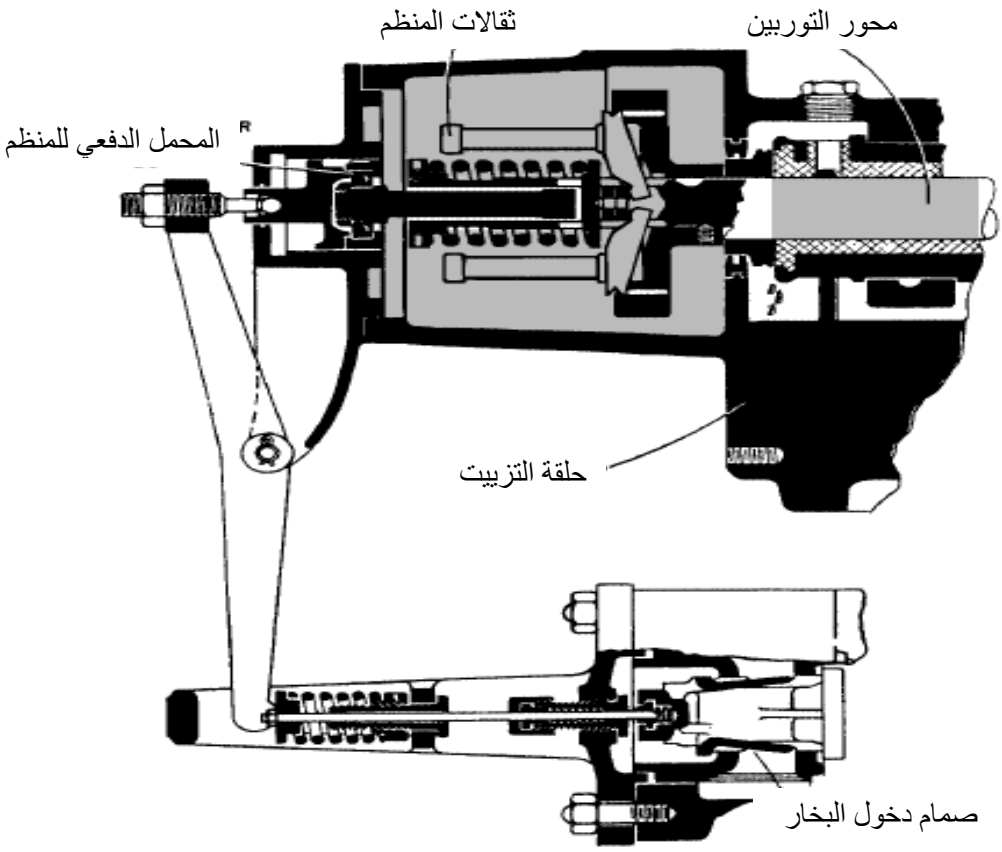
هذه المنظومة تستخدم في نقل الحركة المتولدة من منظم السرعة الميكانيكي إلى صمام البخار الرئيسي في التوربينات الصغيرة ذات القدرات القليلة والتي لا تحتاج إلى قوة كبيرة لتحريك صمام البخار الرئيسي

مبدأ عمل هذه المنظومة /

في حالة نقصان الحمل على التوربين تزداد سرعة التوربين وبنفس الوقت تزداد سرعة دوران الثقالات في منظم السرعة الميكانيكي فتتولد قوة طرد مركزي كبيرة تتغلب على قوة النابض ونتيجة خروج الثقالات إلى الخارج يرتفع ذراع السرعة إلى الأعلى ويرفع عتلة الصمام أو المرتبطة بالصمام فتنزل العتلة من الطرف الأخر المرتبط بصمام البخار الرئيسي فتسلط قوة تحرك ذراع الصمام إلى الأسفل ومعها سدادة صمام دخول البخار فتقل فتحة دخول البخار فترجع السرعة إلى السرعة المقررة والعكس صحيح أيضا شكل 1-8-2 .

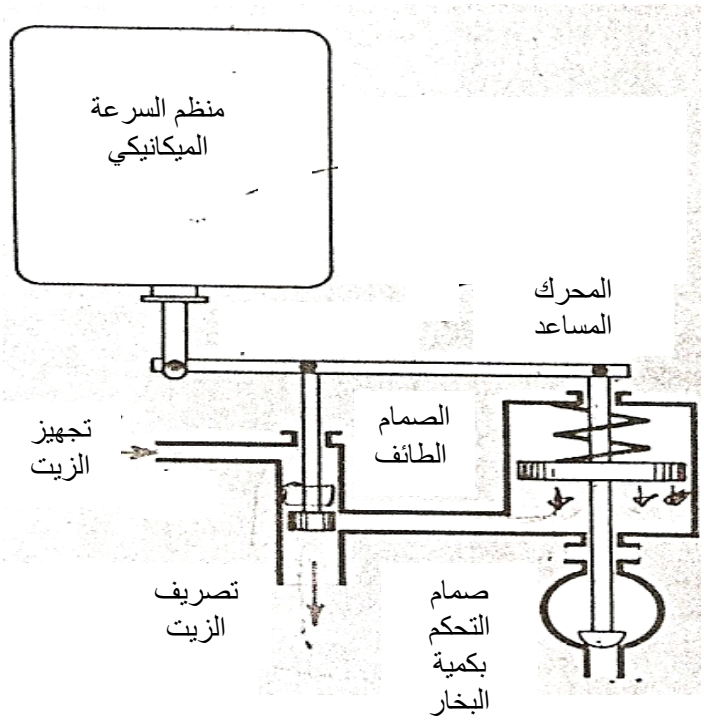


شكل 1-8-2
يوضح اجزاء منظومة نقل الحركة من منظم السرعة الميكانيكي إلى صمام البخار الرئيسي



1-8-3منظومة نقل حركة هيدروليكية ذات محرك مساعد منفرد /

تستخدم هذه المنظومة في نقل الحركة من منظم السرعة الميكانيكية إلى صمام البخار الرئيسي في التوربينات المتوسطة الحجم.



شكل 1-8-3 يوضح اجزاء منظومة نقل حركة هيدروليكية ذات محرك مساعد منفرد

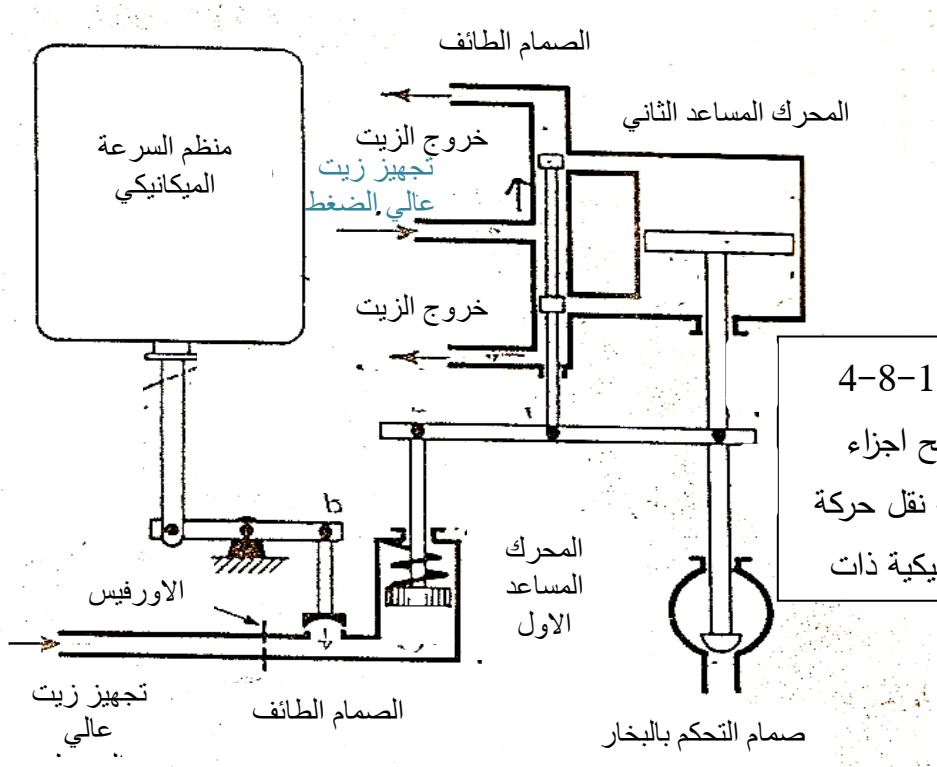
مبدأ عمل هذه المنظومة /

عندما يقل الحمل على التوربين تزداد سرعة التوربين عن الحد المقرر وتزداد سرعة الثقالات في منظم السرعة الميكانيكي مولدا قوة طرد مركزي كبيرة ترفع العتلة إلى الأعلى وبنفس الوقت ترفع الذراع المرتبط بصمام الطائف من الأعلى فيغلق الصمام فتحة تجهيز الزيت للمنظومة ويسمح للزيت بالخروج من فتحة التصريف فيقل ضغط الزيت أسفل المكبس في منظومة المحرك المساعد فتتغلب قوة النابض اعلى المكبس على ضغط الزيت فينزل المكبس وبالتالي ينزل ذراع الصمام وسدادة صمام البخار الرئيسية فتقل كمية البخار الداخل للتوربين وتقل السرعة وتعود إلى السرعة المقررة والعكس صحيح أيضا شكل 1-8-3.

1-8 -4منظومة نقل حركة هيدروليكية ذات محركين مساعدين /

هذه المنظومة تقوم بنقل الحركة من منظم السرعة الميكانيكي إلى صمام البخار الرئيسي في التوربينات الكبيرة والتي تحتاج إلى قوة كبيرة لتحريك ذراع الصمام .

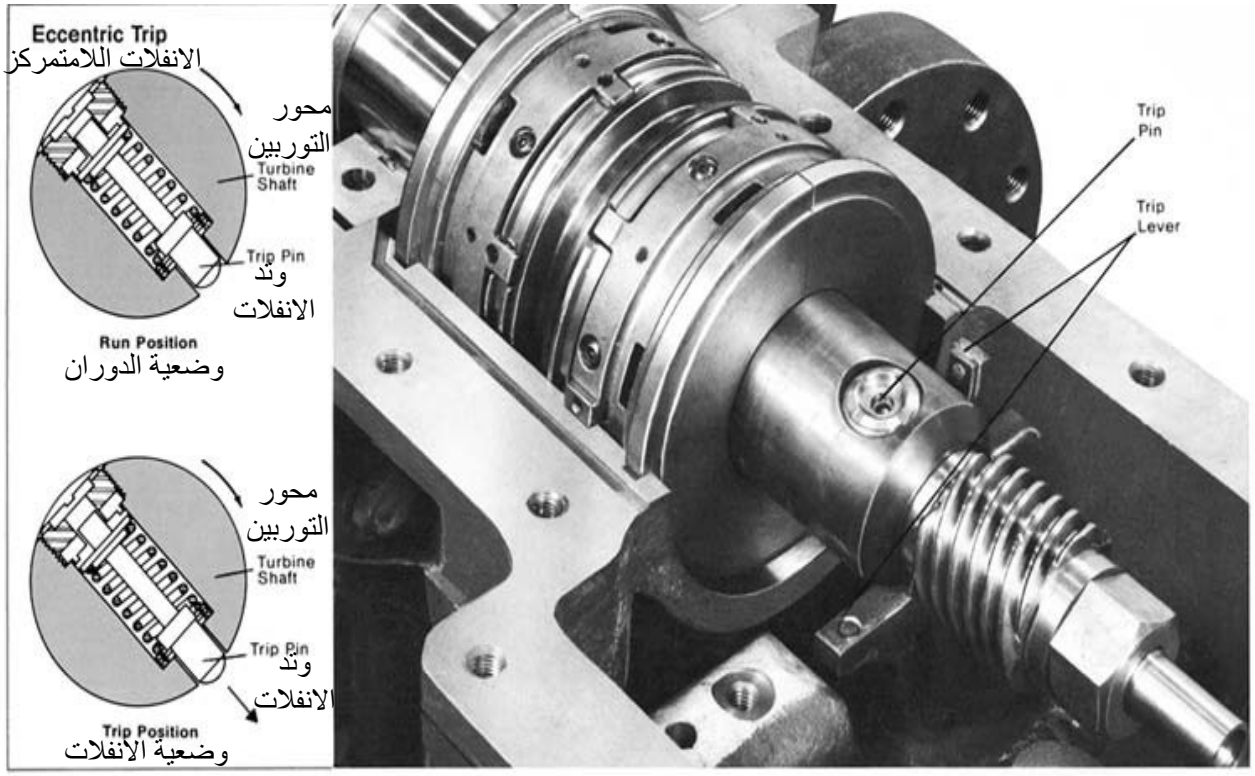
مبدأ عمل المنظومة / عندما يقل الحمل على التوربين تزداد سرعة التوربين عن الحد المقرر وتزداد سرعة دوران الثقالات فتزداد القوة < قوة الطرد المركزي > فيرتفع ذراع السرعة ويرفع العتلة المتصلة به إلى الأعلى فتنزل العتلة من الطرف الثاني المتصلة بالصمام الطائف في منظومة المحرك المساعد الأول مسلطا ضغطا إضافيا على الزيت في هذه المنظومة فتزداد القوة تحت المكبس ويتغلب على قوة النابض اعلى المكبس فيرتفع المكبس إلى الأعلى في هذه المنظومة وترتفع عتلة من الطرف نفسه والمرتبطة في منظومة المحرك المساعد فيصعد الصمام الطائف السفلي والعلوي إلى الأعلى سامحا للزيت بالخروج من فتحة التصريف السفلي وسامحا للزيت بالدخول من فتحة التجهيز إلى منظومة المحرك المساعد الثاني وعليه تتولد قوة دفع المكبس إلى الأسفل دافعة معها ذراع صمام البخار الرئيسي فتقل فتحة دخول البخار وتقل سرعة التوربين وترجع إلى الحد المقرر والعكس صحيح أيضا .

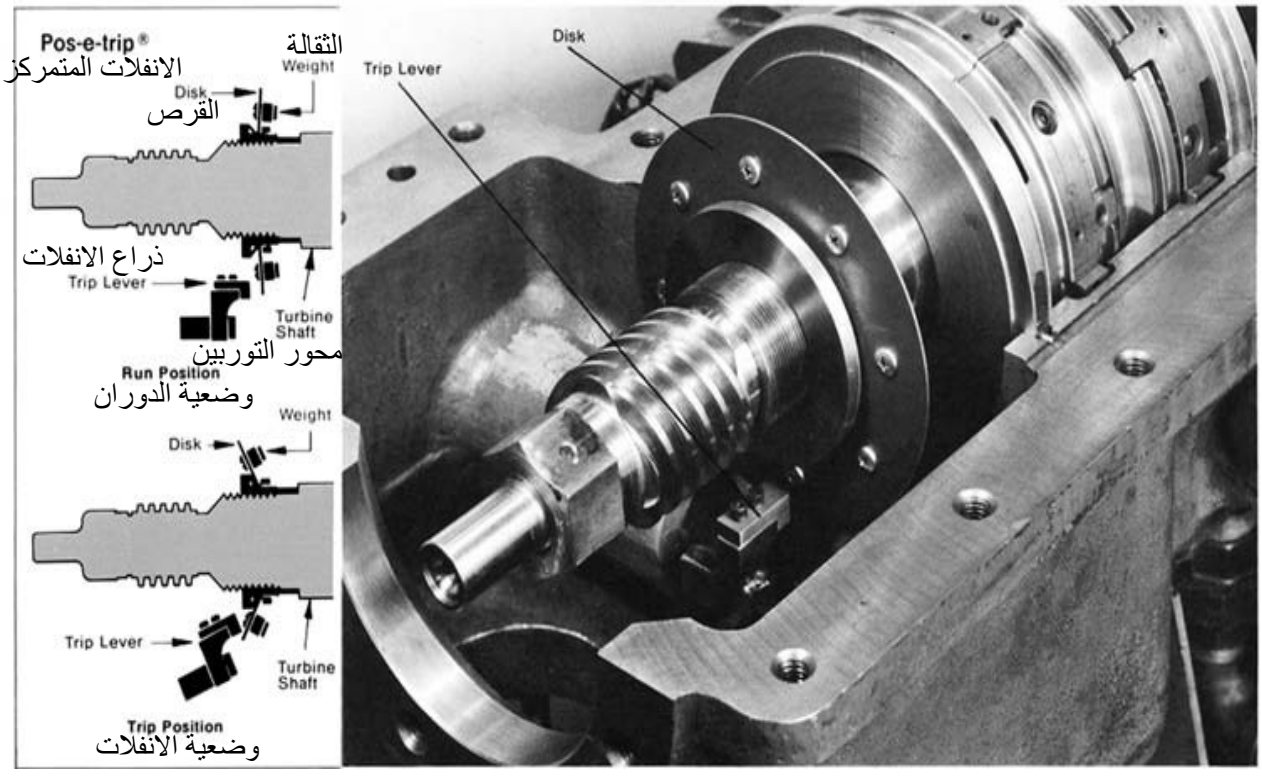


شكل 1-8-4
يوضح اجزاء
منظومة نقل حركة
هيدروليكية ذات

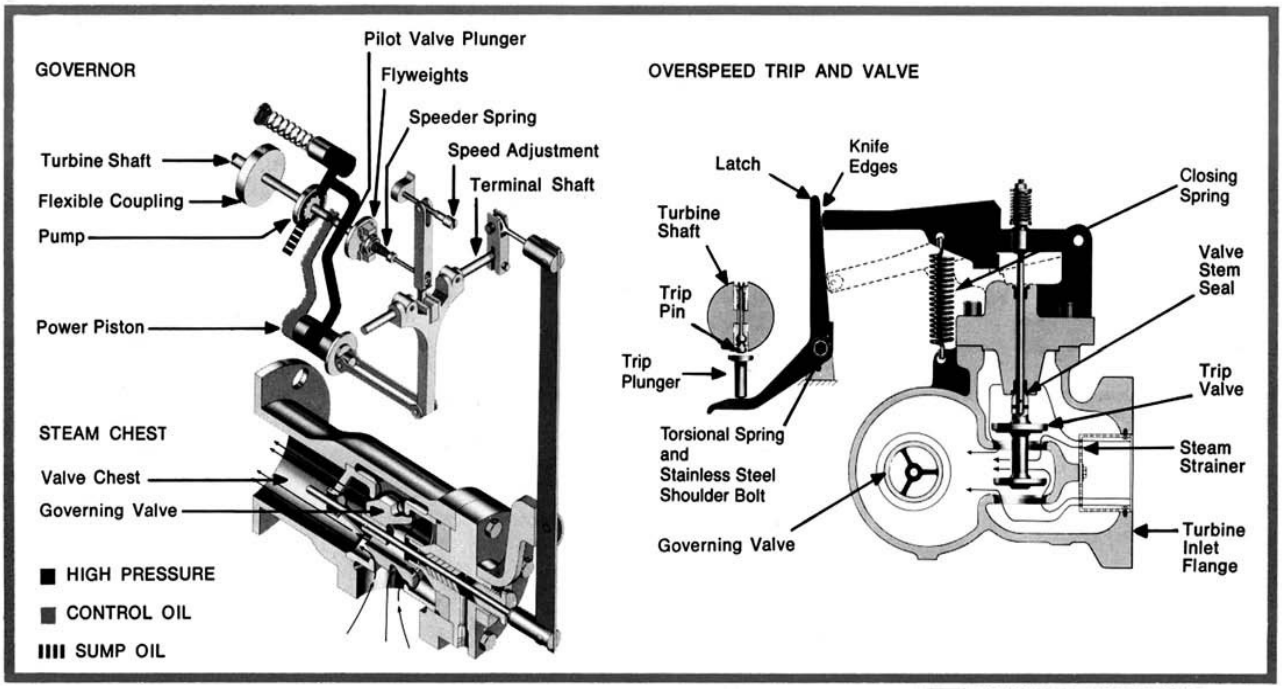
1-8-5 قاطع السرعة العالية أو انفلات السرعة الزائدة/ Over speed trip

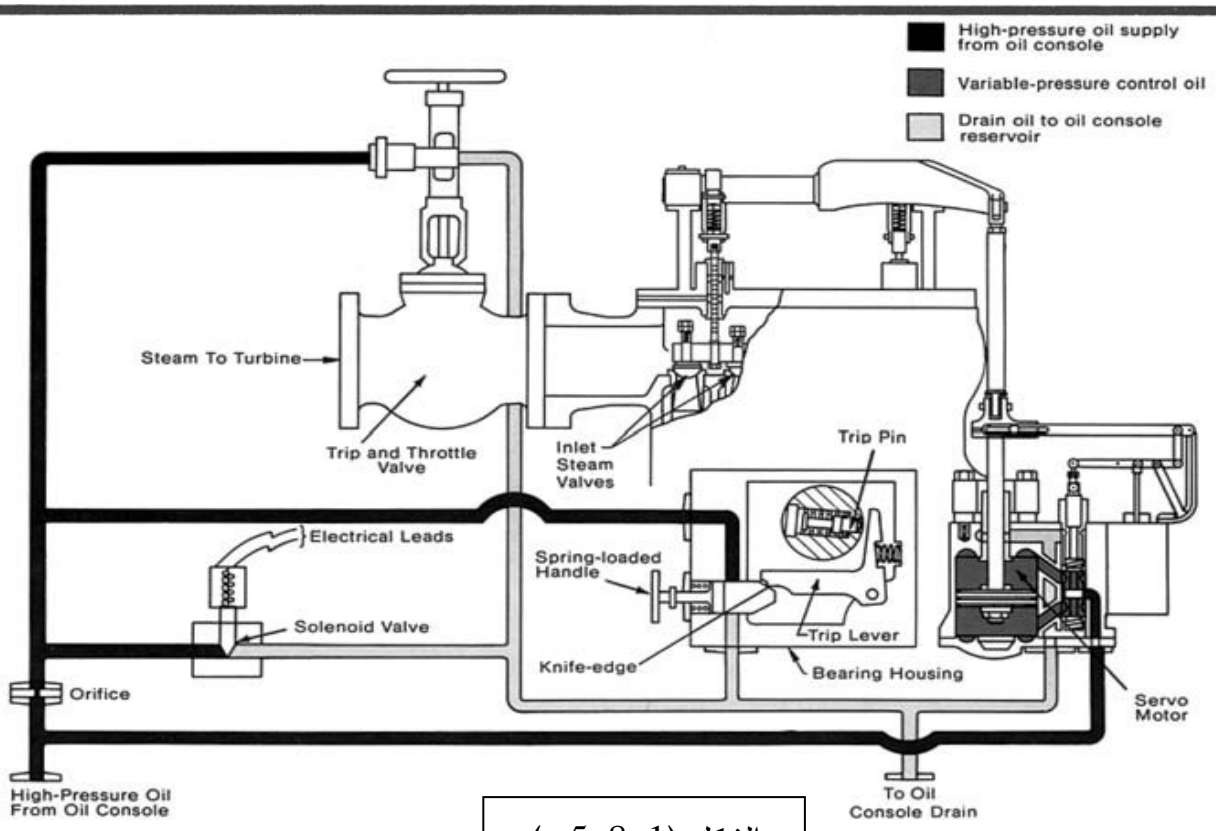
وهي منظومة حماية تعمل مع منظم السرعة عند حصول زيادة في ضغط البخار بشكل مفاجئ أو عند إزالة الحمل تماما عن التوربين حيث ترتفع السرعة بشكل مفاجئ الى <10% > من السرعة القصوى المحددة للتوربين من قبل المصنع وحسب التصميم عندها يعمل قاطع السرعة على إيقاف التوربين شكل 1-8-5(أ و ب).





شكل 1-8-5أ يوضح منظومة انفلات السرعة الزائدة وبنوعين المتمركز واللامتمركز





الشكل (1-8-5ب)

توربينات السرعة الثابتة تكون عادة مزودة بأداة إنفلات(اعتاق) للسرعة الزائدة والتي تعتبر أداة طوارئ والتي تقوم بغلق البخار عن التوربينة في حالة فشل منظم السرعة الثابتة في أداؤه لعمله او عند زيادة سرعة التوربين المقررة. وأدوات الإعتاق يجب تركيبها عند نهاية عامود التوربينة وتكون ايجابية في عملها ومبسطة وقوية في إنشائها. ان الطراز الاكثر استخداما لمنظومات الاعتاق هو ميكانيكي التحكم ففي هذا النوع يتركب كباس صلب ممسوك في مكانه بواسطة نابض مضغوط كما موضح في شكل1-8-أوب.

عندما تكون التوربينة قد وصلت إلى السرعة المسبقة التحديد والقوة الطاردة المركزية للكباس تتغلب على انضغاط النابض وتتسبب في تحريك الكباس في الاتجاه إلى الخارج يصطدم الكباس بسقاطة الطوارئ المثبتة. وهذا يحرر آلية النابض المثبت على بوابة تقع عند منطقة دخول البخار للتوربين والتي تغلق البخار بعد صمام دخول البخار الرئيسي من خلال ذراع توصيل مرفقي ويغلق إمداد البخار ولإعادة تشغيل الوحدة يعاد فتح وإعادة ضبط صمام الإعتاق وإعادة ضبط آلية الإعتاق للطوارئ بواسطة إعادة ضبط يد التشغيل.

- 1-8-6الحماية من ضغط العادم Exhaust pressure protection:

يتم التزود بصمامات تصريف أو أدوات إعتاق ضغط راجع من اجل منع نشوء الضغط الزائد في غلاف عادم التوربينة الناتج من الغلق الغير مقصود لصمام المنع في خط العادم أو الناتج من عدم التداول الكافي للماء في المكثف. اذا كان التوربينات من الانواع الصغيرة يكون عمليا هو تركيب صمامات تصريف في غلاف العادم اما بالنسبة للتوربينات الكبيرة يصبح ذلك غير عمليا نتيجة الأحجام الكبيرة لبخار العادم الذي يتم تداوله.

فتكون التوربينة الدفع الرئيسية ذات قدرة 8500 حصان يكون من الضروري تركيب صمام بقطر من 14-15 انج للحصول على التصريف الكامل، وهذا الصمام الكبير يكون مشتركا مع الخطوط اللازمة للعادم التي اعلى المدخنة لمنع الحوادث الشخصية والتي ينتج عنها تكاليف عالية وخطوط أنابيب كبيرة إضافية في غرفة المحركات وفي مكان هذا يتم تركيب صمام أمان لإعطاء إنذار عند الوصول للضغط الراجع المسبق التحديد.

فاذا لم ينجح المشغل في غلق التوربينة أو تحديد مكان الضغط الراجع المتزايد في هذه الحالة تقوم أداة الإعتاق بالعمل على غلق صمام الخنق. وصمامات التصريف أو الإنذار تكون عادة مضبوطة على إن تفتح عند 10 رطل اعلى من ضغط العادم العادي للتشغيل اللامتكثف وعند ضغط من 2-5 رطل لعملية التكثيف. وأداة إعتاق الضغط الراجع تكون مضبوطة لتعمل عند 5 رطل اعلى من ضبط صمام الأمان.

1-9بعض الملاحظات التي تخص الصيانة والتشغيل:-

تمتاز التوربينات البخارية بأن لها قابلية الاشتغال لفترة طويلة من الزمن والحاجة القليلة إلى الصيانة إذا روعيت بعض الأمور اللازمة أثناء نصبها وتشغيلها وفيها ما يلي بعض هذه الأمور:-

1-9-1تغير في درجات حرارة البخار وتغير الحمل :-

إن تغير في درجات حرارة البخار تحت حمل ثابت أو تغير الحمل بثبوت درجة حرارة البخار يُعرض المحور الدوار وغطاء التوربين إلى اجهادات حرارية فقد يحصل التغيير في درجة حرارة البخار أو التغير في الحمل خلال ثواني معدودة بينما يستغرق إحماء غطاء التوربين إلى عدة ساعات ونتيجةً لذلك يحصل فرق في الاجهادات في غطاء التوربين أو في المحور الدوار ويسبب ذلك حدوث تشوهات في غطاء التوربين والمحور فعليه يجب زيادة أو خفض درجة حرارة البخار أو زيادة أو خفض الحمل بصورة تدريجية وحسب المعدل المسموح به للتوربين من قِبل الجهة المصنعة.

1-9-2نظافة ونقاوة زيت التزييت :-

يوجد في التوربين مضخة ميكانيكية مركبة على المحور الدوار تقوم بتزويد زيت التزييت وزيت السيطرة الذي يقوم بتشغيل صمامات البخار تحت سيطرة حاكم السيطرة وأجهزة السيطرة لذلك يجب المحافظة على نقاوة الزيت وخاصةً من الماء وعدم اتساخهِ لأن الماء يسبب حدوث صدأ للصمامات وأجهزة السيطرة مما يسبب خللاً في أداء عملها كما يسبب اتساخ الزيت انسداد بعض المجاري مما ينتج عنهُ عدم وصول الزيت بكميات كافية للمحامل وهذا بدورهِ يؤدي إلى تلف المحامل وتوقف التوربين ، وعليهِ يجب فحص زيت التزييت من فتره إلى أُخرى.

1-9-3معالجة مياه تغذية المراجل:-

لغرض ضمان عدم ترسب المواد الكلسية على أنابيب المراجل التي تستعمل لانتقال الحرارة ولغرض منع أو تقليل تآكل الأنابيب · يجب المحافظة على نسبة معينة من حامضية ماء التغذية كما يجب فحص ماء التغذية في المختبر بين الحين والآخر للمحافظة على هذه النسبة والمعادلة الأيونية للماء وإزالة الأوكسجين.

1-10المنظومات المساعدة:-

1-10-1معدات تدوير المحور /

عند توقف التوربين عدة ساعات أو لعدة أيام تبدأ الحرارة المختزنة بالمحور والقرص والريشة بالتوزيع على مختلف أجزاء التوربين ولكن هذا التوزيع لا يكون منتظما فينتج عنه اختلاف في درجة الحرارة لهذه الأجزاء وخصوصا محور التوربين مما يؤدي إلى تمدد مختلف في أجزاءه فيسبب حالة التواء أو انحناء في بعض المناطق حتى لو كان هذا الانحناء قليل لا يتجاوز 0.001من الانج في أي مكان من المحور ولمنع هذه الظاهرة يدور المحور بسرعة بطيئة طيلة فترة التوقف وتستخدم لهذا الغرض منظومة كاملة بما فيها محرك كهربائي وصندوق سرعة لضمان تدوير المحور بسرعة مختلفة .

1-10-2 منظومة التزييت /

التزييت عملية مهمة جدا يحتاجها التوربين للتقليل من الاحتكاك في مناطق تلامس المحور مع المحامل ومناطق مخفضات السرعة وذلك بتبريد هذه المنطقة وسطح المحمل Bearing وامتصاص الحرارة من المحور والتوربينة.

اهداف أو واجبات منظومة التزييت هي:-

أ -طرد الحرارة

ب المحافظة على درجة حرارة المحمل وفق حدود أمينة

ج- زيادة عمر المحمل والمحور

تختلف هذه المنظومات من المنظومات البسيطة للتوربينات الصغيرة إلى المنظومات المعقدة الهيدروليكية للتوربينات الخاصة بمحطات الطاقة ومحطات كبس الغاز.

11-1بعض عطلات التوربين البخاري

أدناه جدولا بعطلات التوربين البخاري وأسبابها وطرق معالجتها:-

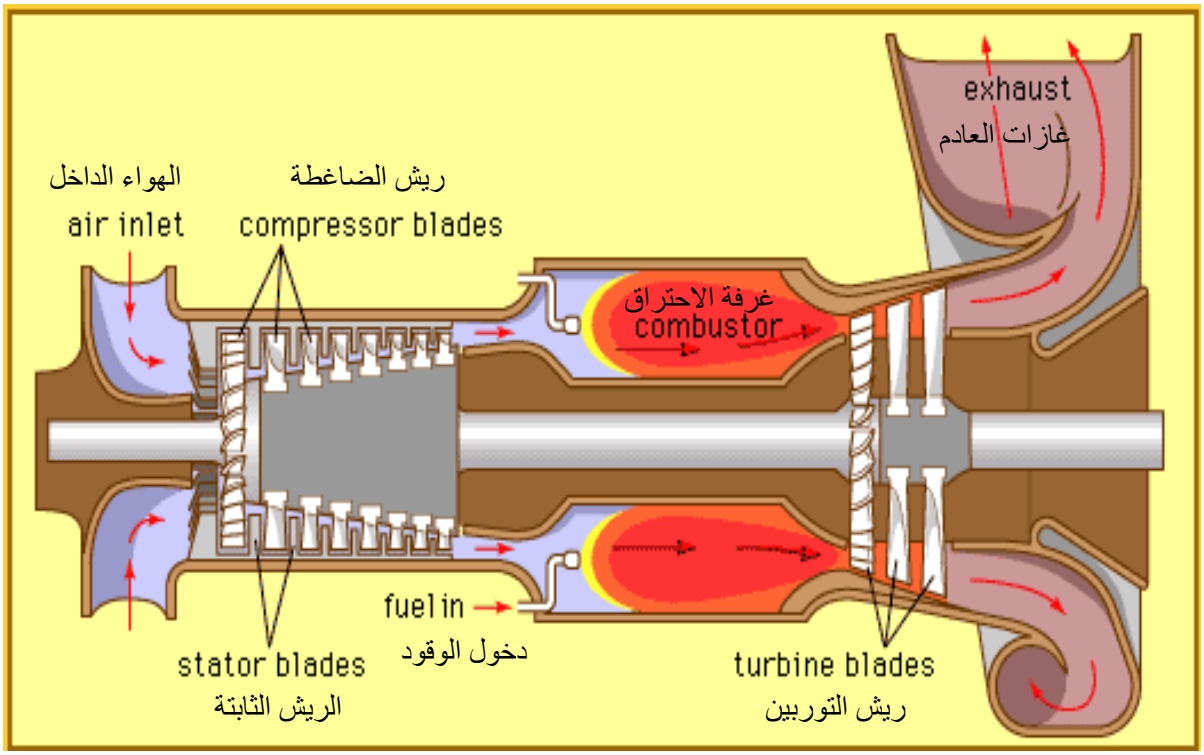
ت	العطل Fault	سبب العطل المحتمل Possible Cause of Fault	طريقة المعالجة Remedy Corrective Action
.1	عدم استطاعة التوربين البدء بالحركة.	أ- صمام الإيقاف Trip Value ليس بوضعه الصحيح ب- ضغط دهن السيطرة ليس كافيا ج- صمام حاكم السرعة Governor Valve محشور في وضع الغلق د- مرشح البخار مسدود Steam Strainer هـ- ضغط البخار غير كاف عند مدخل التوربين و- حشر ميكانيكي في المحور الدواراو انحناء Rotor Binding للتوربين أو ماكنة الحمل	أ- اجعل الصمام بوضعه الصحيح ب- افحص مفاتيح ومعدات دهن السيطرة وصحح الخلل. ج- افحص عتلة الصمام وأجزائه واستبدال التالف منها. د- نظف مرشح البخار هـ- افحص كافة صمامات الغلق قبل دخول التوربين وتأكد إنها في وضع مفتوح وخالية من الماء و- تأكد من ذلك بتدوير المحور الدوار. واتخذ الإجراءات اللازمة
.2	التوربين لا يستطيع إن يبلغ السرعة المطلوبة	أ- ضغط البخار اعلى من اللازم عند مخرج التوربين Exhaust Side ب- معدل جريان البخار للتوربين غير كاف (خنق) ج- الحمل فوق الحد المقرر د- حشر في عتلة صمام حاكم السرعة هـ- مقدار فتحة صمام حاكم السرعة Governor Valve غير كافي و- أبواق البخار أو الريش Steam Nozzles or blades تالفة أو تراكم أوساخ عليها ي- عدم انتظام عمل حاكم السرعة	أ- خفض ضغط البخار عند المخرج إلى الحدود المطلوبة وافحص جميع الصمامات عند الخروج. ب- افحص جميع صمامات دخول البخار تأكد إنها بوضع الفتح وافحص مرشح البخار ونظفه إذا كان متسخا. ج- خفف الحمل إلى الحد المقرر د- افحص واستبدل العتلة أو الأجزاء التالفة فيها هـ- قم بتعيير مدى حركة عتلة الصمام لإعطاء الفتحة المناسبة. و- اغسلها بالماء أو استبدلها حسب الحالة. ي- قم بتصليح، تعيير أو استبدال حاكم السرعة
.3	تسرب البخار من نهاية المحور الدوار بشكل زائد عن المحدد	أ- تأكل أو تلف الحلقات الكاربونية (Carbon Ring) ب- ضعف أو كسر الحلزون النابض الماسك Garter Spring للحشوة ج- ضغط بخار عالي في خط تزويد منظومة مانع تسرب البخار	أ- استبدال الحلقات الكاربونية التالفة ب- استبدال النابض ج- تنظيم ضغط البخار

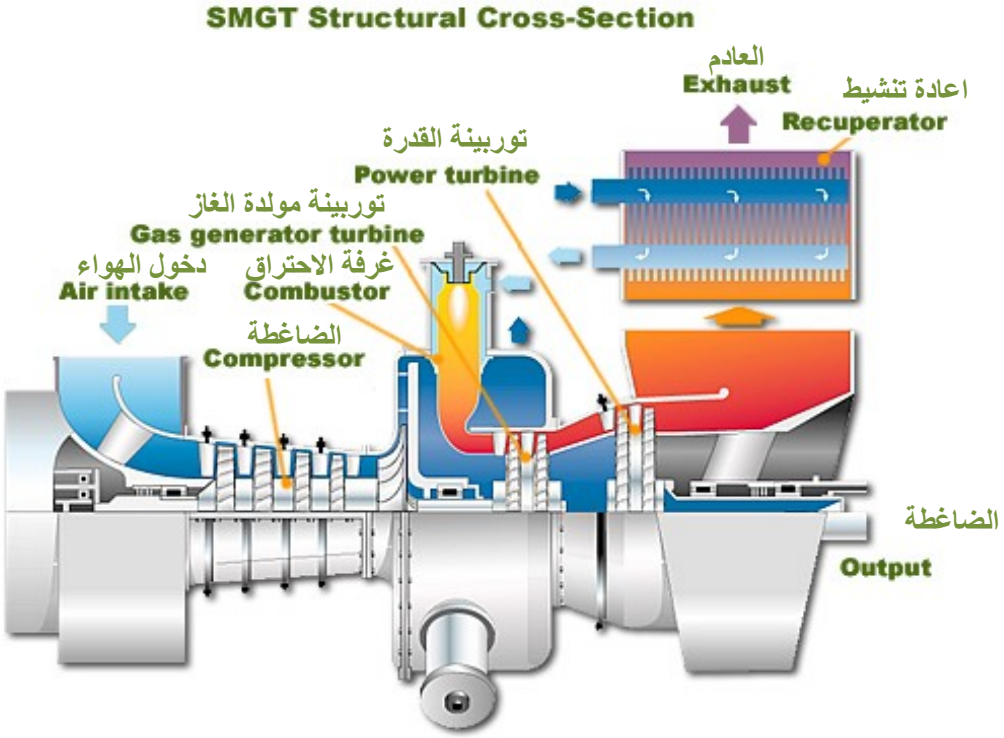
ت	العطل Fault	سبب العطل المحتمل Possible Cause of Fault	طريقة المعالجة Remedy Corrective Action
.4	تغير سرعة التوربين بشكل عشوائي	أ- تلف أو حشر في صمام حاكم السرعة أو عتلته ب- مقدار فتحة صمام حاكم السرعة غير صحيح ج- عدم انتظام عمل حاكم السرعة	أ- استبدال الأجزاء التالفة حسب المطلوب ب- تصحيح مقدار فتحة صمام حاكم السرعة وتعيير عتلته لإعطاء الفتحة الصحيحة للبخار ج- تصليح أو استبدال حاكم السرعة
.5	موقف انفلات السرعة over speed trip لا يعمل بصورة صحيحة	أ- التعيير غير صحيح لأجزاء الموقف ب- عطل في أجزاء الموقف ج- اهتزازات في التوربين تعمل على تحريك موقف الإعتاق قبل الأوان د- عتلة اليد للموقف تالفة أو عليها صدأ هـ- حشر في موقف انفلات السرعة أو عتلته	أ- تصحيح التعيير ب- استبدال الأجزاء التالفة من الموقف ج- البحث عن سبب الاهتزاز وإزالة المسبب د- استبدال الأجزاء التالفة هـ- استبدال أجزاء الموقف التالفة أو العتلة التالفة
.6	استهلاك بخار الماء أكثر من الطبيعي	أ- وضع الفتح للصمامات اليدوية لدخول البخار غير صحيح ب- ضغط بخار الماء منخفض أو درجة حرارة البخار منخفضة ج- ضغط بخار الماء عالي عند الخروج د- زيادة الحمل عن الحد المقرر هـ- تلف أو تأكل في أبواق بخار الماء أو ريش التوربين	أ- اجعل الصمامات في وضع الانفتاح الصحيح ب- تأكد من انفتاح كافة صمامات الدخول وان خط دخول البخار خالي من الماء ج- تأكد من انفتاح صمام خروج البخار واضبطه ضمن الحدود التصميمية د- خفض الحمل للحد المقرر هـ- افحصه وأوصله أو استبدل الأجزاء كما مطلوب
.7	درجة حرارة المحامل مرتفعة	أ- عدم كفاية التزييت ب- عدم كفاية ماء التبريد إلى جيوب التبريد الخاصة بصندوق المحامل ج- مبردات دهن التزييت أو جيوب التبريد في صندوق المحامل مملؤة بالأملاح والأوساخ د- المحامل تالفة هـ- الفسحة بين المحامل والمحور الدوار قليلة و- الحمل أعلى من الحد المقرر	أ- افحص معدل جريان زيت التزييت ومستوى الزيت.اغسل المحامل بزيت خاص ب- نظم كمية جريان ماء التبريد ج- قم بعملية التنظيف اللازمة د- افحص واستبدل المحامل هـ- بدل المحمل أو قم بزيادة الفتحة إلى الفسح التصحيحي و- خفض الحمل إلى الحد المقرر
.8	وجود ماء في زيت التزييت	تسرب البخار خلال مانع التسرب الى مكان الزيت	استبدال الحلقات الكاربونية لمانع التسرب

ت	العطل Fault	سبب العطل المحتمل Possible Cause of Fault	طريقة المعالجة Remedy Corrective Action
.9	استهلاك زائد أو غير طبيعي في المحامل	أ- زيت التزييت غير كاف أو متسخ ب- مستوى زيت التزييت واطئ ج- حلقات زيت التزييت تالفة د- وجود ماء في زيت التزييت هـ- عدم وجود تطابق بين محوري التوربين وماكنة الحمل Misalignment و- خشونة سطح المحور الدوار عند المحمل ز- وجود اهتزازات زائدة في التوربين	أ- فحص كمية جريان الزيت أو بدل الزيت واستبدل المحمل ب- أضف زيت التزييت ج- استبدل حلقات زيت التزييت د- استبدال الحلقات الكاربونية لمانع التسرب والمحامل هـ- وهذا يسبب تلف الوصلة الرابطة Coupling إضافة للمحامل. تصحيح تطابق المحاور و- تصليح أو تنظيف وصقل سطح المحور الدوار عند منطقة المحامل ز- تصحيح الاهتزازات كما في العطل رقم 10
.10	وجود اهتزازات زائدة عن اللزوم في التوربين	أ - عدم تطابق محوري التوربين وماكنة الحمل ب - براغي تثبيت هيكل التوربين على قاعدة الأساس مكسورة أو مرتخية ت - أقراص المحور الدوار مرتخية ث -فسحة المحامل زائدة عن الحد المقرر ج -وجود ترسبات على مجموعة المحور الدوار ح -اعوجاج في المحور الدوار خ -حلقة كاربون مانع التسرب ضيقة على المحور الدوار أو مكسورة د - تأكل أو تلف أجزاء في الوصلة الرابطة ذ - خلل في عملية تجميع التوربين	أ - قم بعملية تطابق المحورين ب - استبدال أو احكم شد براغي تثبيت الهيكل ت - صلح أو استبدل الأقراص ثم قم بعملية الموازنة لمجموعة المحور الدوار ث -استبدال المحامل ج -نظف الترسبات ح -افحص وصلح ثم اعد موازنة المحور الدوار خ -استبدل حلقة كاربون مانع التسرب د - صلح أو استبدل الأجزاء التالفة ذ - استمع وحدد مكان أصوات الاحتكاك افحص وصلح كما هو مطلوب
.11	تلف في الوصلة الرابطة	أ - عدم احتساب الانتفاخ الحراري للمحور الدوار إثناء الشغل عند إجراء تطابق المحاور في حالة توقف الماكنة ب - عدم التطابق المحوري بين التوربين وماكنة الحمل بسبب الضغط الذي تولده الأنابيب عند بدء التوربين بالاشتغال والذي لم يكن محسوبا عند إجراء عملية التطابق والماكنة متوقفة عن العمل	أ - يجب احتساب الانتفاخ الحراري وإدخاله ضمن إجراء التطابق ب -يجب فحص وضعية نوابض التعليق للأنابيب ووصلات التمدد وما تسببه من ضغط

الفصل الثاني
التوربين الغازي
Gas Turbine

2 التوربين الغازي **GAS TURBINE





تاريخ تطور صناعة التوربينات الغازية :

يعتبرالعالم (جون باربر) اول من حصل على براءة اخترع التوربينات الغازية (سنة 1791 م) ببريطانيا تكمن فكرة المحرك على انتاج غازات حارة مضغوطة وتوجيهها بعد اعطاءها مجال للتمدد على ريش مثبتة على دولاب وتستغل دورات الدولاب على تدوير محور ثم تدوير حمل مربوط على المحور.

لكن هذا الاختراع لم يتعدى مرحلة انتاج النموذج فقط واسباب فشل توربينة جون باربر هي:-

1 -الحاجة الى كميات كبيرة من الهواء المضغوط وبصورة مستمرة مما يتطلب ضاغط هواء كبيرة الحجم وهذا يعني استهلاك طاقة التوربين لتشغيل الضاغطة بدل الحمل .

2 -عدم توفير معادن تتحمل درجات حرارة عالية لريش التوربين مما يتطلب كميات كبيرة من هواء التبريد وبذلك سيكون هذا على حساب حجم ضاغطة الهواء.

بعدها قامت شركة (براون بوفري) في سويسرا بانتاج اول توربين صناعي ناجح سنة (1938 م) بحدود قدرة (4mw) وتعتبر هذه القدرة عالية في ذلك الزمن.

ولقد خطى التوربين خطوات سريعة جدا في التطور مابين (1939 – 1945) م وذلك للحاجة الى طائرات سريعة ذات اقلاع عمودي بوقت قصير لاستخدامها في القتال العسكري ولقد تبين ان زيادة القدرة الحصانية للماكنة المكبسية (ديزل) المركبة على الطائرات لاتسبب اللا زيادة طفيفة في سرعة الطائرة نظرا لثقل الماكنة المكبسية

حيث تعتمد على معادلة نسبة (القدرة /الوزن) ولذلك كان التوربين الغازي مقارنة مع محرك الديزل اخف وزنا لذا بدأ المهندسون بالتركيز في الدراسة على ايجاد معادن لتصنيع ريش التوربين تتحمل درجات حرارة عالية وتتطلب كميات قليلة من هواء التبريد .

بعد انتهاء الحرب العالمية الثانية قامت شركة (فرانك ويتل) بالتعاقد مع شركة (رستن Ruston) لإنتاج توربين صناعي بحدود (500-1250) قدرة حصانية وبعدها انتجت هذه الشركة توربين رستن TA1750 بعد ذلك استخدم التوربين في تشغيل المضخات (النفط الخام) وكابسات الغاز وبدات تزداد كفاءة التوربين عندما توفرت معادن افضل لتصنيع ريش التوربين ومن هذه المواد هي (Nimonic steel) و (Inconel Steel) مما يقلل من كمية الهواء اللازم للتبريد ويجعل الضاغطة اصغر حجما.

تستهلك الضاغطة حوالي 66% من الطاقة المتولدة والكفاءة الحالية للتوربينات الغازية تتراوح ما بين 15% في التوربينات الصغيرة ، 46% في التوربينات الكبيرة لكنها في وقتنا الحاضر قد زادت بسبب تطور علم المعادن وتقدم التكنلوجيا في تصنيع اجزاء التوربين.

2-1 تعريفه واستخداماته:

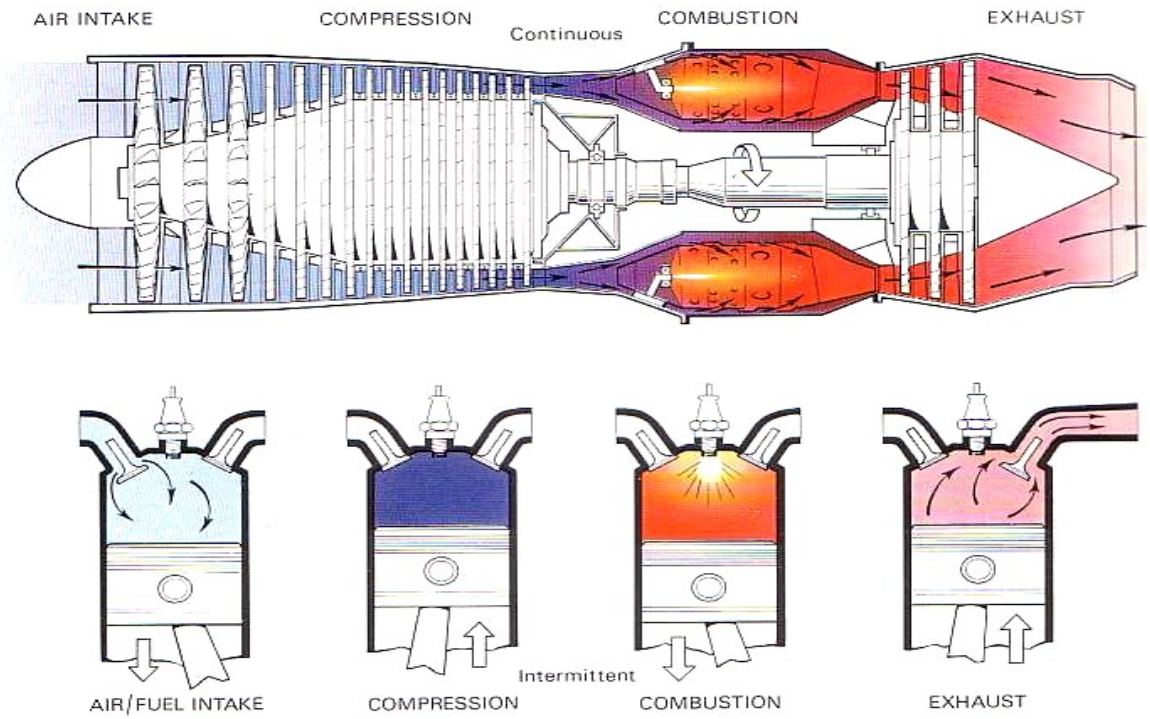
هو محرك احتراق داخلي دوار يدخل فيه المائع الشغال بصورة مستمرة ويمر بثلاثة مراحل اساسية وهي مرحلة انضغاط ومرحلة تسخين ومرحلة تمدد لانتاج القدرة اللازمة لتشغيل الحمل. وتُستخدم توربينات الغاز لتشغيل المولّدات الكهربائيّة، والسفن، وسيّارات السباق،كما تستخدم في محّركات الطائرة النفاثة.

وتتكون معظم أنظمة التوربين الغازي من ثلاثة أجزاء رئيسية:

1- ضاغط الهواء.

2- غرفة الاحتراق.

3-التوربين



استخدامات التوربين الغازي :-

يوجد في الدول الصناعية ما يقارب (85)مصنعاً لإنتاج(500) نموذجاً من التوربين الغازي التي تتراوح قوتها الحصانية صعوداً إلى (100000HP) ولقد لاقت التوربينات نجاحاً واسعاً في صناعة الطيران المدني والعسكري حيث تستوعب ثلثي التوربينات الغازية والتي يزداد إنتاجها بمعدل (30%-50%) سنوياً وهو معدل يدل على نمو سريع في استعمالات التوربين المتنوعة وفيما يلي أهم استعمالاتها:-

1. الصناعة النفطية
2. توليد الطاقة الكهربائية
3. استعمال التوربين في النقل (الطائرات والسفن والسيارات)
4. استخدامهُ في الصناعات الكيماوية
5. نظام الطاقة البديلة

2-2مميزات الوحدات الغازية مقارنة بالمحطة البخارية لنفس القدرة الحصانية المتوفرة فيها :-

1- انخفاض الحجم والوزن نسبة للوحدات البخارية (70%من الوزن اقل) ولذا فهي لا تحتاج إلى مساحات كبيرة عند استخدامها لوحدات ثابتة كما إنها مناسبة جداً في الاستخدام كوحدات طوارئ.

2- انخفاض تكاليف رأس المال نسبة للوحدات البخارية وتبلغ تكلفة إنشاء محطة غازية حوالي 50% فقط من تكاليف محطة بخارية0

3- بالامكان إنشاؤها وتركيبها في وقت قصير ويتم في العادة شحنها من المصنع جاهزة تقريبا ومحتواة في غلاف بحيث لا تحتاج إلى مباني كما أن الأساسات المطلوبة لها بسيطة 0

4-بالامكان تشغيلها في وقت قصير (من 3إلى 10دقائق)مما يجعلها متميزة كوحدات طوارئ ووحدات ذروة (peak load)

6- يحتاج تشغيلها إلى عدد قليل من الأفراد كما يمكن تشغيلها أوتوماتيكيا

7-لها إمكانية استخدام خيارات كثيرة من أنواع الوقود (السائلة والغازية)

2-3عيوب الوحدات الغازية :-

1- العيب الأساسي لهذهالوحدات هو انخفاض الكفاءة بالنسبة للوحدات البخارية ولوحدات الديزل(تبلغ كفاءة الوحدات البخارية الكبيرة حوالي 40% بينما لا تزيد كفاءة الوحدات الغازية ذات الدورة البسيطة عن 25%)

ورغم أنه يمكن رفع الكفاءة بوضع مركبات أخرى في الدورة إلا أن ذلك يؤدى إلى أن تفقد الوحدة مميزاتها من ناحية البساطة والحجم 0

2- الحاجة إلى تغير أجزاء كثيرة منها في فترات متقاربة نظراً لتعرضها لدرجات حرارة مرتفعة (غرفة الاحتراق - ريش المراحل الأولى من التربينة)0

3-انخفاض كفاءتها أكثر وبسرعة في الأحمال المنخفضة لأنه لا يستخدم ضاغطة هواء متغيرة السرعات 0

4- ارتفاع الضجيج الصادر من مدخل الهواء ومخرج العادم مما يستلزم استخدام مخفضات ضجيج 0

6 +حتياجها إلى محرك لبدء حركة الضاغطة والوصول إلى سرعة قريبة من سرعة التشغيل مما يجعل بداية تشغيلها ليس في سهولة وحدات الديزل 0

2-4 أهم العوامل المؤثرة على محطات توليد الطاقة باستخدام التربينة الغازية والتي يمكن من خلالها زيادة القدرة الخارجة (OUTPUT) وهي:-

1- زيادة كمية الهواء خلال الضاغطة

2- زيادة درجة حرارة الدخول للتوربينة

3- تقليل درجة حرارة الدخول للضاغطة

4- التشغيل على القيمة المثلى لنسبة انضغاط الضاغطة

ملاحظة:

أ -ان زيادة كمية الهواء محدودة بمساحة الدخول للمرحلة الأولى للضاغطة ومساحة الخروج في المرحلة الأخيرة للتوربينة (FLOW AREA) وكذلك تعتمد على كثافة الهواء لهذا تكون الزيادة في كمية الهواء محسوبة.

ب -إحدى طرق زيادة درجة حرارة مدخل التوربينة بدون الوصول للإجهادات الحرارية الغير مسموح هي تبريد ريش التوربينة 0وهذا يؤثر على التوربين حيث ان زيادة درجة الحرارة عند مدخل التوربينة 10 C° يؤدى إلى زيادة خروجها من التوربينة بنسبة 2%

ت -يتكون الغلاف الخارجي المشترك لكل من التوربينة والضاغطة من ثلاثة قطاعات لاغلب التصاميم وهي:

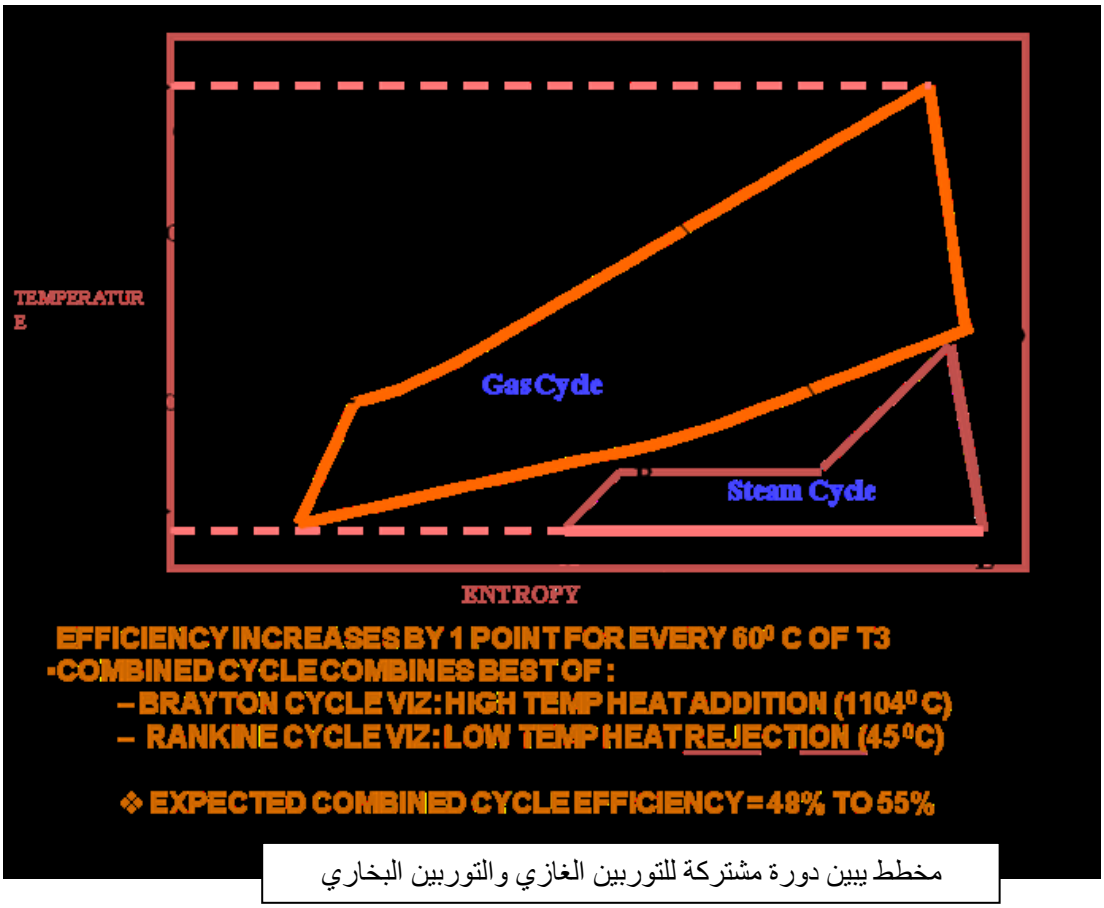
1- غلاف المدخل

2- الغلاف الأوسط

3- غلاف المخرج

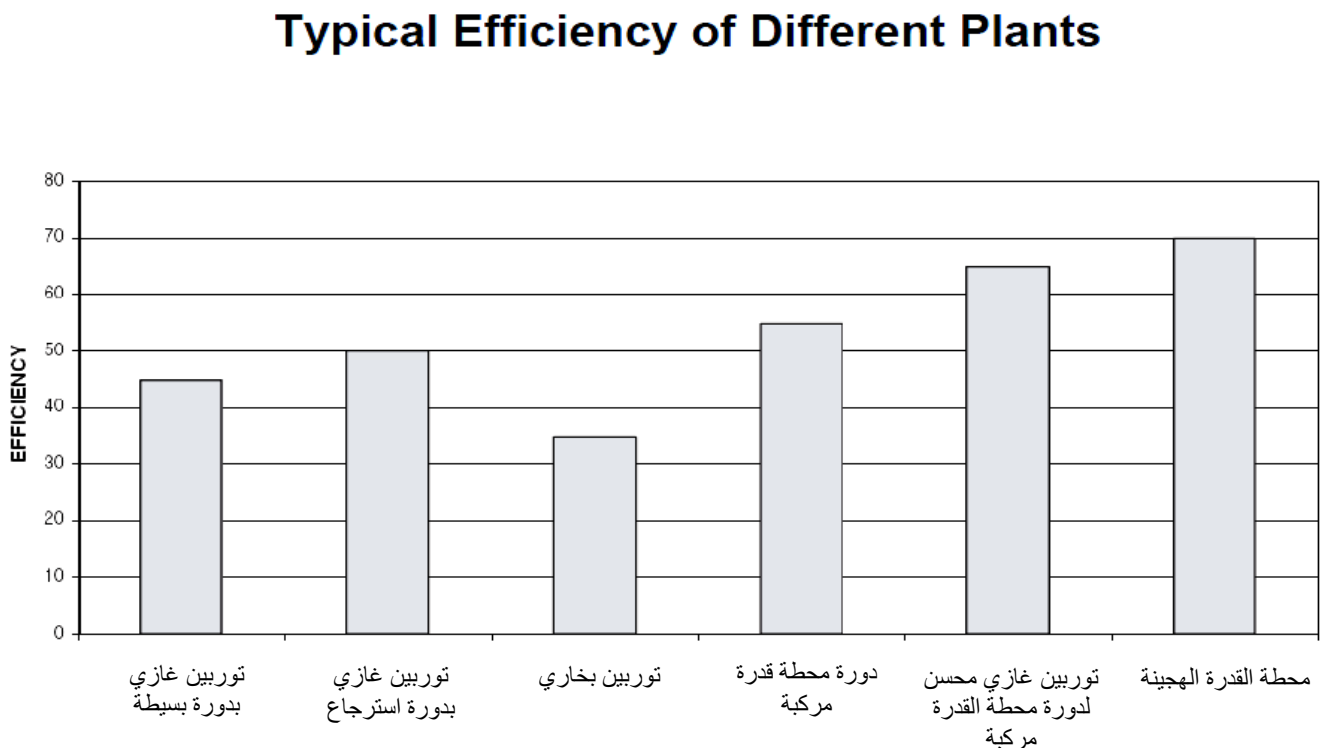
وفي هذا التصميم يلاحظ أن حوامل الريش الثابتة لكل من الت وربينة والضاغطة يتم تثبيتها على الغلاف الأوسط والريش الثابتة تقوم بعمل التغير المطلوب في اتجاه الهواء أو الغازات بعد كل مرحلة من مراحل الريش المتحركة

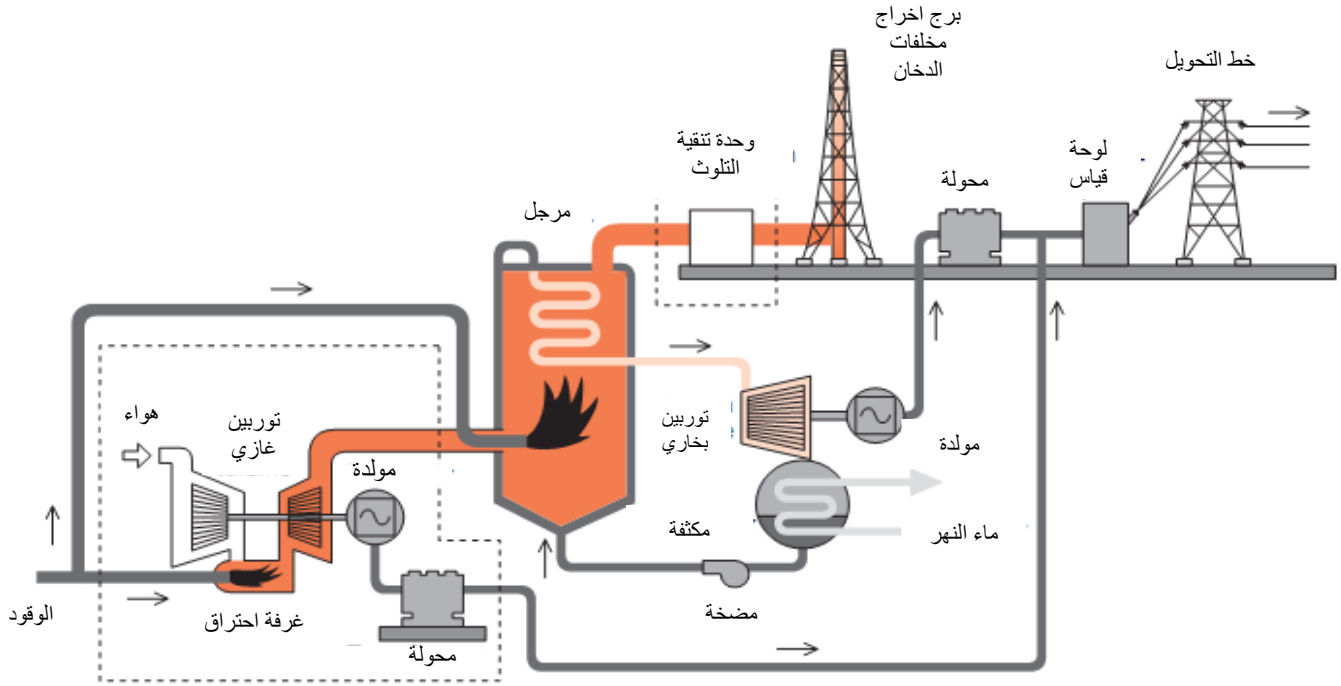
المخطط ادناه يبين الفرق بين دورة برايتون للتوربين الغازي ورانكن للتوربين البخاري لمحطة تشتغل على كلا الدورتين:



مخطط يبين دورة مشتركة للتوربين الغازي والتوربين البخاري

مخطط يبين وجه الاختلاف مابين أنواع محطات توليد القوى التي تشتغل على التوربينات بأنواعها:





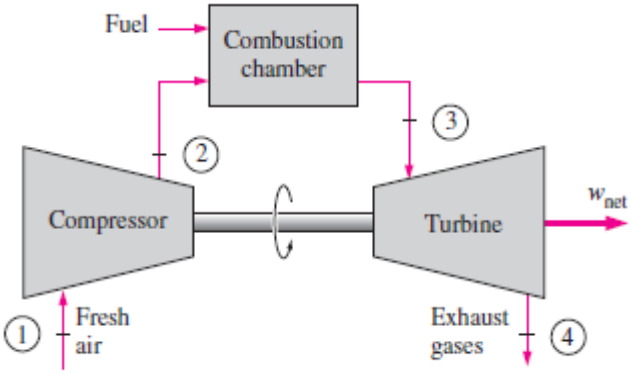
مخطط يبين دورة مشتركة للتوربين الغازي والتوربين البخاري

2-5الدورات الحرارية التي يعمل عليها التوربين الغازي:

يعمل التوربين الغازي وفق دورة برايتون الاساسية.

2-5-1دورة برايتون المثالية البسيطة المفتوحة Ideal Simple open Brayton cycle

يدخل الهواء تحت الظروف الجوية إلى الضاغطة حيث يقوم برفع درجة حرارة وضغط الهواء. ومن ثم يدخل إلى غرفة الاحتراق حيث يشتعل الوقود عند ضغط ثابت بعد ذلك تخرج الغازات بدرجة حرارة مرتفعة وتدخل للتوربين حيث تتمدد هذه الغازات إلى مقدار الضغط الجوي. يبين الشكل (2-5-1-أ) مخطط للأجزاء الرئيسية للتوربين الغازي.



شكل رقم الشكل (2-5-1-أ) مخطط دورة برايتون المثالية

إجراءات الدورة

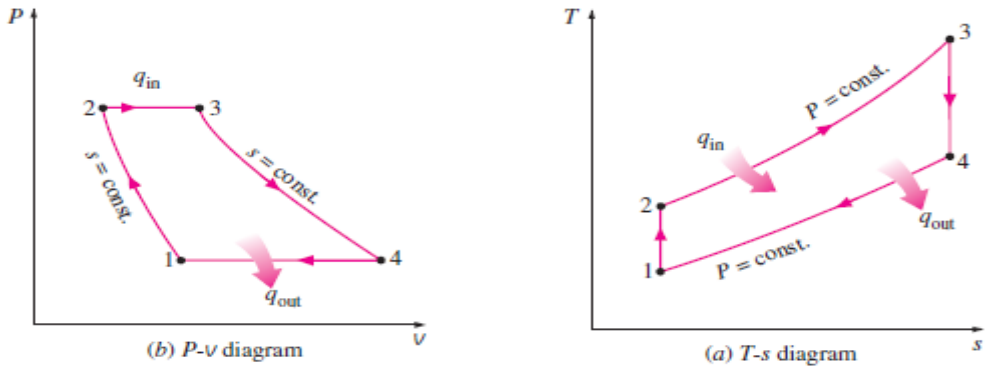
يبين الشكل (2-5-1-ب) إجراءات دورة برايتون على مخطط (T-S) والمخطط (P-V)

1 ← (1→2) إجراء انضغاط الهواء اديباتيكي. حيث ترتفع درجة الحرارة والضغط للهواء ويعتبر أعلى ضغط في الدورة.

2 ← (2→3) إجراء إضافة حرارة بثبوت الضغط. حيث ترتفع درجة الحرارة وتكون أعلى درجة حرارة في الدورة.

3 ← (3→4) إجراء تمدد الهواء اديباتيكي. حيث تتحول الطاقة الحرارية إلى شغل.

4 ← (4→1) إجراء خروج غازات العادم حيث تنخفض فيه درجات الحرارة مع ثبوت الضغط.



شكل (2-5-1-ب) مخطط (T-S) و (P-V) لدورة برايتون

تحليل الطاقة في دورة برايتون المثالية

المكونات الثلاثة لدورة برايتون (الضاغطة و غرفة الاحتراق والتوربين) كلها ذات جريان مستقر (steady state) وتأثير كل من الطاقة الحركية والطاقة الكامنة يكون قليل بحيث يمكن إهمالها.

$$\frac{1}{\dot{m}}\frac{dE}{dt} = \frac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_{CV}}{\dot{m}} + (h_{in} - h_{out}) + 1/2(V_{in}^2 - V_{out}^2) + g(z_{in} - z_{out})$$ فتصبح

المعادلة

$$0 = \frac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_{CV}}{\dot{m}} + (h_{in} - h_{out})$$

1 → 2 Adiabatic compression (انضغاط أديباتي) → $\frac{\dot{W}_{in}}{\dot{m}} = (h_2 - h_1)$

2 → 3 Heat addition (إضافة حرارة) → $\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = (h_3 - h_2)$

3 → 4 Adiabatic expansion (تمدد أديباتي) → $\frac{\dot{W}_{out}}{\dot{m}} = (h_3 - h_4)$

4 → 1 Heat removal (إزالة حرارة) → $\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} = (h_4 - h_1)$

الكفاءة الحرارية لدورة برايتون المثالية: Brayton Cycle Thermal Efficiency

$$\eta_{\substack{Brayton \\ cycle}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{out}/\dot{m}}{\dot{Q}_{in}/\dot{m}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

$$bwr = \frac{\dot{W}_{in}/\dot{m}}{\dot{W}_{out}/\dot{m}} = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_4}$$ نسبة الشغل الراجع Back Work Ratio (bwr)

الإجراءات الايسنتروبية 1←2 و 3←4

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \text{ and } \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\text{Since } \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} \text{ thus } \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{k}{k-1}} \rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$$

فتكون الكفاءة الحرارية بالشكل التالي

$$\eta_{\substack{Brayton\\constk}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{c_P(T_4 - T_1)}{c_P(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

نعوض عن قيمة نسبة درجات الحرارة بدلالة نسبة الانضغاط فتكون الكفاءة كالتالي

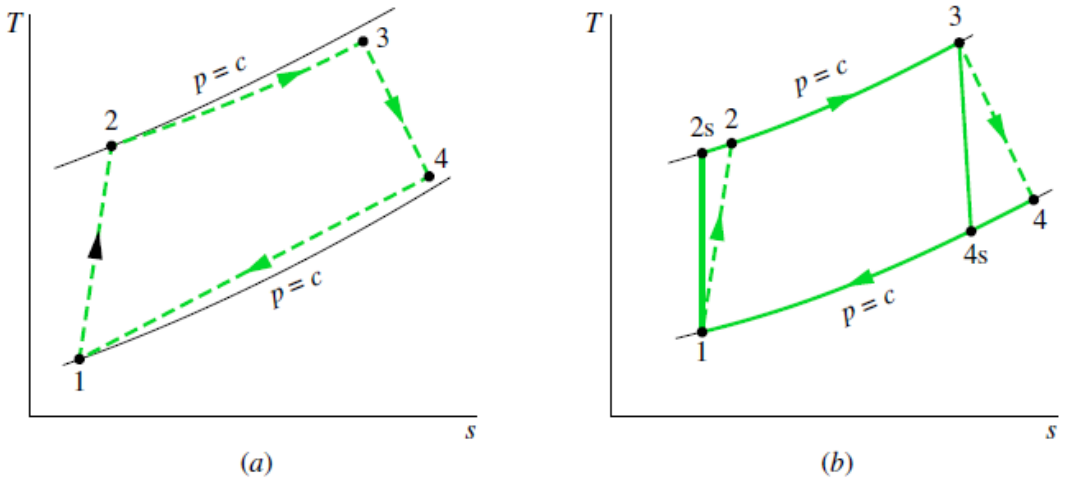
$$\eta_{\substack{Brayton\\constk}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{(P_2/P_1)^{\frac{k-1}{k}}}$$

وكذلك نسبة الشغل الراجع فتصبح المعادلة

$$bwr = \frac{\dot{W}_{in}/\dot{m}}{\dot{W}_{out}/\dot{m}} = \frac{\dot{W}_{comp}/\dot{m}}{\dot{W}_{turb}/\dot{m}} = \frac{c_P(T_2 - T_1)}{c_P(T_3 - T_4)} = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4}$$

2-5-2 دورة برايتون الفعلية البسيطة المفتوحة

يبين الشكل (2-5-1-ج) حيود دورة برايتون المثالية البسيطة عن الدورة الحقيقية (الفعلية) ويعود السبب في هذا الحيود إلى عدم الانعكاسية والتي تحدث في الأجزاء الرئيسية للدورة الضاغطة والتوربين وبسبب انخفاض الضغط في ممرات الجريان وغرفة الاحتراق.ولهذا تظهر كفاءة جديدة تسمى الكفاءة الايسنتروبية للتوربين والضاغطة.



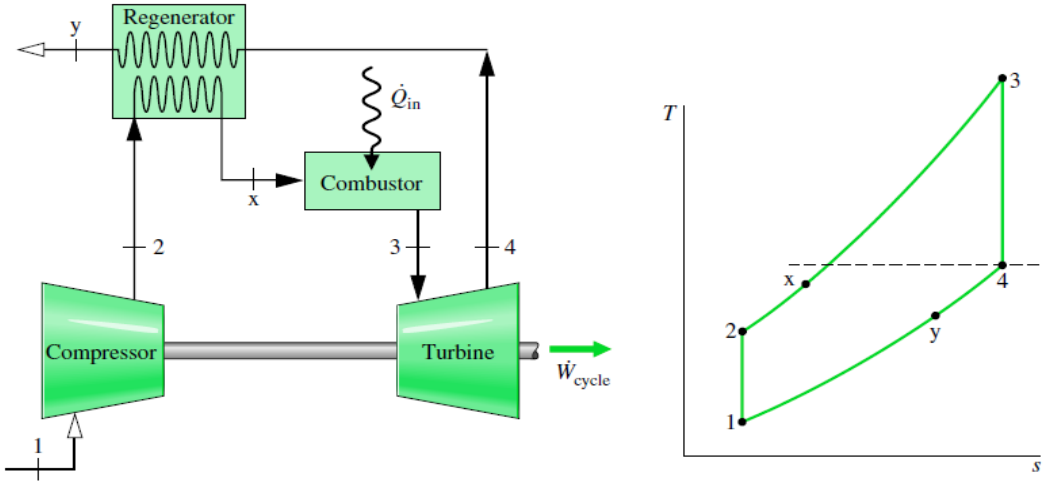
الشكل (2-5-1-ج) تأثير الانعكاسية على دورة برايتون

$$\eta_{turb} = \frac{\left(\dot{W}_t / \dot{m}\right)}{\left(\dot{W}_t / \dot{m}\right)_s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \qquad \eta_{comp} = \frac{\left(\dot{W}_c / \dot{m}\right)_s}{\left(\dot{W}_c / \dot{m}\right)} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

2 5 3 دورات حرارية محسنة للكفاءة

أ – التوربين الغازي المسترجع: Regenerative Gas Turbines

يمكن زيادة الكفاءة الحرارية للتوربين عن طريق استعادة جزء من الطاقة المصاحبة للغازات العادمة الناتجة عن عملية الاحتراق وإضافتها إلى الهواء المضغوط. و ينتج عن هذه العملية تسخين الهواء الداخل إلى غرفة الاحتراق إلى درجة الحرارة المطلوبة عند فتحة الدخول، مما يوفر قدراً من الوقود الذي يستهلك لنفس الغرض. و تستخدم مبادلات حرارية على شكل مواسير في أنظمة التوربين الغازي ألاسترجاعي.ويبين الشكل (2–5–1–د) مخطط الدورة. وفي الحالة المثالية تكون درجة حرارة الغاز الخارج من المسترجع T_x تساوي درجة حرارة الغازات الخارجة من التوربين T_4.



الشكل (2–5–1–د) دورة الاسترجاع المثالية

في هذه الدورة تصبح الحرارة المضافة كالتالي

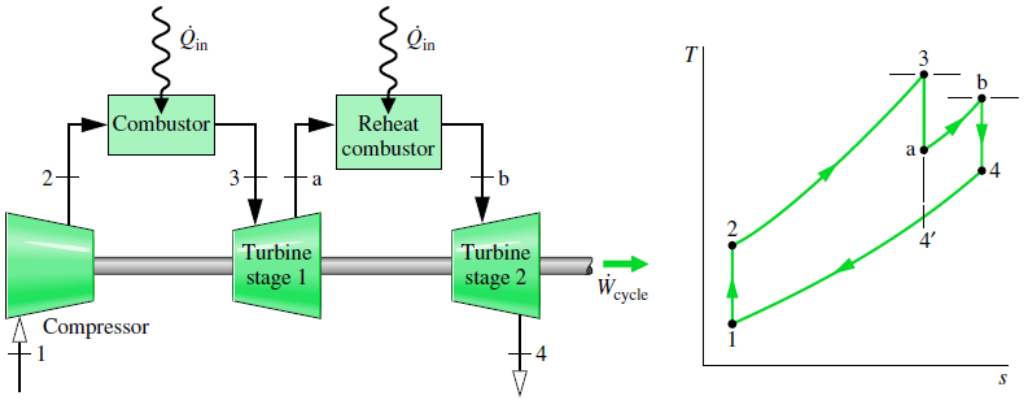
$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = (h_3 - h_x)$$

ويمكن التعبير عن كفاءة المسترجع بالمعادلة التالية

$$\eta_{reg} = \frac{h_x - h_2}{h_4 - h_2}$$

ب- إعادة تسخين: **Gas Turbines with Reheat**

يمكن تحسين دورة برايتون المثالية للتوربين الغازي عن طريق زيادة شغل التوربين مع بقاءه شغل الضاغط ثابت. ويتم ذلك باستخدام توربين ذو مرحلتين (توربين الضغط العالي وتوربين الضغط الواطئ) مع إعادة التسخين بين المرحلتين. حيث يحصل التمدد على مرحلتين مما يؤدي إلى زيادة صافي الشغل وبالتالي زيادة الكفاءة الحرارية للدورة وكما مبين في الشكل (2-5-1-هـ). ويفترض في هذه الدورة المثالية إن T_b تساوي T_3.



الشكل (2-5-1-هـ) دورة إعادة التسخين

من خلال المخطط (T-S)

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_{4'}}$$

ملاحظة $h_b - h_4 > h_a - h_{4'}$

الشغل الناتج من التوربين وبدون إعادة تسخين يكون

$$\dot{W}_{basic} = \left[(h_3 - h_a) + (h_a - h_{4'})\right]\dot{m}$$

الشغل الناتج من التوربين مع إعادة تسخين يكون

$$\dot{W}_{\substack{turbine \\ w/reheat}} = \dot{W}_{t,1} + \dot{W}_{t,2} = \left[(h_3 - h_a) + (h_b - h_4)\right]\dot{m}$$

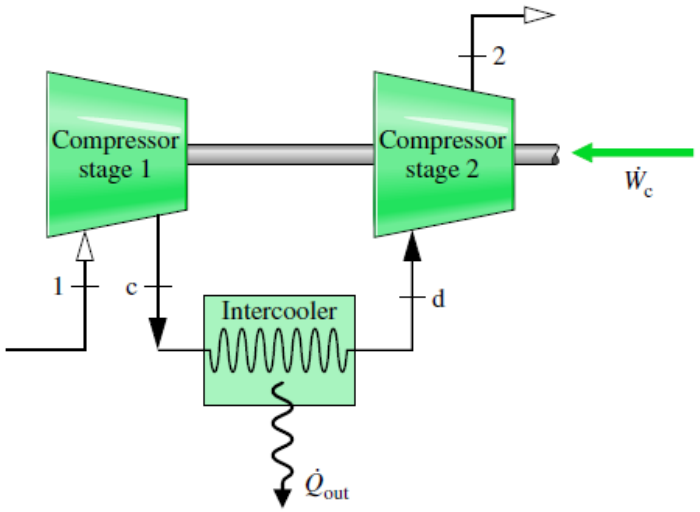
$$\dot{W}_{\substack{turbine \\ w/reheat}} > \dot{W}_{basic}$$ لذلك يكون $h_b - h_4 > h_a - h_{4'}$ بما إن

وبما أن شغل الضاغطة لا يتأثر بإعادة التسخين فعليه يكون

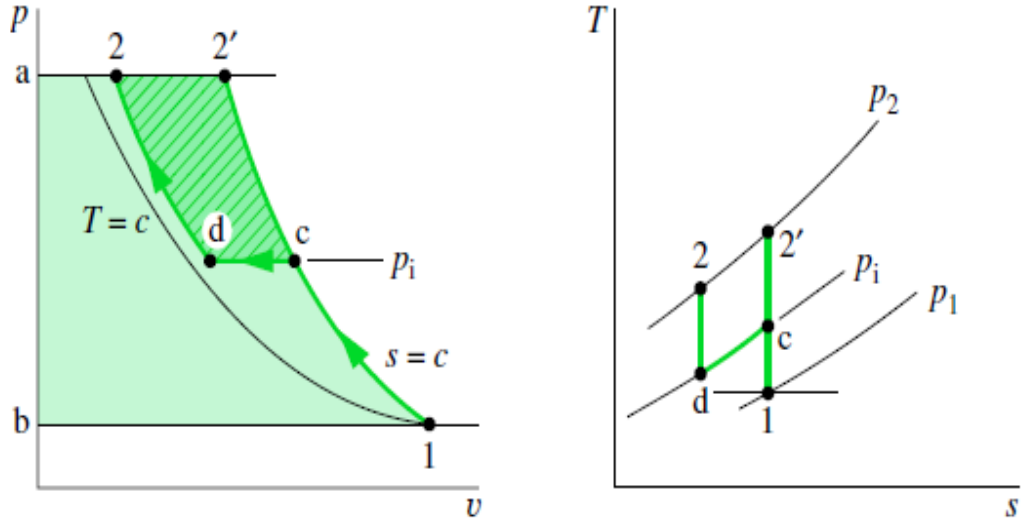
$$\dot{W}_{\substack{cycle \\ w/reheat}} > \dot{W}_{\substack{cycle \\ basic}}$$

ت – إعادة التبريد: **Compression with Intercooling**

يمكن زيادة كفاءة دورة برايتون باستخدام ضاغط متعدد المراحل مع تبريد بيني وكما موضح في الشكل (2–5–1–و1،و2) .في هذه الحالة تؤدي إلى تقليل مقدار الشغل المصروف على الضاغطة مما يؤدي إلى زيادة صافي الشغل وبالنتيجة زيادة كفاءة الدورة. إن استخدام التبريد البيني يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة الهواء وبالتالي زيادة كثافة الهواء والتي تؤدي بدورها إلى تقليل الطاقة المصروفة على الضاغط. ويفترض في هذه الدورة المثالية إن T_d تساوي T_1.



الشكل (2–5–1–و1) دورة إعادة التبريد المثالية



الشكل (2–5–1–و2) يبين مخطط (P-V) و (T-S)

من خلال المخطط (T-S)

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_{4'}}$$

ملاحظة

$$h_{2'} - h_c > h_2 - h_d$$

شغل الضاغط وبدون مبرد يكون

$$\dot{W}_{basic} = \left[\left(h_{2'} - h_c\right) + \left(h_c - h_1\right)\right]\dot{m}$$

$$\left(\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}}\right)_{basic} = \int_1^2 vdP = \int_1^c vdP + \int_c^{2'} vdP$$

$$= \text{area } b\text{-}1\text{-}c\text{-}2'\text{-}a$$

الشغل الكلي للضاغط مع المبرد يكون

$$\dot{W}_{\substack{comp \\ w/\text{intercooler}}} = \dot{W}_{c,1} + \dot{W}_{c,2} = \left[\left(h_c - h_1\right) + \left(h_2 - h_d\right)\right]\dot{m}$$

$$\left(\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}}\right)_{w/\text{int}} = \int_1^2 vdP = \int_1^c vdP + \int_d^2 vdP$$

$$= \text{area } b\text{-}1\text{-}c\text{-}d\text{-}2\text{-}a$$

$\dot{W}_{\substack{comp \\ w/\text{intercooler}}} < \dot{W}_{basic}$ يكون $h_{2'} - h_c > h_2 - h_d$ بما إن

وبما أن شغل التوربين لا يتأثر بإضافة المبرد يكون

$$\dot{W}_{\substack{cycle \\ w/\text{intercooler}}} > \dot{W}_{\substack{cycle \\ basic}}$$

وبما إن area(b-1-c-2'-a) > area(b-1-c-d-2-a)

$$\left(\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}}\right)_{basic} > \left(\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}}\right)_{w/\text{int}}$$

أمثلة رياضية

مثال:1

يدخل الهواء للضاغط في دورة الهواء القياسية برايتون عند (0.1MPa) و ($15C^o$) الضغط الخارج من الضاغط (0.5MPa). وأقصى درجة حرارة في الدورة ($900C^o$). احسب

1 - الضغط ودرجة الحرارة عند كل نقطة في الدورة.

2 - شغل الضاغط والتوربين وكفاءة الدورة.

الحل:

$P_1=P_4=0.1MPa$ $T_1=288.2K$

$P_2=P_3=0.5MPa$ $T_3=1173.2K$

$$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}=5^{0.268}=1.584\Rightarrow T_2=456.6K$$

$$W_c=h_2-h_1=C_p(T_2-T_1)=1.0035(456.6-288.2)=169\text{KJ/Kg}$$

$$\frac{T_4}{T_3}=\left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}}=5^{0.286}=1.5845\Rightarrow T_4=740.4K$$

$$W_t=h_3-h_4=C_p(T_3-T_4)=1.0035(1173.2-740.4)=434.3KJ/Kg$$

$$W_{net}=W_t-W_c=434.3-169=265.3KJ/Kg$$

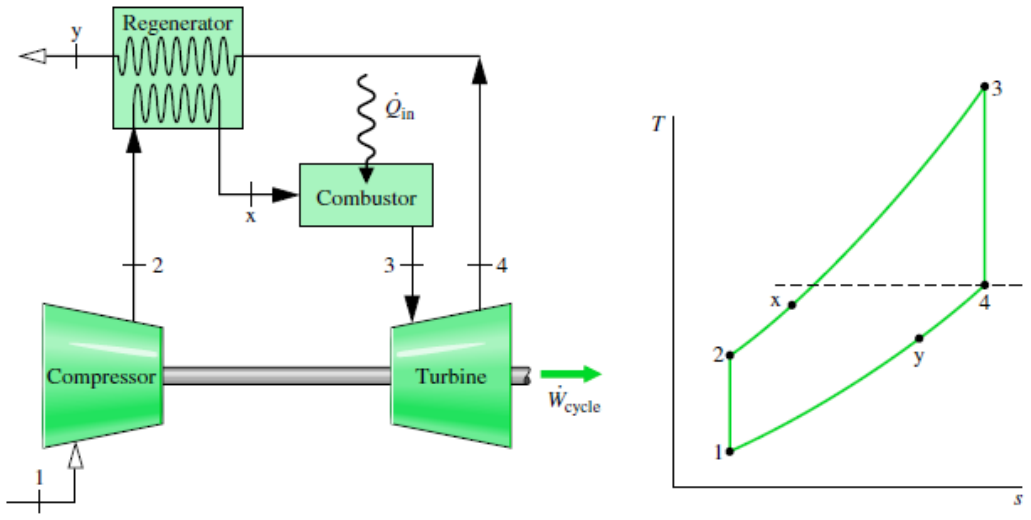
$$q_H=h_3-h_2=C_p(T_3-T_2)=1.0035(1173.2-456.6)=719.1KJ/Kg$$

$$q_L=h_4-h_1=C_p(T_4-T_1)=1.0035(740.4-288.2)=453.8KJ/Kg$$

$$\eta_{th}=\frac{W_{net}}{q_H}=\frac{265.3}{719.1}=36.9\%$$

مثال:2

إذا استخدم مسترجع مثالي في دورة المثال السابق وكما مبين في الشكل (2-5-1-ي) احسب مقدار الكفاءة الحرارية للدورة



الشكل (2-5-1-ي) دورة برايتون مع مسترجع

الحل:

$T_x=T_4=740.2K$

$$q_H = h_3 - h_x = C_p(T_3 - T_x) = 1.0035(1173.2 - 740.4) = 434.3KJ/Kg$$

$W_{net}=265.3KJ/Kg$ من المثال السابق

$$\eta_{th} = \frac{265.3}{434.3} = 61.1\%$$

تمارين رياضية

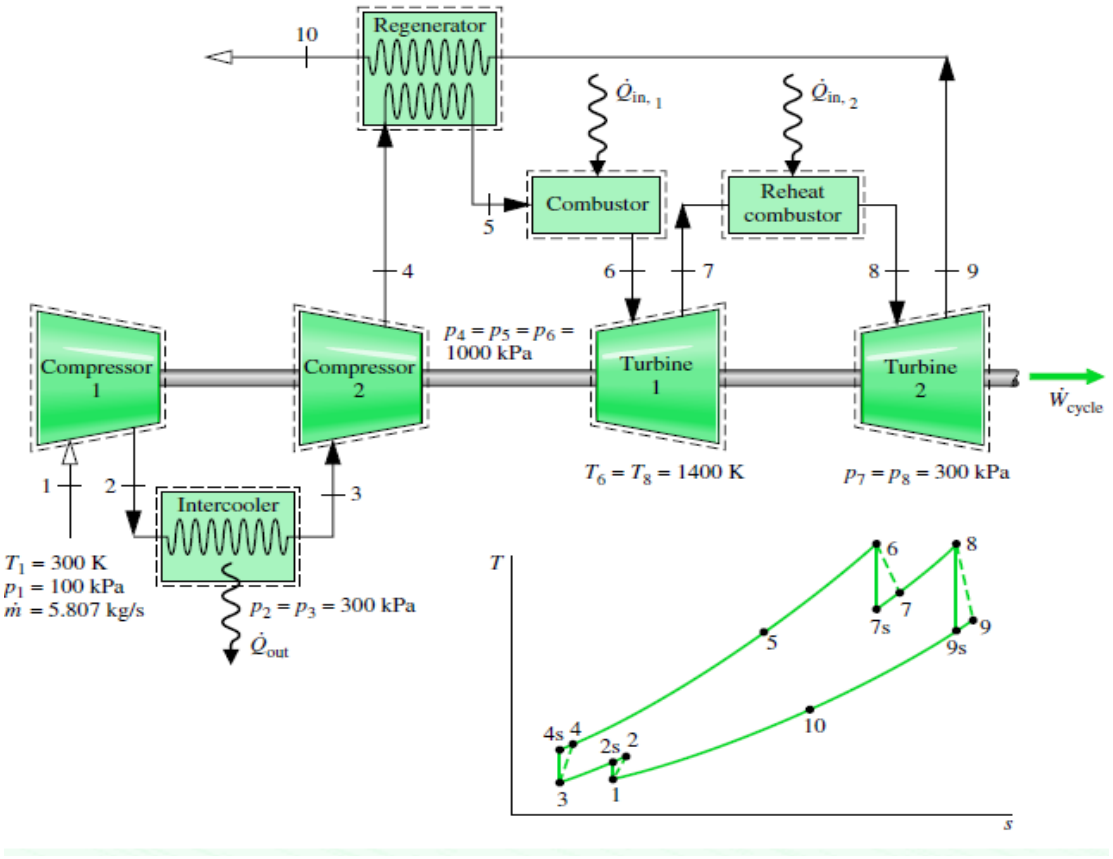
س1:

دورة توربين غازي ذات مرحلتين للانضغاط ومرحلتين للتمدد مع مسترجع وكما مبين في الشكل (2-5-1-ن) يدخل الهواء للضاغط بمقدار (100KPa) و (300K) وبمعدل جريان (5.807Kg/s). نسبة الضغط عبر مرحلتي الضاغط هي 10 ونسبة الضغط عبر مرحلتي التوربين أيضا 10. مقدار الضغط عند كل من إعادة التسخين والتبريد البيني هو (300KPa). درجة الحرارة للغازات الداخلة لكل توربين هي (1400K). مقدار درجة حرارة الهواء الداخل للضاغط الثاني (300K) ومقدار الكفاءة الايسنتروبك لكل ضاغط وتوربين (80%) ومقدار كفاءة المسترجع (80%). احسب

1 الكفاءة الحرارية للدورة

2 نسبة الشغل الراجع

3 صافي القد المتولدة



الشكل (2–5–1–ن) دورة برايتون مع مرحلتين للانضغاط ومرحلتين تمدد ومسترجع

س2:

دورة توربين غازي ذات مرحلتين للانضغاط ومرحلتين للتمدد.نسبة الضغط عبر كل توربين وكل ضاغط 2: 1. درجة الحرارة عند الدخول لكل ضاغط ($15C^o$) ودرجة الحرارة عند الدخول لكل توربين ($900C^o$). اذا ركب مسترجع مثالي بالدورة احسب شغل الضاغط وشغل التوربين وكفاءة الدورة اعتبر (P_1=100KPa).

2-6اجزاء التوربين الغازي الرئيسية:-

2-6-1الضاغطة (ضاغطة الهواء):-

وهي من أهم الأجزاء الرئيسية في التوربينة تقوم بسحب الهواء الجوي اللازم للاحتراق والتبريد بكمية تدفق ملائمة للغرضين وبصورة مستقرة ومن ثم اكسابه طاقة داخلية وشغل انسياب عالي وذلك يعتمد على تصميم الضاغطة مع زيادة في الكثافة الوزنية للهواء من الدخول الى الخروج.

انواع الضاغطات المستعملة:

2-6-1-1الضاغطة الطاردة عن المركز (نصف قطري)

وهي ضاغطة يحتوي غطائها على جزئيين رئيسيين هما :-

أ -الدفاعة المروحية (Impeller).

ب -الناشر (Diffuser).

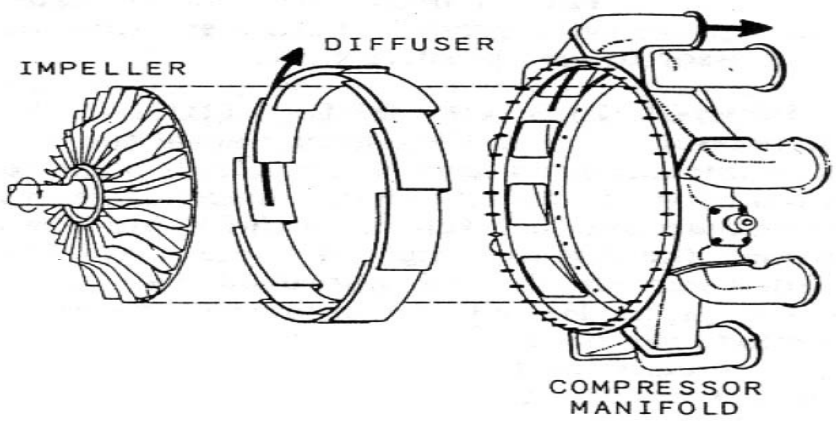
يتم سحب الهواء في الضاغطة المركزية بواسطة فعل الدفاعة (Impeller) ودفعها بشكل كتلة واحدة من الهواء بشكل قطري بواسطة القوة المركزية بين الريش الدفاعة حيث يكتسب الهواء ضغطاً وسرعة .وفي الناشر (diffuser) تنخفض سرعة الهواء بين الريش لتتحول الطاقة الحركية إلى طاقة ضغط فيتكون الضغط الكلي للضاغطة ونسبة انضغاط الهواء في الضاغطة اذا ما اخذنا في بعض التصاميم هي (4:1) وأمكن زيادتها لتصل إلى (6:1) بعد استخدام سبائك التيتانيوم في صناعتها للتغلب على الاجهادات العالية للدفاعة .

أ -<u>مميزاتها</u>:-

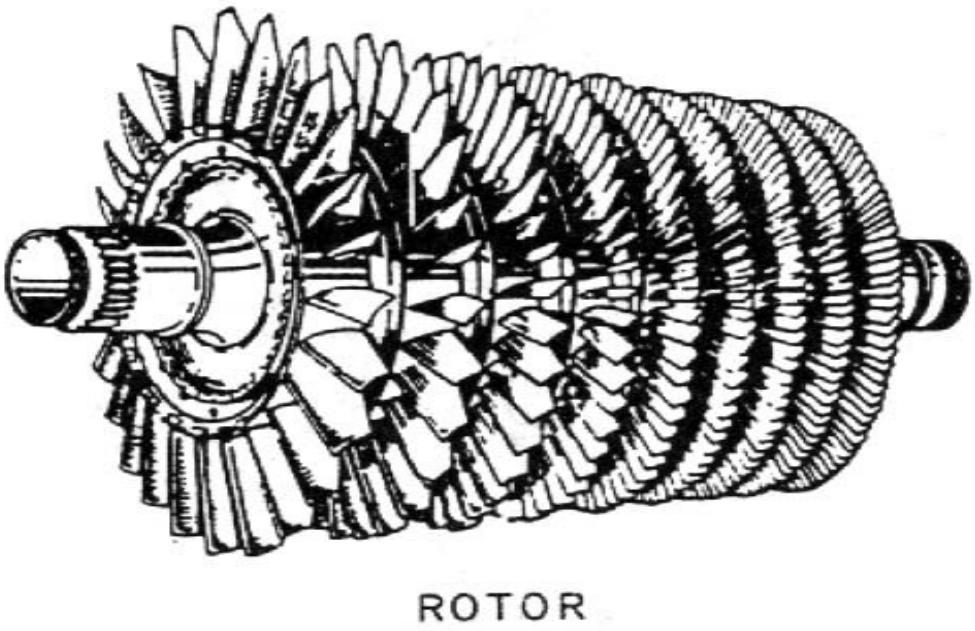
1. تشغل طولاً أقصر نسبياً .
2. خفة الوزن.
3. سهولة صنعها وبساطة تصميمها لذلك استخدمت في توربينات الطائرات في معظم تصاميمها بسبب خفة الوزن وقصر الطول .
4. تحافظ على كفاءتها ضمن مديات واسعة لمعدلات الجريان وبأية سرعة وتكون الدفاعة المروحية مناسبة لتوربين ذو قدرة حصانية صغيرة مثل توربين سيارات الشحن.
5. عدم تأثر أداءها وكفاءتها بالترسبات التي تحصل على الريش من جراء التشغيل الطويل.

ب-<u>عيوبها</u>:-

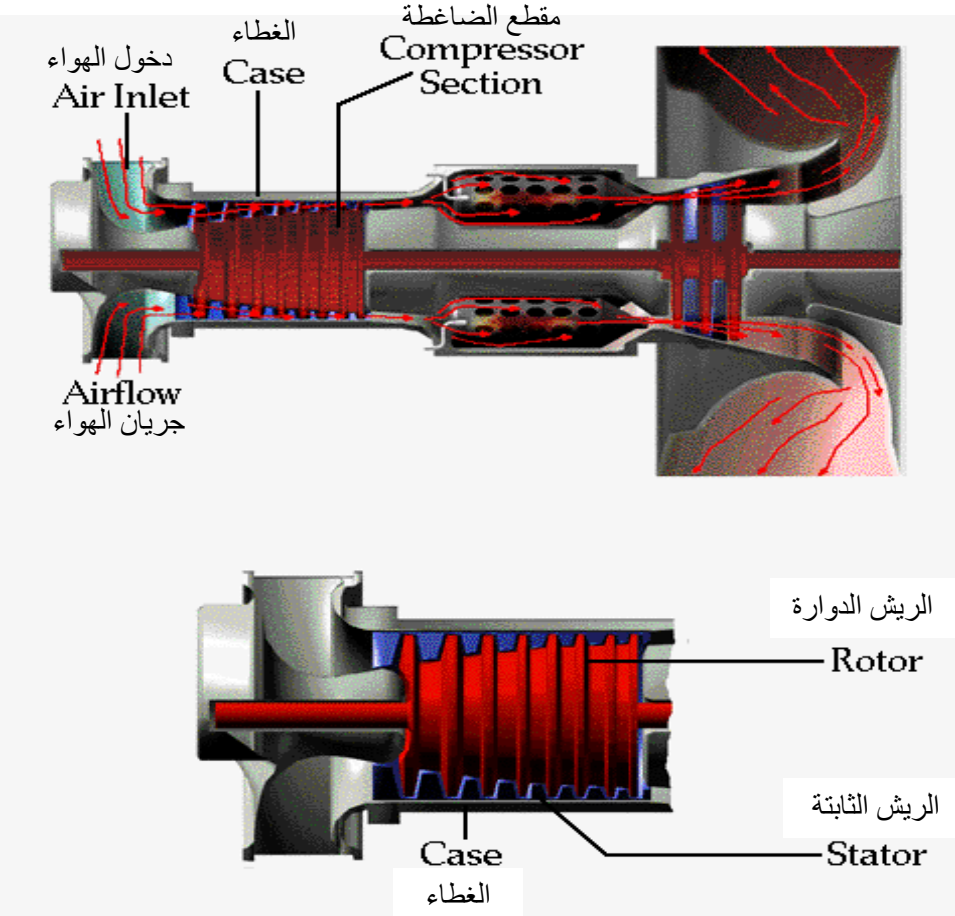
1. انخفاض كفاءتها.
2. كبر المساحة الأمامية التي تشغلها .
3. التواء مجاري الهواء فيها عند الرغبة في زيادة ضغطها وذلك بزيادة عدد مراحلها والتواء المجاري من مرحلة إلى أُخرى.



2-6-1-2الضاغطة المحورية:-



لقد تطلبت الكفاءة القليلة لضاغطة الطرد المركزية وتعقيد شكل الممرات بين المراحل المتعددة لها والمساحة الوجهية الكبيرة لها البحث عن تحسين تصاميم وطرق صنع الضاغطة المحورية ذات الكفاءة العالية والمساحة الوجهية الصغيرة (Law frontal area).



شكل يوضح تفاصيل الضاغطة للتوربين الغازي

مكوناتها:-

تتكون الضاغطة المحورية من مراحل عديدة وتتكون كل مرحلة منها من صف واحد من الريش أو الزعانف الثابتة يتبعها صف واحد من الزعانف أو الريش المتحركة ويقوم صف الزعانف المتحركة التي تدور مع المحور الدوار للضاغطة بضرب الهواء وإكسابهُ طاقة حركية بينما يقوم صف الزعانف المثبتة على بدن الضاغطة بتحويل هذهِ الطاقة الحركية إلى ضغط بنسبة انضغاط يجب أن لا تكون عالية وعلى سبيل المثال في بعض التصاميم تكون نسبة الانضغاط بحدود (6:1) وهي تتطلب وجود (17) مرحلة لتحقيق هذهِ النسبة أما في التصاميم الأكثر حداثة فقد أمكن تحقيق نسبة انضغاط بحدود(13:1) باستخدام (10) مراحل فقط.

أ- مميزاتها:-

1) كفاءتها العالية لمكائن التوربين المتوسطة والعالية القدرة الحصانية كما في التوربينات الصناعية.
2) قدرتها على إنتاج معدلات عالية جداً من جريان الهواء.
3) صغر المساحة الوجهية التي تحتاجها.
4) سهولة وبساطة مجاري الهواء بين مرحلة وأُخرى.

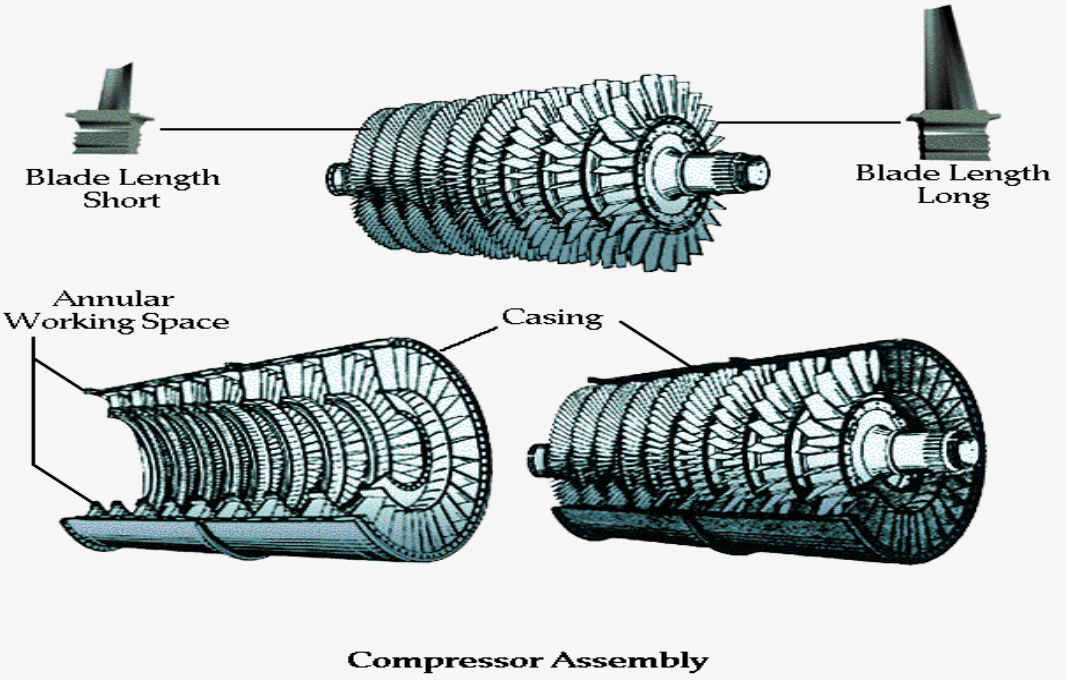
ب- عيوبها:-

1) تتطلب تصاميم دقيقة وصعوبة في تصنيع الأجزاء وخاصة الزعانف لذلك كلفتها عالية .
2) حدوث ظاهرة التغير المفاجئ الايروديناميكي(ظاهرة التغير المفاجيء Surge).
3) طول المسافة بين بداية الضاغطة ونهايتها مما يسبب ليونة في المحور الدوار ويعرض الضاغطة للاهتزازات غير مرغوب فيها إذا لم تصمم بعناية.
4) وزنها كبير بسبب تعدد المراحل وتحتاج الى قدرة عالية للتشغيل

لذلك نظرا لمتطلبات الكفاءة العالية والمساحة الوجهية القليلة اعتمدت الضاغطة المحورية في المجال الصناعي والطيران.

ج-وصف الضاغطة المحورية Axial air compressor

تتكون الضاغطة المحورية من جزئين رئيسيين وهو جزء ثابت والذي يتمثل في جزء مقدمة الضاغطة ويسمى جسم الريش التوجيهية وهو (عبارة عن حلقة كاملة تصنع من الالمنيوم يرتب عليها من الداخل عدة صفوف من ريش ثابتة او متغيرة الجذور وهي الريش التوجيهية) ثم يلي هذا الجزء جزء اخر ثابت يسمى غلاف الضاغطة وهذا الجزء ينقسم الى جزئين امامي وخلفي وكل قسم ينقسم الى جزئين اخرين علوي وسفلي وقد يقسم الى اكثر من جزء لتسهيل فتح الضاغطة من اجل اجراء الفحوصات ويصنع هذا الجزء من حديد الصب ويثبت على الجهة الداخلية لغلاف الضاغطة الريش الثابتة ترتب بشكل صفوف كل صف يحتوي مابين (50-60) ريشة وتصل عدد الصفوف الى مابين (13-20) ،عند رفع الجزء العلوي لغلاف الضاغطة يظهر الجزء الرئيسي الثاني وهو الجزء الدوار والذي يتكون من محور طويل تترتب عليه اقراص تكون بعدد المراحل التي تتكون منها الضاغطة يرتب على كل قرص صف من الريش الدوارة ويكون عدد الريش في الصف الواحد بقدر بنفس عدد الريش الثابتة بحيث يشكل صف من الريش الدوارة مع صف اخر من الريش الثابتة لمرحلة واحدة.



Compressor Assembly

ملاحظة: تعتبر جميع أجزاء الضاغطة من المعادن الباردة.

يصنع محور الضاغطة والأقراص من الفولاذ الواطئ المسبوك أما الريش الدوارة فتصنع من الفولاذ المقاوم للصدأ ويغطى بمعدن النيكل كادميوم لمقاومة الاجهادات المتولدة من ضرب الهواء للريش بسبب دورانه بسرعة عالية.

د-مبدأ عمل الضاغطة :-

الأساس في مبدأ العمل يعتمد على زيادة سرعة الهواء في مقدمة الضاغطة وتعجيل دخوله من خلال الريش التوجيهية الثابتة أو المتغيرة ويمكن تلخيص ذلك كمايلي:

أ - دخول الهواء على صف من الريش الثابتة لتحويل طاقة الهواء إلى طاقة داخلية تتمثل بزيادة ضغطه وهذه العملية تستمر من مرحلة إلى أخرى

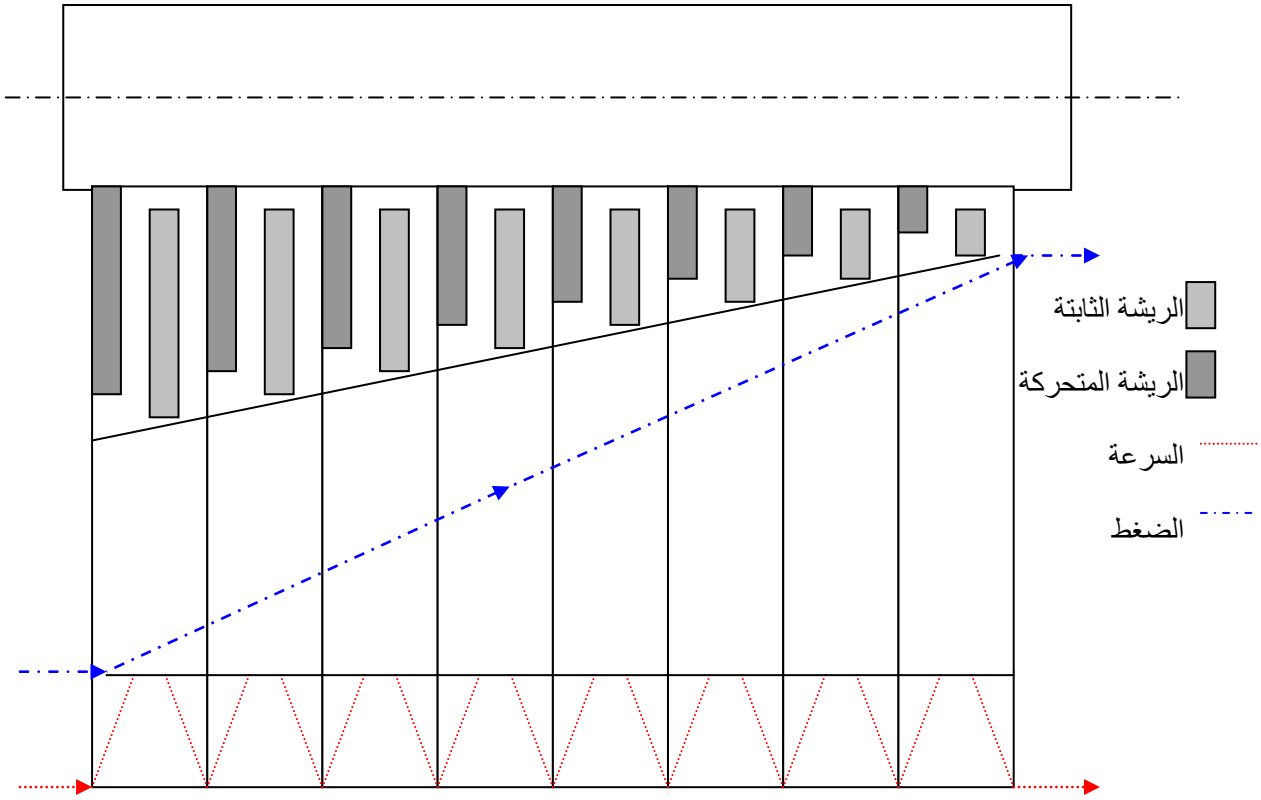
ب - صغر المساحة السطحية لمقطع انسياب الهواء من مرحلة إلى أخرى في الريشة الثابتة والدوارة ويساعد على زيادة ضغط الهواء وبنسبة ثابتة خلال المراحل.

ت -مرور الهواء على الجهة المقعرة للريشة الثابتة يساهم على رفع الضغط للهواء ودورانه على الجهة المحدبة للريشة الدوارة يساهم في زيادة طاقته الحركية وبنفس الضغط

ث -قلة حجم الفراغ الحلقي الذي يمر فيه الهواء من مدخل الضاغطة الى نهايتها يزيد من كثافة الهواء اعتمادا على مبدأ الحجم النوعي للهواء، ويعمل ايضا على مرور الهواء من خلال مراحل الضاغطة مما يساهم هذا التصميم بجعل معدل التدفق ثابت في الضاغطة.

مخطط يوضح مبدأ عمل الضاغطة

وهو مخطط انسياب الهواء خلال مراحل الضاغطة



ريش الضاغطة:

1 -الريش الثابتة والريش الدوارة

1 -الريش الثابتة: تصنع الريشة بشكل انسيابي لتسمح بمرور الهواء على سطحها بحيث تعطي تدرج ثابت في زيادة الضغط على طول الريشة من القاعدة الى الرأس وتثبت هذه الريشة في الجهة الداخلية من هيكل الضاغطة في حلقة تثبيت مربوطة على الهيكل ويستحسن غلق الريشة في مكانها بطريقة تمنعها من الدوران حول الهيكل.

2 -الريشة الدوارة: تصنع الريشة الدوارة بشكل انسيابي بحيث تسمح للهواء بالمرور على سطحها مع اعطاء تدرج ثابت في زيادة الطاقة الحركية للهواء بما يحافظ على سرعة الهواء المحورية ثابتة ويستوجب لي الريشة من القاعدة الى الرأس لتكون زوايا ملائمة تقليل السرعة والحصول على السرعة المناسبة.

اجزاء الريشة الثابتة والدوارة:-

1 - السطح الانسيابي (مساحة مقطع الريشة):-

وهو الجزء الظاهر من الريشة والذي يتم عليه تحولات طاقة الهواء بنوعيها الى طاقة حركية في الريشة الدوارة وعلى طاقة ضغط في الريش الثابتة وتصمم بشكل دقيق جداً وبزاوية ميل محسوبة لاغراض الحصول على مواصفات ثابتة ومعينة للهواء.

2 - قاعدة اسناد الريشة:-

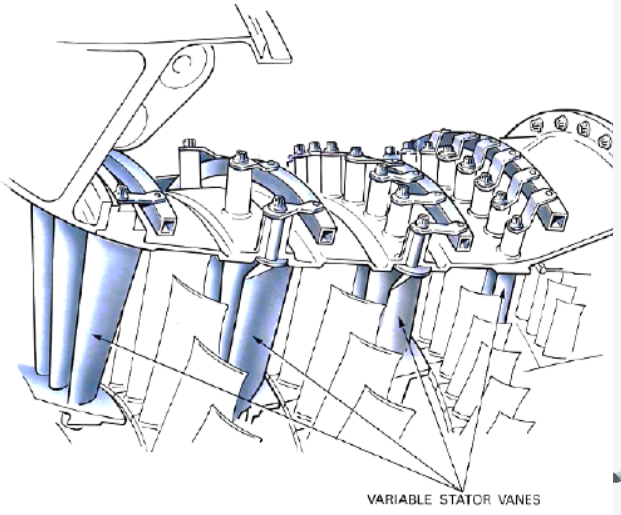
هذا الجزء تستند عليه المساحة السطحية للريشة على القرص الدوار

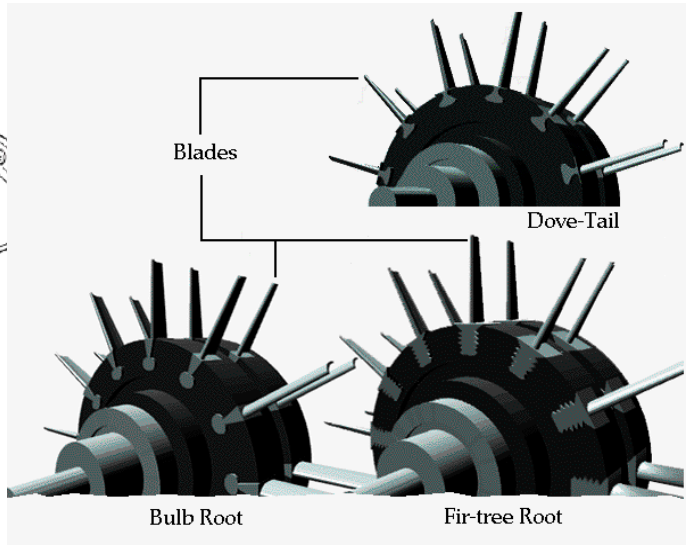
3 جذر الريشة:-

وهو من الاجزاء المهمة جداً حيث يقوم بتثبت الريشة في مكانها بالقرص الدوار او بغلاف الضاغطة بحلقة التثبيت وبطرق مختلفة حسب تصميم الجذر بحيث يزداد ثباتاً واستقراراً عند دوران القرص بفعل قوى طرد مركزي متولدة نتيجة الدوران وهناك ثلاث انواع من الجذور شائعة الاستعمال (الشجرة المقلوبة والجذر الصلد وذيل الحمام dove tail

طريقة ربط الريشة مع القرص الدوار وغلاف الضاغطة:-

لطريقة الربط أهمية كبيرة حيث تحتاج الى مكننة حقيقية وتصميم يزيد من استقرار الريشة في مكانها خصوصا اثناء الدوران حيث تتولد قوى طرد مركزي تساهم في زيادة ثبوت الريش في مكانها وعدم خروجها.





2-6-1-3ظاهرة التغير المفاجيء Surge Phenomenon:

ضمن مواصفات تصميم الضاغطة **تسمى (النقطة التصميمة للتوربين) (Designing Point)** توضع حدود تدفق للهواء تقع ضمن منطقة تصميمية محددة ففي حالة خروج انسياب الهواء عن هذه الحدود التصميمية خلال مراحل الضاغطة تحدث حالة التغيير المفاجيء وهي على نوعين:-

1 -التغيير المفاجيء عند السرعة البطيئة(Low Surge Speed)

يحدث هذا التغيير نتيجة لسرعة الضاغطة البطيئة في بداية التشغيل حيث تكون غير قادرة على منح سرعات محورية للهواء تساعده على الاندفاع خلال مراحل الضاغطة الى النهاية بسبب تصميم الضاغطة وهو تدرج في ارتفاع الضغط من البداية الى النهاية مما يسبب ميول بعض جزيئات الهواء للرجوع من مناطق الضغط العالي الى الضغط الواطئ فتحدث تيارات تيار بالاتجاه الصحيح والتيار الاخر معاكس له فتتصادم الجزيئات مسببة اهتزازات قوية قد تؤدي الى تكسر الريش خصوصا المراحل الامامية.

2 -التغير المفاجيء عند السرعة العالية (high surge speed)

يحدث هذا التغير نتيجة لتشغيل التوربين فترات طويلة وبصورة مستمرة فتزداد درجة الحرارة للغازات الى اعلى ما يمكن وبذلك تزداد سرعة التوربينة مما يتطلب كميات من الهواء اكثر وعليه تزداد سرعة الضاغطة لتوفير هذه الكميات فيزداد الحمل على ريشة الضاغطة ويحدث انفعال في جريان الهواء نتيجة

السرعة العالية ينتج عنه اهتزازات قد تؤدي الى تكسر الريش في المراحل الخلفية مما يؤدي الى توقف التوربين.

2-6-1-4الطرق الرئيسية في التخلص من ظاهرة التغير المفاجيء:-

هناك طرق اساسية امكن الاعتياد عليها للتخلص من هذه الظاهرة وهي :-

أ - الريش التوجيهية المتغيرة

ب -صمام الاستنزاف

ت -الضغط على مرحلتين

أ- الريش التوجيهية المتغيرة:-

الريش التوجيهية : هي عبارة عن ريش ثابتة كبيرة الحجم نسبيا ذات جذور متحركة تثبت في جسم الضاغطة في الجزء الاول منه من الجهة الداخلية قد تصل الى ثلاث صفوف متتالية وقد ويصل عدد الريش الى 20 ريشة.

الاهمية: تقوم هذه الريش التوجيهية بتعجيل عملية دخول الهواء وزيادة سرعته بكمية تدفق منتظم خلال التشغيل الابتدائية للتوربين للتخلص من ظاهرة التغير المفاجيء في السرعة وتاخذ ثلاث اوضاع:-

1. الوضع الاول وضع الغلق الكلي:-

وفي هذا الوضع تعمل الريش عمل ابواق nozzle لكي تزيد من سرعة دخول الهواء الى الضاغطة.

2. الوضع الثاني وضع الفتح الجزئي:-

ويحدث هذا الوضع عند وصول التوربينة الى سرعة معينة من سرعة التوربين المقررة لتساهم بزيادة سرعة الهواء الداخلة الى الضاغطة وبمساهمة يسيرة

3. الوضع الثالث وضع الفتح الكلي:-

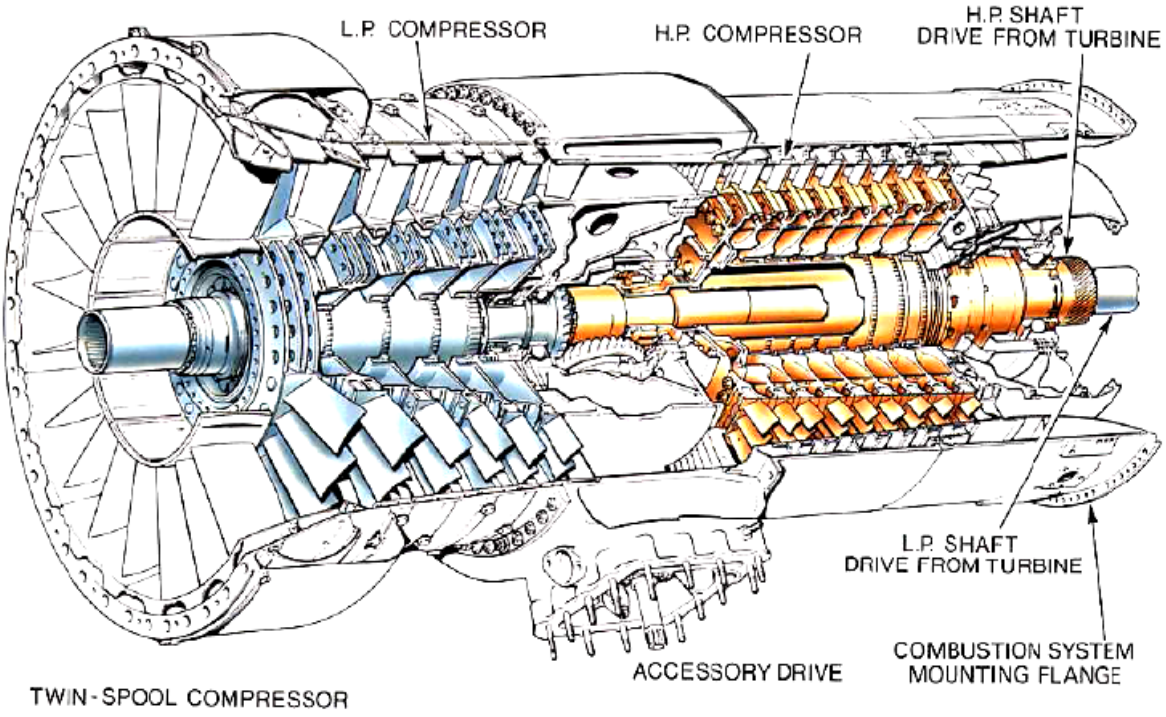
وتاخذ هذا الوضع عند وصول التوربين الى السرعة المقررة لتكون ريش ثابتة اعتيادية.

ب- صمام الاستنزاف Bleed Valve

هو صمام يوضع في مراحل معينة من الضاغطة قد تكون مراحل وسطية فاذا كانت الضاغطة مؤلفة من 13 مرحلة يوضع مابين المرحلة السادسة والسابعة ويفتح اوتوماتيكياً عند وصول سرعة توربين الضاغطة الى 70% من سرعته التصميمية حيث ياخذ جزء من الهواء وحوله بواسطة انبوب الى ممرات العادم ليأخذ مع غاز العادم والغاية من هذه الحالة زيادة سرعة الهواء في المراحل الاولى للضاغطة ومنع حدوث ظاهرة التغير المفاجيء (في بداية التشغيل) اما في التوربينات الحديثة والتي تصميمها يصل بنسبة انضغاط (1:13) بعدد مراحل 10مرحلة فيستخدم صمامين استنزاف واحد في المرحلة الثانية والاخر ما بعد المرحلة الخامسة.

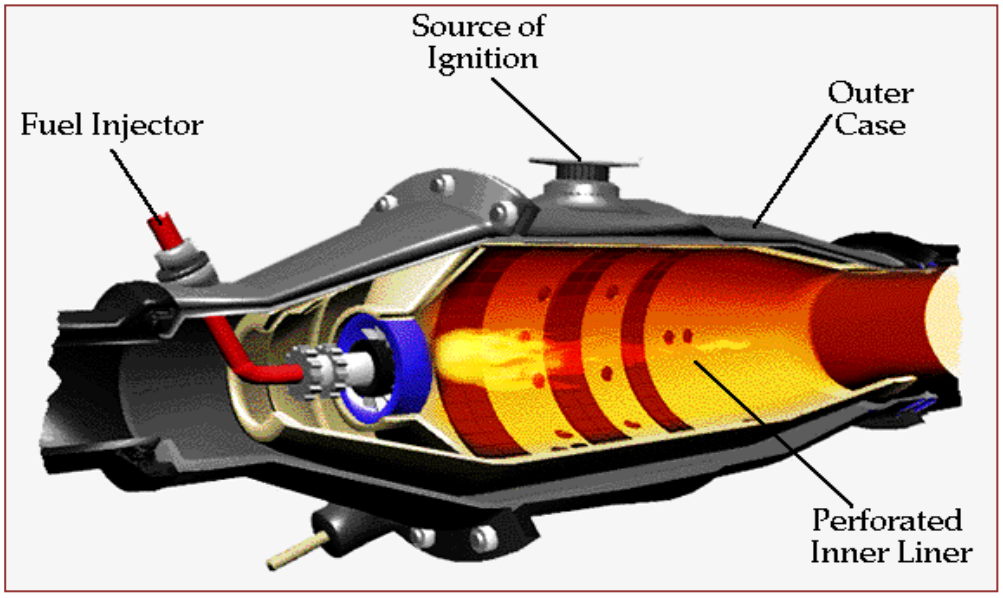
ج- الضغط على مرحلتين:-

في هذا الترتيب تتكون الضاغطة من جزئين وهي ضاغطة الضغط الواطيء (L.P.Comp.)والجزء الثاني هي ضاغطة الضغط العالي (H.P.Comp) ترتبط ضاغطة الضغط الواطيء مع توربينة الضغط الواطيء بمحور منعزل تماماً عن المحور الذي يربط ضاغطة الضغط العالي مع توربينة الضغط العالي حيث تشتغل في البداية ضاغطة الضغط الواطيء فتشتغل توربينة الضغط الواطيء وعند وصول سرعة هذا التوربين سرعة معينة يبدأ توربين الضغط العالي بالاشتغال فيشغل ضاغطة الضغط العالي مجموعة المحاور المذكورة تدور بشكل مستقل عن بعضها ويفصل بينهما محامل بالغة الدقة وذات معامل احتكاك منخفض جداً.



2-6-2غرفة الاحتراق combustion chamber

وهي على اشكال مختلفة حسب المساحة المتوفرة وكذلك المسافة المسموح بها بين الضاغطة والتوربين ليتم في غرفة الاحتراق عملية الاحتراق بين الوقود والهواء لانتاج الطاقة وبمواصفات تلائم التوربين.



2-6-2-1كيف تتم عملية الاحتراق :-

تتم عملية حرق الوقود والتي تتضمن خلط قطرات الوقود الصغيرة جداً مع الهواء ثم تبخر هذه القطرات بعد تزويدها بالشحنة الحرارية من شمعات القدح فتتكسر الهيدروكاربونات الثقيلة الى هيدروكاربونات يمكن خلطها خلط متجانس مع جزيئات الهواء (الاوكسجين) ومن ثم تفاعلها كيمياويا مع بعض،ان الهواء المجهز الى غرفة الاحتراق هو نسبة 1-100 بالنسبة للوقود المجهز وهذه الكمية اكثر بكثير من حاجة غرفة الاحتراق وما تحتاجه عمليه الاحتراق حيث كمية الهواء اللازمة بالنسبة للوقود لعملية الاحتراق 1-7 (حسب نوع الوقود) فالباقي من 100 هو عبارة عن هواء تبريد (نواتج الاحتراق) (تبريد جسم غرفة الاحتراق،تبريد ريش التوربين) وعليه يدخل الهواء غرفة الاحتراق على ثلاث مراحل:-

أ - منطقة الاحتراق الابتدائية:-

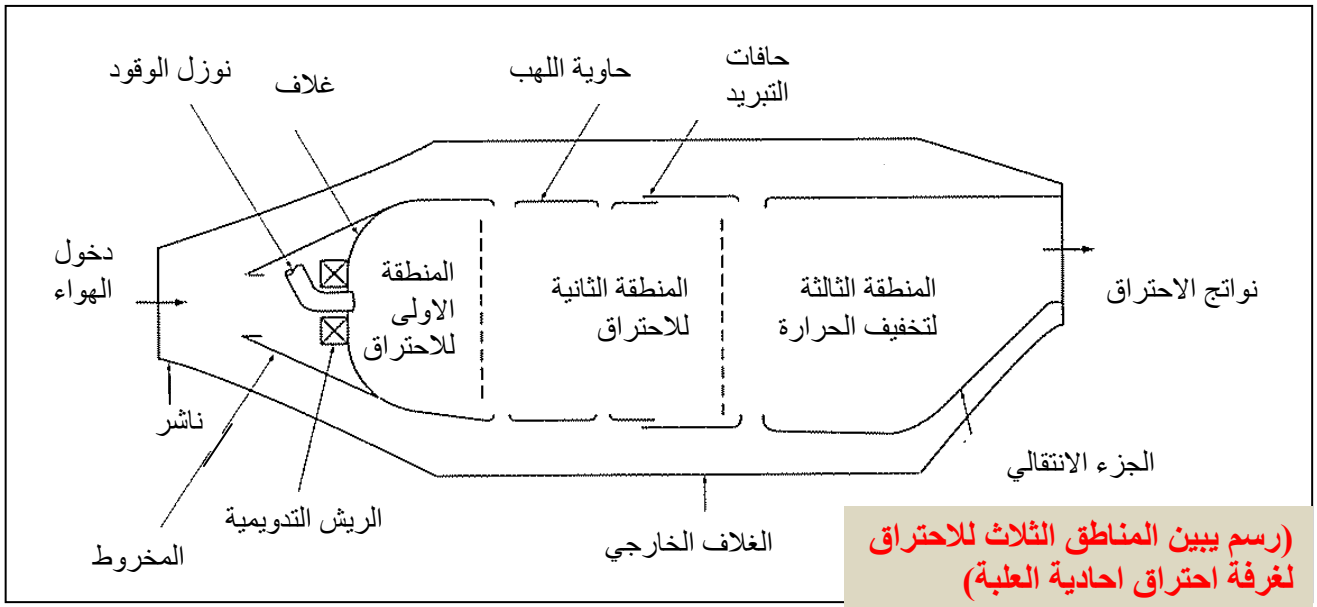
وهي فتحات صغيرة يدخل فيها مابين 10:15 من نسبة الهواء الكلية عند منطقة حول حارق الوقود او بوق الوقود بعد ذلك تشغل شمعة القدح فيحدث تفاعل كيمياوي وتنتج اللهبة والتي تصل درجة حرارتها الى ما يقارب 2000درجة مئوية مما يزيد من عملية الاحتراق ويدخل الوقود من خلال ثقوب صغيرة في مقدمة بوق الوقود بينما يدخل الهواء من خلال فتحات صغيرة موجودة بين ريش ملتوية تسمى ريش تدويمية مثبتة حول بوق الوقود لضمان مزج جيد بين الوقود والهواء وكذلك توفير سرعة مناسبة للهواء لعدم انطفاء اللهبة.

ب - منطقة الاحتراق الثانوية:-

حيث يدخل 30% من نسبة الهواء الكلية لاكمال عملية الاحتراق وتدخل هذه النسبة من خلال ثقوب مختارة بعناية فائقة في جدار حاوية اللهب او في الحارق في الغرف التي لاتحتوي على حاوية اللهب وهذه الكمية من الهواء لاتقوم بتبريد الشعلة الرئيسية ولاتبطئ من عملية الاحتراق بل تساعد في احراق الهيدروكاربونات الغير محترقة مما يزيد من كفاءة الاحتراق.

ت -منطقة الاحتراق الثالثة:-

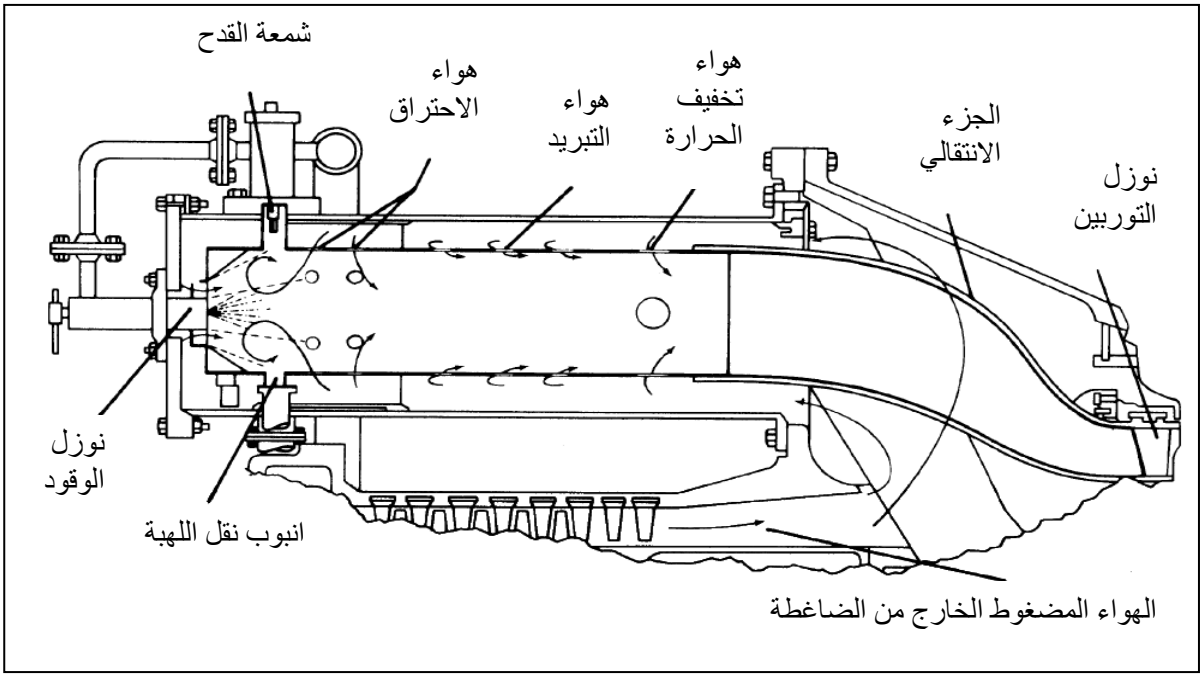
وهي منطقة يتم فيها خلط بقية الهواء مع اللهبة لتخفيف درجة حرارة الغازات المحترقة الى درجة مقبولة وملائمة لريش التوربينة (المرحلة الاولى لريش توربينة الضاغطة) تصل درجة الحرارة في هذه المنطقة 800-1000 درجة مئوية وكذلك تكمن اهمية هذه الشحنة من الهواء في ابعاد اللهبة عن جدران غرفة الاحتراق اي مركزية اللهبة تدخل من هذه الكمية من الهواء من خلال ثقوب انسيابية موزعة على جدار حاوية اللهب بحيث تضمن درجات حرارة متساوية للغازات الخارجة على ريش التوربين.



(رسم يبين المناطق الثلاث للاحتراق لغرفة احتراق احادية العلبة)

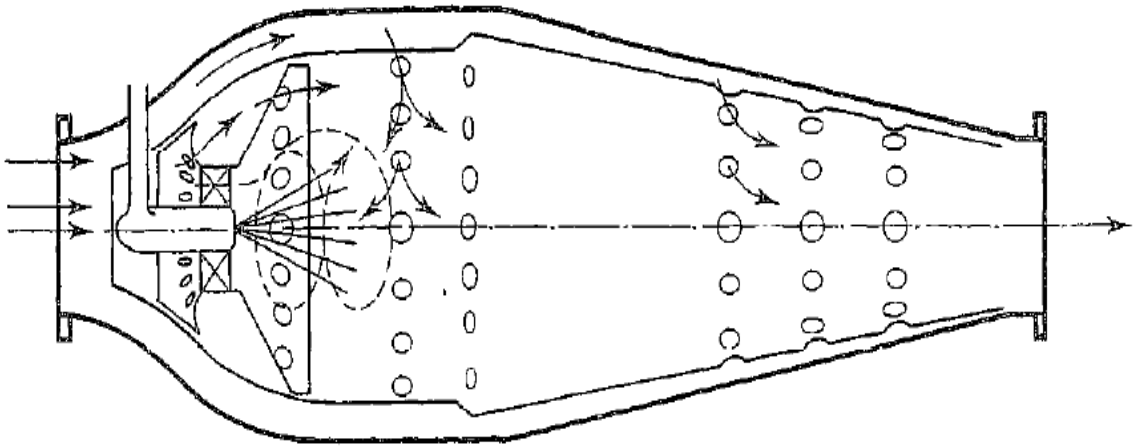
2-6-2-2كيفية المحافظة على اللهبة:-

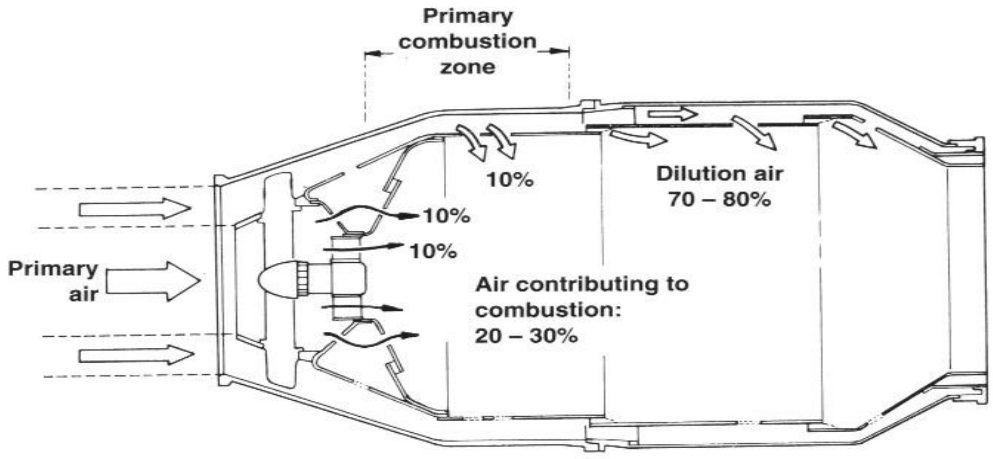
هناك مسألة مهمة هي مسألة المحافظة على استمرار اللهبة ومنعها من الانطفاء حيث ان شمعة القدح تتوقف عن العمل عند تكون اللهبة الرئيسية ووصولاً الى هذه الحالة هناك اساليب مختلفة احدها بحقن الوقود من خلال ثقوب في بوق الوقود بينما يدخل الهواء الرئيسي خلال فتحات صغيرة تقع بين ريش ملتوية تسمى ريش تدويمية Swirl تدفع الهواء باتجاه الوقود ثم يشكل حركة دورانية بسبب وجود الريش الملتوية تضمن بذلك توفير سرعة هواء مناسبة لاستمرار الاحتراق وبنفس الوقت تضمن اختلاط متجانس بين الهواء والوقود وينتج عن ذلك ايضا منطقة تخلخل بالضغط في مركز الغرفة حول محور الريشات لحاوية اللهب يسبب ارتداد جزء من اللهبة باتجاه نوزل الوقود مما يساعد على ادامة احتراق الوقود واستمرار اللهبة.



2-6-2-3أنواع غرفة الاحتراق:-

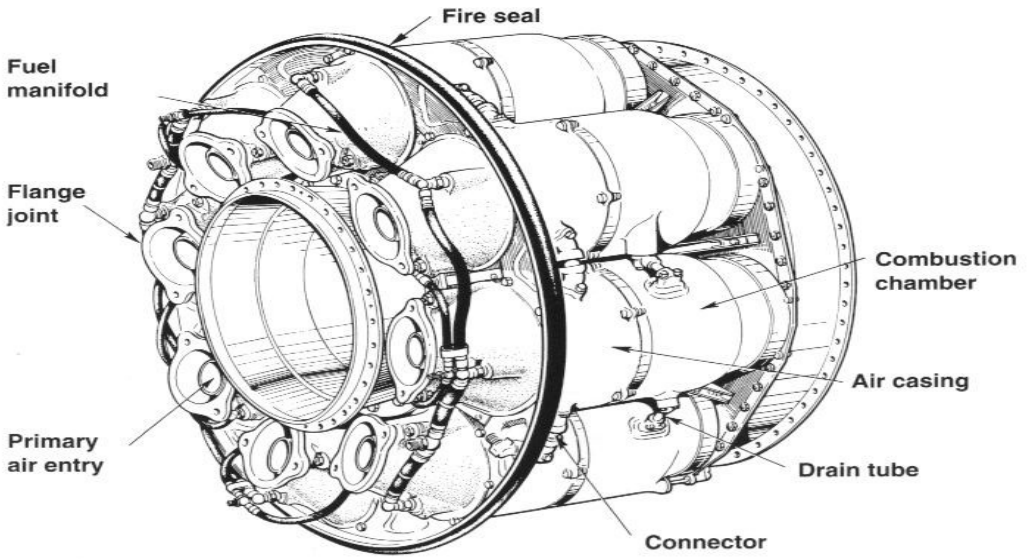
1 - غرفة الاحتراق المنفردة العلبة can-type combustion chamber





Schematic flow in combustion chamber

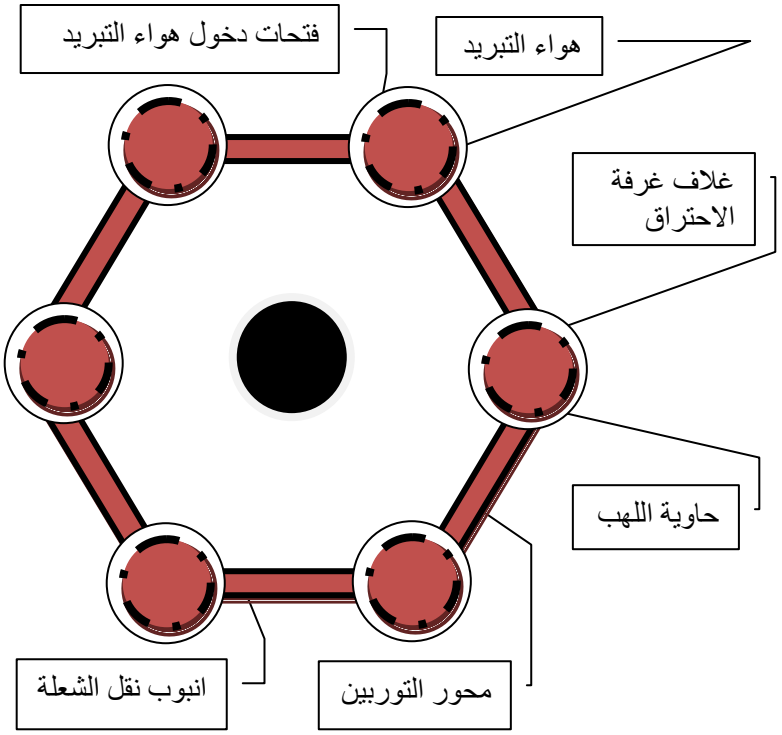
2 ـ غرفة الاحتراق المتعددة العلب multi-can-type combustion chamber



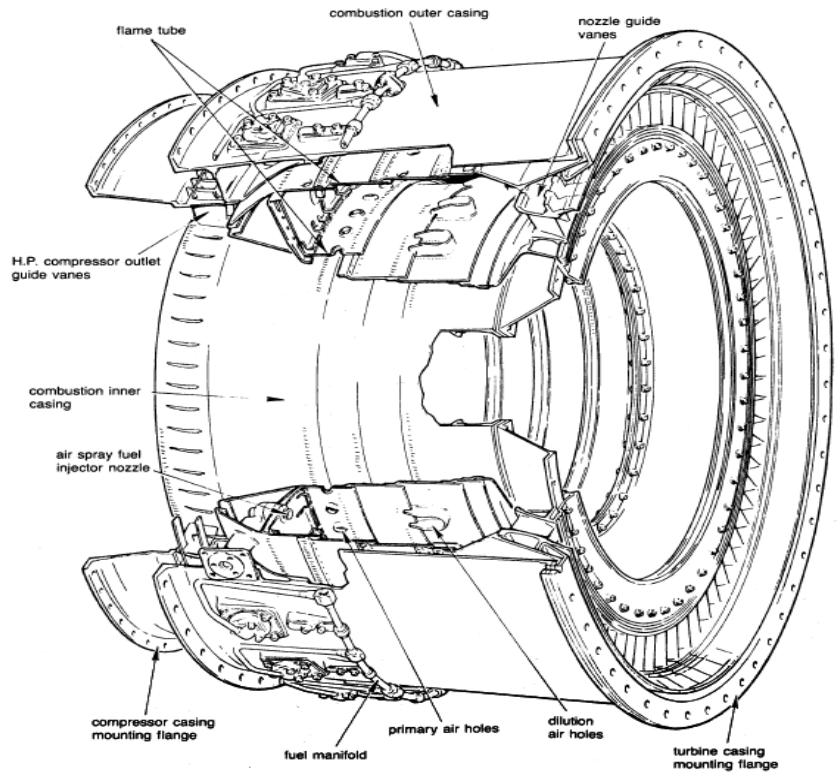
Circumferentially arranged can-type burners

وهو عبارة عن غرفة احتراق متعددة حاويات اللهب مع وجود غلاف يحيط بكل حاوية على حدة توزع محيطياً حول المحور وترتبط كل حاوية لهب من بدايتها بناشر ضاغطة الهواء المركزية وترتبط نهاية كل حاوية بمجمع الغازات الساخنة وتحتوي كل حاوية لهب على حارق وقود منفرد يستخدم هذا النوع من غرف الاحتراق في محركات الطائرة حيث تعتبر من الغرف ذات الكفاءة العالية والكلفة الاقتصادية العالية جداً وتمتاز بسهولة الصيانة.

مخطط يبين غرفة الاحتراق المتعددة العلب

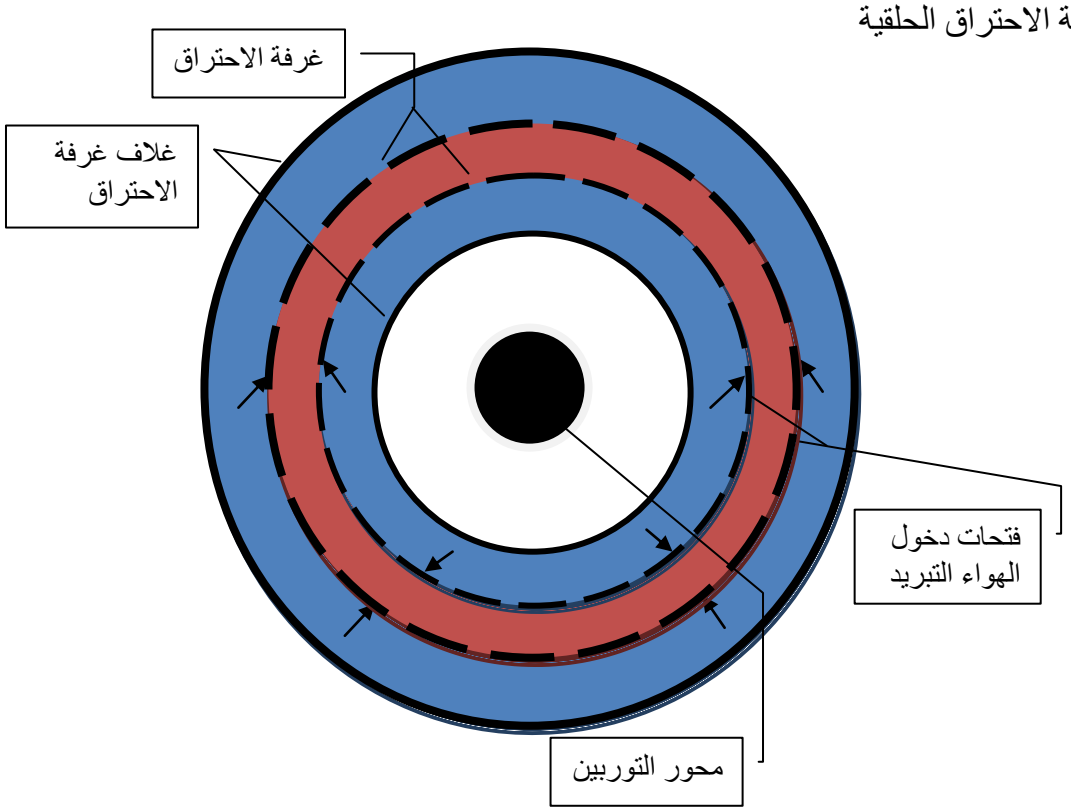


3 ـ غرفة الاحتراق الحلقية annular-type combustion chamber

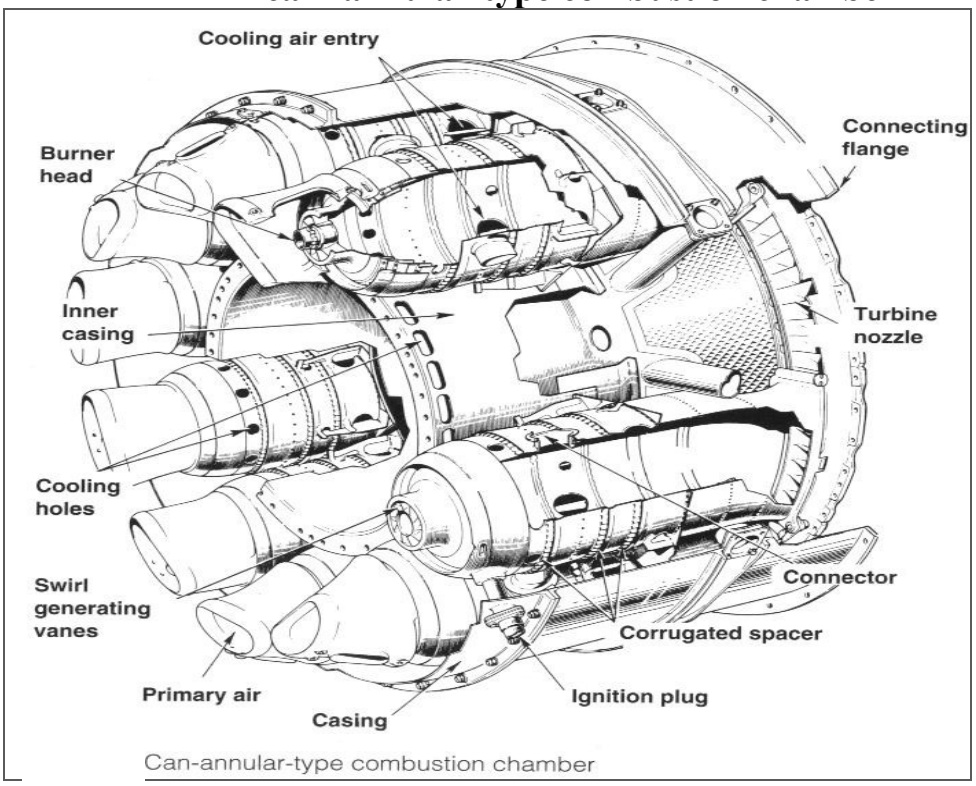


يتكون هذ النوع من غرفة واحدة اسطوانية الشكل محيطة بالمحور صغيرة نسبياً بالنسبة للنوع الاول ،يستخدم هذا النوع مع الضاغطات المحورية في التوربينات الصناعية وتحتوي على عدة حارقات موزعة محيطياً حول غرفة الاحتراق عند المقدمة ،من عيوب هذا النوع صعوبة توزيع الهواء بشكل منتظم داخل الغرفة مما يؤدي الى صعوبة انتظام درجة الحرارة للغازات الساخنة في محيط الغرفة.

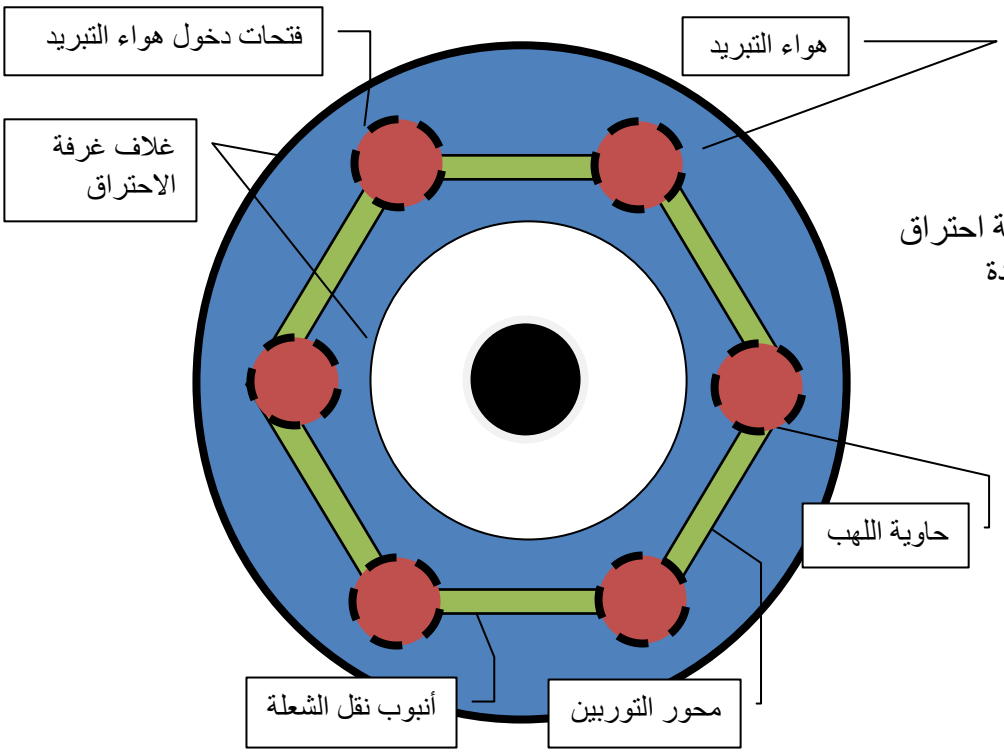
مخطط يبين غرفة الاحتراق الحلقية



4 ـ غرفة احتراق احادية العلبة متعددة حاويات اللهب
can- annular-type combustion chamber



وهي عبارة عن غرفة واحدة حول المحور توزع حاويات اللهب بشكل محيطي داخل الغرفة وتحتوي كل حاوية لهب على حارق وقود وقد صممت هذه الغرف للاستفادة من المساحة المحصورة بين الضاغطة وتوربينة الضاغطة مع تلافي وضع حارقات داخل غرفة الاحتراق من دون حاويات لهب ، يدخل الهواء المضغوط داخل غلاف الغرفة ويتوزع على حاويات اللهب من خلال ثقوب في جدار الحاوية نحصل في هذا النوع من التصاميم على توزيع درجات الحرارة بشكل منتظم عند مجمع الغازات قبل التوربين وتتصل كل حاوية لهب مع الاخرى بانابيب ضيقة تنقل اللهبة من الحاوية التي يحدث فيها عملية الاشتعال للحاويات الاخرى في منطقة الاحتراق الابتدائية.



(مخطط يبين غرفة احتراق احادية العلبة متعددة حاويات اللهب)

2-6-2-4مكونات غرفة الاحتراق:

1 -الغلاف الخارجي CASING:-

وهو الغطاء الرئيسي الذي يحتوي بداخله كافة أجزاء غرفة الاحتراق ويصنع من ألواح معدنية سميكة وعلى شكل اسطوانات مصنوعة من سبائك فولاذية من الحديد الاوستناتيكي لكي تكون متينة ومقاومة للاجهادات الحرارية.

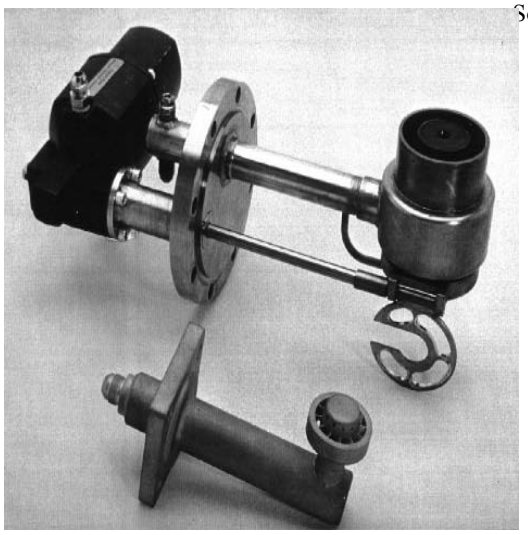
2 -حاوية اللهب FLAMTUBE:-

وهي عبارة عن اسطوانات مجوفة ذات سمك دقيق تصل الى 0.8ملم أو اكثر بقليل تصنع من سبائك معدنية مقاومة للحرارة وترتبط بالحارق عند مقدمتها لكي تمر الشعلة بداخل الحاوية وترتبط عند نهايتها بالجزء الانتقالي الذي يجمع الغازات قبل دخوله الى التوربين وتحتوي حاويات اللهب على ثقوب موزعة بعناية كبيرة لادخال الهواء الى منطقة الاحتراق الثانوية في بعض الاحيان والى منطقة تبريد وتخفيف الغازات الساخنة والتي تعمل ايضاً على تمركز اللهبة وتمنع تماسها بجدار الحاوية او حارق بدون حاويات كما في الغرفة الحلقية.

3 -الحارق BURNNER:-

وهو جزء معدني دائري الشكل يوضع في مقدمة حاوية اللهب او بداخل غرفة الاحتراق التي ليس فيها حاوية اللهب ويحتوي هذا الجزء على اهم اجزاء غرفة الاحتراق وهي بوق الوقود والريش التدويمية (الملتوية) لادخال الهواء بصورة ملتوية لضمان خلق رذاذ الوقود مع الهواء وكذلك لخلق حركة دورانية تسبب تخلخل الضغط في مركز حاوية اللهب لضمان عودة قسم من اللهب باتجاه بوق الوقود وادامة اللهبة وتحتوي الحارقات ايضاً على فتحات دخول الهواء الابتدائي وفتحات دخول الهواء الثانوي في بعض الاحيان وهناك ثلاثة انواع من الحارقات حسب نوع الوقود وهو حارق وقود غازي وحارق وقود سائل وحارق وقود ثنائي)

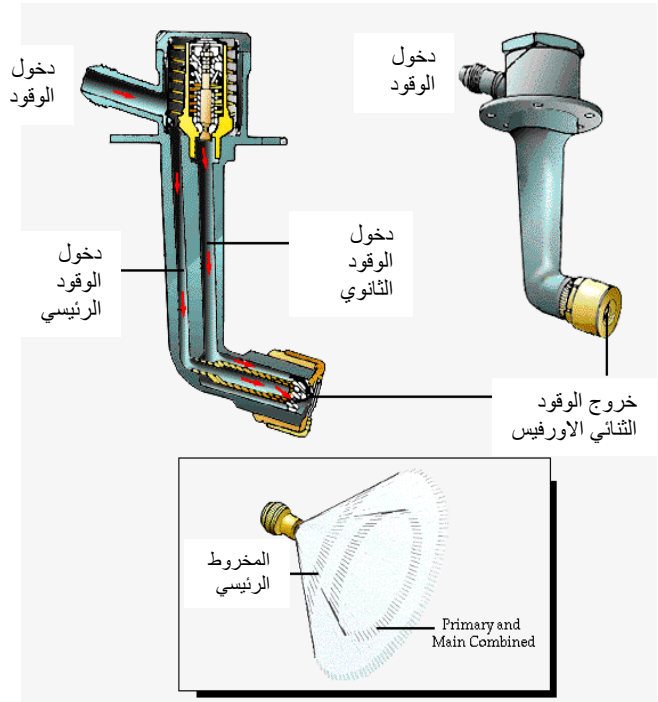
Solar Turbines



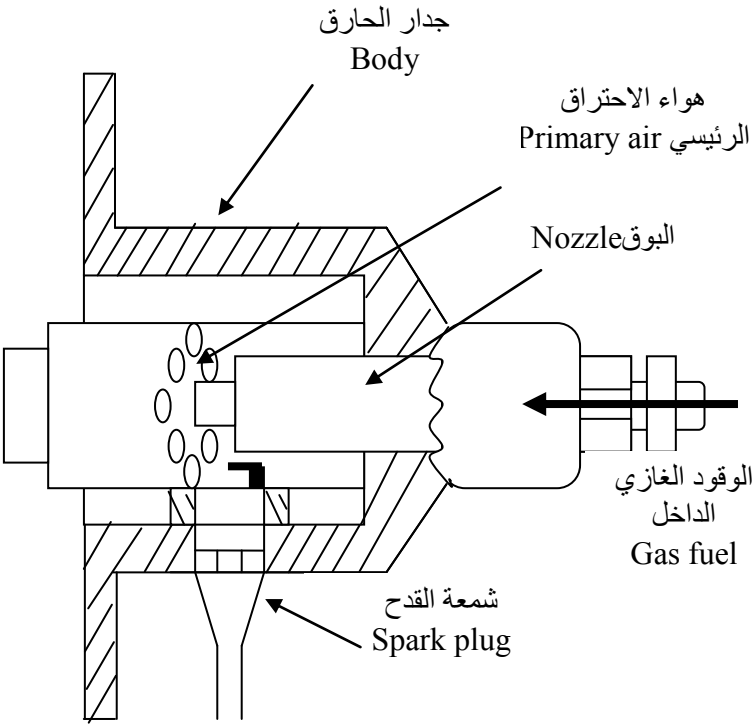
4 -ابواق الوقود FUEL NOZZEL:-

وهو الجزء المهم من الحارق واجبه ادخال الوقود من منظومة الوقود الى داخل حاوية اللهب ويكون تصميم البوق بحيث يساعد على اخراج الوقود بشكل رذاذ وعلى شكل طبقة مخروطية دقيقة جداً رأس المخروط يكون عند مقدمة البوق ويجب ان يكون ضغط الوقود كافي لترذيذ قطرات لا يتجاوز حجمها مابين (50-100مايكرون) لكي يضمن احتراق هذه القطرات بتيار الهواء ففي حالة انخفاض ضغط الوقود تكون حجم القطرات اكبر من المطلوب ويتطلب حرقها مسافة ووقت اكثر مما يسبب عدم اكتمال عملية الاحتراق فتكون ترسبات كاربونية ودخان اسود تترسب على جدران حاوية اللهب وكذلك تزيد طول اللهبة مما يسبب خطر على ريش التوربين، اذن يجب المحافظة على ضغط الوقود ثابت في جميع مراحل السرع من سرعة التحميل الكامل الى سرعة التشغيل الصغرى وعليه

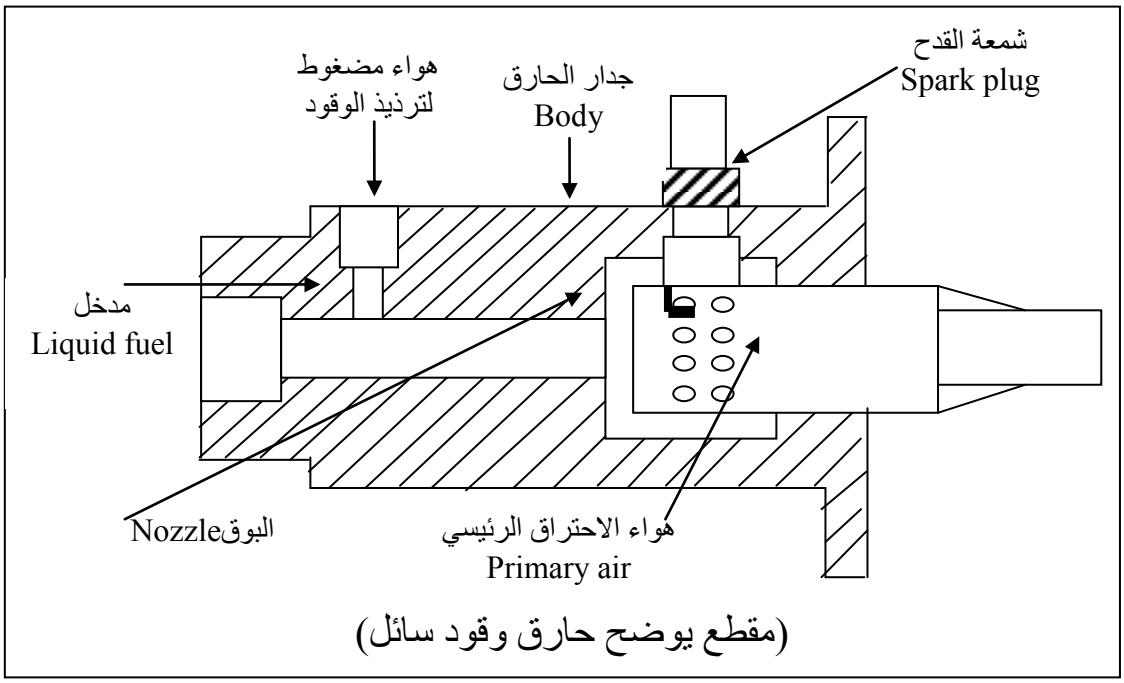
يتطلب تصاميم خاصة بالحارقات توفر الضغط المطلوب في كافة ظروف التشغيل للتغلب على هذه المشكلة لذلك وضعت عدة تصاميم للحارقات اولها (حارق الوقود المزدوج)""وهو حارقة تحتوي على فتحة مركزية واحدة لحقن وقود بكمية محددة عند التشغيل بسرع منخفضة ولكن تحت ضغط كافي لتذرير الوقود بالحجم المطلوب مع وجود فتحة ثانية محيطية لحقن كميات اضافية في حالة زيادة السرعة وعند التحميل وبتغير الضغط.



Single Line Duplex Fuel Nozzle



(مقطع يوضح حارق وقود غازي)



(مقطع يوضح حارق وقود سائل)

5 -شمعة القدح SPARK PLUGE:-

وهو جزء مهم يربط في مقدمة غرفة الاحتراق في منطقة الاحتراق الابتدائية بعض الاحيان يكون واحد او اكثر من واحد موزع على حاويات اللهب في مرحلة التشغيل الابتدائية يقوم بتجهيز الشعلة الرائدة الصغيرة والتي تقوم بدورها باشعال اللهبة الرئيسية، تربط من خلال منظومة السيطرة بالعين السحرية فعندما تظهر اللهبة الرئيسية تقطع منظومة السيطرة التيار الكهربائي عن القادح.

6 -انبوب نقل الشعلة Transition Part:-

وهو عبارة عن انبوب اسطواني ذو قطرصغير يربط في مقدمة غرفة الاحتراق عند منطقة الاحتراق الابتدائي والغاية منه ايصال اللهبة من حاويات اللهب التي تبدء بها عملية الاحتراق الى حاويات اللهب التي لاتحتوي على شمعة قدح عند بداية الاشتغال.

7 -الجزء الانتقالي:-

وهو عبارة عن مجمع للغازات الساخنة من كافة غرف الاحتراق او حاويات اللهب ويكون انسيابي بشكل ينظم جريان الغازات وتوجيهها على الريش الثابتة من المرحلة الاولى لتوربين الضاغطة يحاط بغلاف خارجي يمر بينه وبين هذا الجزء هواء التبريد لتنظيم درجة حرارة الغازات وخروجها بشكل متساوي.

-بعض العوامل المهمة في تصميم غرف الاحتراق:-

1 -يجب ان يكون مستوى درجات الحرارة للغازات بعد عملية الاحتراق واطئ نسبياً بما يلائم ريش التوربين حيث تتعرض لاجهادات ميكانيكية بسبب سرعتها اضافة الى الاجهادات الحرارية.

2 -يجب ان يكون توزيع درجات الحرارة للغازات الساخنة معروفاً عند نهاية مجال الاحتراق بنفس درجات الحرارة في جميع اجزاء الغرفة وليس من الضرورة ان يكون متساوي من المركز الى المحيط حيث يمكن ان يزيد مع نصف القطر عند شغل التوربين كون الاجهادات الميكانيكية لريش التوربين تتغير من جذر الريشة الى قمتها.

3 -المحافظة على استمرارية عملية الاحتراق مع استقرار اللهبة التي تحرق الهواء بسرع كبيرة بحدود (30-60)m/sec^2 وبظروف تشغيل مختلفة من التحميل وفي اللاتحميل تختلف نسب الخلط من (1-20) ومن (1-16) في التوربينة البسيطة ومن (1-100) و (1-200) في التوربينة التي تحتوي على مزج بالوقود

4 -يجب منع تكون ترسبات كاربونية في غرف الاحتراق وعلى الحارقات كون تحرك هذه الترسبات مع تيار الغازات السريع يسبب خدوش لريش التوربين بالاضافة الى الاهتزازات الناتجة من القوة الايروداينميكية مما يسبب انفعال هذه القطع الكاربونية وتدويرها بسرع كبيرة مع تيار الهواء لذلك عدلت بتصاميم حديثة لحارقات الوقود.

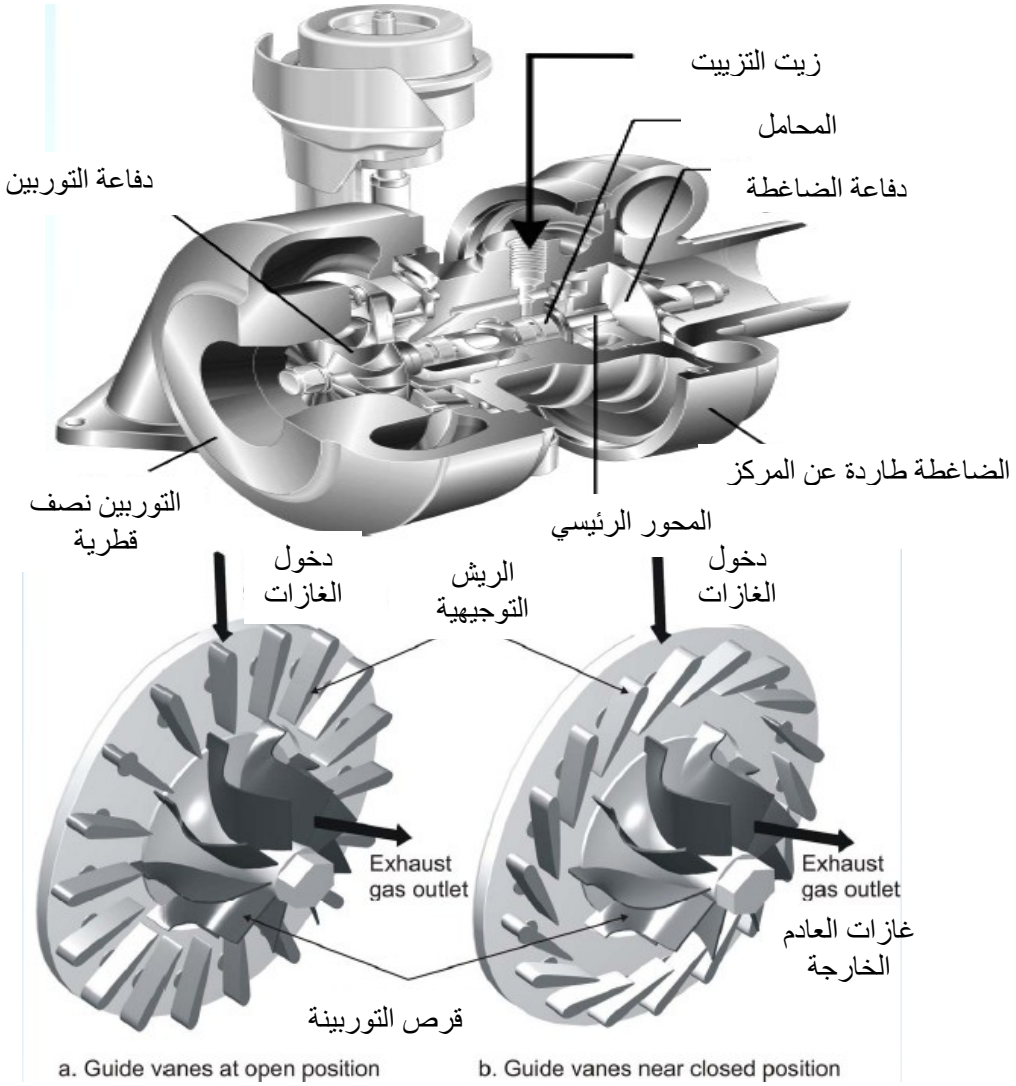
5 -في توربين الطائرات يجب ان تكون عملية الاحتراق مستقرة خلال الظروف المختلفة من ضغوط الهواء والتي تتغير مع الارتفاعات ومع تغير سرعة الطائرات.

2-6-3التوربين TURBINE:-

وهي تصنف الى نوعين رئيسيين:-

1- تصنيف على اساس اتجاه جريان الغاز ويشمل:-

أ -التوربينة النصف قطرية Radial Turbine



ب- التوربينة المحورية Axial Turbine

2- تصنيف على اساس القدرة الخارجة ويشمل:-

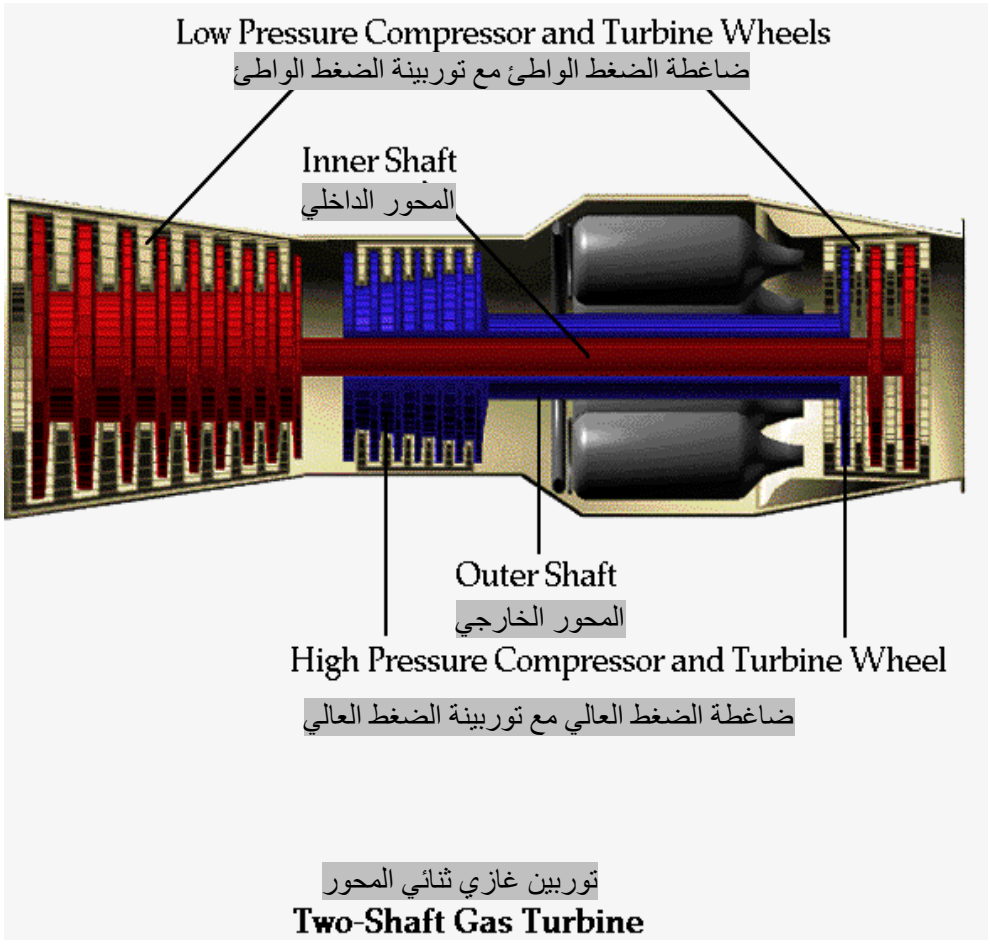
أ- توربينات المحرك النفاث:

وهي على نوعين:

1- في حالة التوربين احادي المحور وتسمى التوربينة مولدة الغاز (الضاغطة وغرفة الاحتراق) ويكون في هذا النوع محور واحد فقط يربط ما بين الضاغطة وتوربينة الضاغطة .

2- في حالة التوربين ثنائي المحور يطلق ايضا تسمية مولد الغاز على مولد الضاغطة وغرفة الاحتراق والتوربينتين وتسمى التوربينة الاولى في المحركات المتحركة بتوربينة الضغط

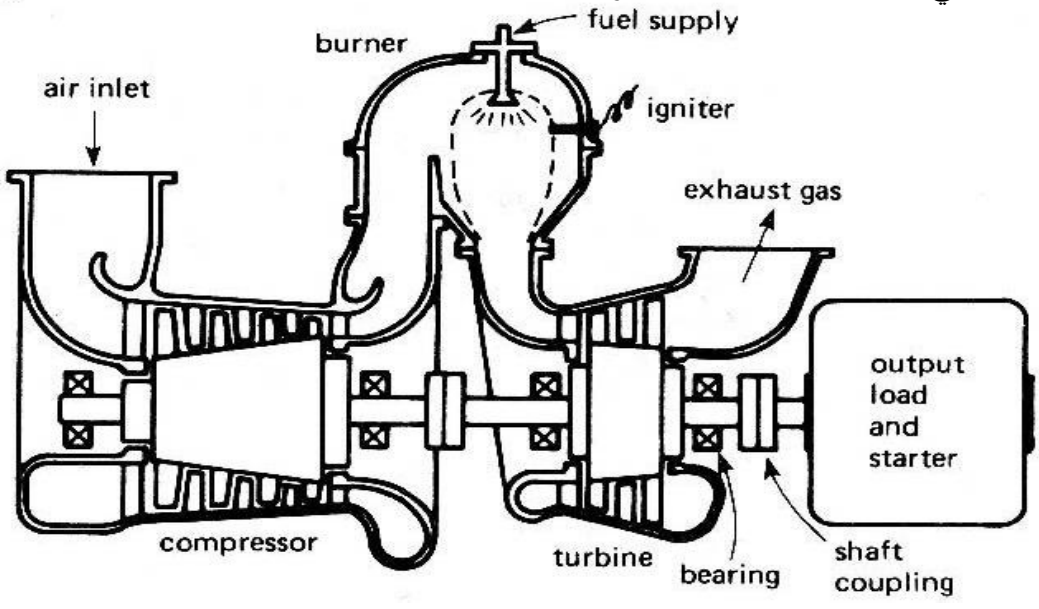
العالي HPT وتربط مع ضاغطة الضغط العالي HPC اما التوربينة الثانية تسمى توربينة الضغط الواطئ LPT وتربط هذه التوربينة مع ضاغطة الضغط الواطئ LPC (الضاغطة الاولى).



ب التوربينات الصناعية :

وهي على نوعين:-

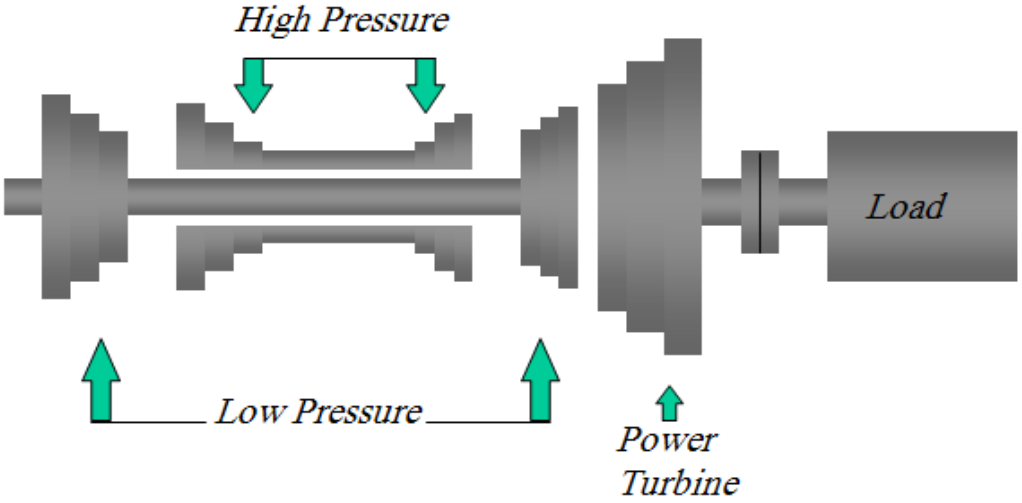
1 توربين احادي المحور: ويحتوي على توربينة واحدة من النوع الانسيابي المحوري متعددة المراحل وتكثر استخداماتها في محطات توليد الطاقة الكهربائية.



2 ـ توربين ثنائي المحور: وهو الشائع في الاستخدامات الصناعية النفطية تتكون التوربينة من جزئين الجزء الاول هي توربينة الضاغطة CT والتي تكون مخصصة لتشغيل الضاغطة.

والتوربينة الثانية تسمى توربينة القدرة PT وتكون مخصصة لتشغيل الحمل وعادة تكون التوربينتين مفصولتين عن بعضهما وتكونان الاولى ثابتة السرعة اما الثانية فتكون متغيرة السرعة.

Multi shaft Jet-derived Gas turbine



2-6-3-1اجزاء التوربينة:-

1 ـ نوزلات التوربينة 1st stage nozzle :-

وهو الصف الاول من الريش الثابتة من توربينة الضاغطة يثبت على الجهه الداخلية من غلاف هذه التوربينة وهو اول من يواجه الغازات الحارة الاتية من مجمع الغازات في الجزء الانتقالي يتم فيه استغلال الطاقة الموجودة في الغاز وتحويلها الى طاقة حركية هائلة ثم توجيهها على صف اخر من الريش يصنع هذا الجزء من سبائك النيكل المسبوك بالطرق الفراغية والمعامل حراريا معاملة خاصة.

2 ـ الريش الدوارة CT Bucket:-

وهو الصف الاول من الريش الدوارة لتوربينة الضاغطة وهو الذي يستغل الطاقة الحركية المكتسبة في نوزلات التوربينة ويحولها الى طاقة ميكانيكية لتدوير القرص ومن ثم المحور لتشغيل ضاغطة الهواء يصنع هذا الجزء من سبائك الكوبلت مع نسبة عالية من الكروم.

3 ـ الريش الثابتة 2nd stage nozzle:-

وهو الصف الثاني من الريش الثابتة لتوربينة الضاغطة في حالة تعدد مراحل توربينة الضاغطة والصف الاول من الريش الثابتة لتوربينة القدرة في حالة تكون توربينة الضاغطة من مرحلة واحدة تستغل الطاقة الحرارية المتبقية في الغازات بعد خروجها من المرحلة الاولى وتحويلها الى طاقة حركية هائلة بما يناسب تصميم هذه الريش.

4 -الريش الدوارة PT Bucket:-

وهي الصف الاول من الريش الدوارة لتوربينة القدرة وتستغل الطاقة الحركية المكتسبة في النوزلات لتوربينة القدرة وتحويلها الى طاقة ميكانيكية لتدوير قرص هذه التوربينة ومن ثم المحور المربوط مع الحمل وشغل هذه التوربينة مخصص لتشغيل الحمل وهكذا في حالة تعدد المراحل.

ريشة التوربينة :-

اجزاءها:-

أ -السطح الانسيابي:-

يعتبر عنصر التشغيل في التوربين الغازي حيث يتم فيه تحولات الطاقة بنوعيها الحرارية والحركية للريش الثابتة والدوارة يصمم بشكل انسيابي بحيث يسمح بمرور الغازات على السطح فيحدث تدرج في استغلال الطاقة لذلك تصنع الريش بزاوية ميل تزداد من القاعدة الى الرأس

ب قاعدة اسناد الريشة:-

وهي قاعدة اسناد تثبت على حافة القرص الحامل للريش الهدف منها هو اسناد الريشة على القرص الدوار.

ت جذع الريشة:-

وهو عبارة عن مساحة سطحية كبيرة يثبت داخل القرص الدوار حيث يمتص كمية كبيرة من الحرارة من السطح الانسيابي للريشة ويوزعها على معدن القرص الدوار لتقليل الاجهادات المسلطة على السطح الانسيابي للريشة.

ث جذر الريشة :-

وهو اخر جزء يتم من خلاله تثبيت الريشة داخل القرص ومنعها من الخروج اثناء الدوران ويحتاج هذا الجزء الى مكننة اثناء التصميم(التصنيع).

2-6-3-2تركيب التوربينة الغازية ودورة الغاز:-

تتكون التوربينة في التوربينات الصناعية من توربين الضاغطة وتوربين القدرة وعادة تكون من مرحلة واحدة او مرحلتين او ثلاث مراحل على العكس من الضاغطة المحورية حيث تصل عدد مراحلها في بعض الأنواع من 10- 17 مرحلة والسبب في ذلك هو ان التوربين يحصل فيه تمدد للغازات اي انخفاض بالضغط بنفس اتجاه جريان الغاز ويساعد هذا الانخفاض على زيادة معدل الجريان ولا يسبب اي انعكاس له.

اما في الضاغطة المحورية فيحدث ان اتجاه الجريان في الضاغطة باتجاه ارتفاع الضغط مما يتسبب في انعكاسه وحدوث ظاهرة التغير المفاجيء حيث يدخل تيار الغاز من مجمع الجزء الانتقالي لغرفة الاحتراق بدرجة حرارة 825-900C وضغط 4bar (في بعض انواع التوربينات الغازية) الى المرحلة الاولى من ريش توربينة الضاغطة وعلى اول صف من الريش وهي الريش الثابتة ويصل عددها في المرحلة الواحدة مابين 60-70 ريشة مثبتة على محيط الغلاف الداخلي لجسم توربينة الضاغطة وبعدها توجه الغازات الى ريش المرحلة نفسها وهي الريش المتحركة والتي تثبت على محيط القرص الدوار ويصل عددها مابين 60-70

ريشة والتي من خلالها يتم انتاج الطاقة الميكانيكية لتدوير محور التوربينة المرتبطة بالضاغطة، تخرج الغازات من المرحلة الاولى الى المرحلة الثانية لتوربين الضاغطة في حالة تعدد المراحل والى المرحلة الاولى لتوربينة القدرة في حالة التوربين احادي المرحلة وبضغط 1.75bar وبدرجة حرارة 646C وبنفس الطريقة تستغل الطاقة خلال مرور الغاز على 70-80 ريشة لكل صف من المرحلة الاولى وتنتج الطاقة الصافية

التي تدور ماكنة الحمل بعدها توجه الغازات الى ممرات الغاز العادم بدرجة حرارة 526C وبضغط هو الضغط الجوي ثلثي الطاقة الناتجة من توربينة الضاغطة لتشغيل الضاغطة والثلث الاخر ينتج من توربينة القدرة لتشغيل ماكنة الحمل.

2-6-3-3الاجهادات التي تتعرض لها ريشة التوربينة:-

1 -التسخين العالي (Over heating):-

وهو عبارة عن ظهور بقع داكنة اللون تبدو على السطح الانسيابي للريشة اثناء اشتغال التوربين وعند التوقف تظهر بشكل بقع سوداء السبب هو تعرض الريشة لدرجات حرارة عالية لفترة تشغيل مستمرة.

2 -الكلل (Fatigue):-

وهي ظاهرة انهيار الريشة نتيجة لتعرضها لصدمات عالية في ظروف التشغيل المختلفة وتحت تأثير التذبذب العالي الناجم من تغيير ظروف الغاز.

3 -زحف المعدن:-

وهو اجهاد يصيب ريشة الضاغطة كونها ذات اوزان مختلفة لايتجاوز 100غرام (100g) وتدور بسرعة قد تصل الى 7000 دورة بالدقيقة(7000rpm) مما يزيد من التاثيرات الميكانيكية لتصادم جزيئات الهواء مع سطح الريشة وما تحمله من شوائب فيحدث تداخل بين معدن الريشة وبين هذه المواد المتراكمة فيؤدي الى ازالة طبقة من سطح الريشة اثناء الصيانة.

2-7 المنظومات المساعدة لتشغيل التوربين الغازيAuxiliary Turbine Operating System

كما علمنا فان التوربين يتألف من أربعة أجزاء رئيسة هي الضاغطة وغرفة الاحتراق وتوربين الضاغطة وتوربين القدرة. ولأجل تشغيل هذه الأجزاء الأربعة بشكل مترابط ومتسلسل وأمين من دون تعرض التوربين لأي خطر يسبب تلفا لأحد أجزائه أو أجهزته، تم تجهيز التوربين بمجموعة من المنظومات الضرورية لتحقيق ذلك، وهذه المنظومات هي كما يلي:-

1. **منظومة ترشيح الهواء (Air Filter System).**
2. **منظومة بدأ التشغيل(Starting System) .**
3. **منظومة دهن التزييت(Lubricating Oil System) .**
4. **منظومة تجهيز الوقود(Fuel System) .**
5. **منظومة الهواء(Air System) .**
6. **منظومة السيطرة(Control System) .**

وفيما يلي شرحا مبسطا لعمل وأجزاء كل منظومة من المنظومات المذكورة أعلاه :-

1. منظومة ترشيح الهواء(Air Filter System)

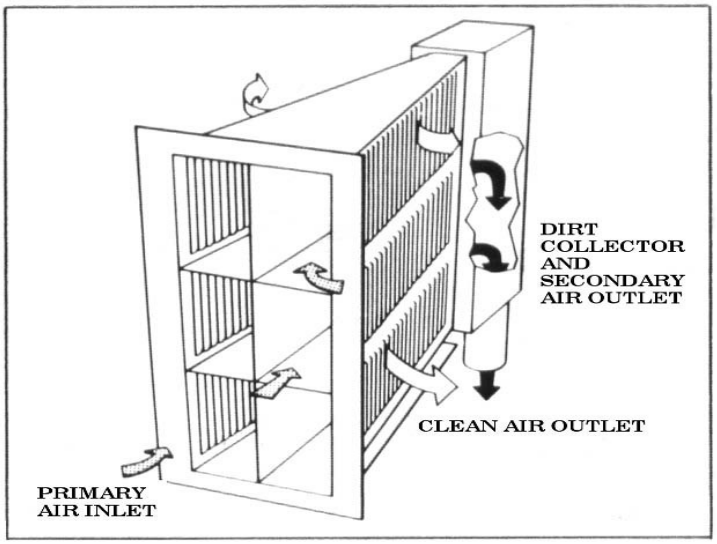
إن الغاية من ترشيح الهواء هو تخليصه من تلك الجسيمات التي تترسب علـى ريش ضاغطة الهواء والتي ينتج عنها .(Tmax) خفضا في كفاءة الضاغطة وارتفاع درجة حرارة الغازات الساخنة العظمى وعليه فان المرشح المناسب للبيئة التي ينصب فيها التوربين يجب أن يزيل بحدود (90%) من هذه الجسيمات والتي يكون قطرها بحدود (2 – 20 ميكرون) . والمرشح المناسب للطبيعة الصحراوية يختلف بنوعه عن المرشح المناسب للطبيعة في المناطق الباردة وهكذا ، ويقرر ذلك الشركة المصنعة للمرشح .

وهناك عدة أنواع من المرشحات منها :-

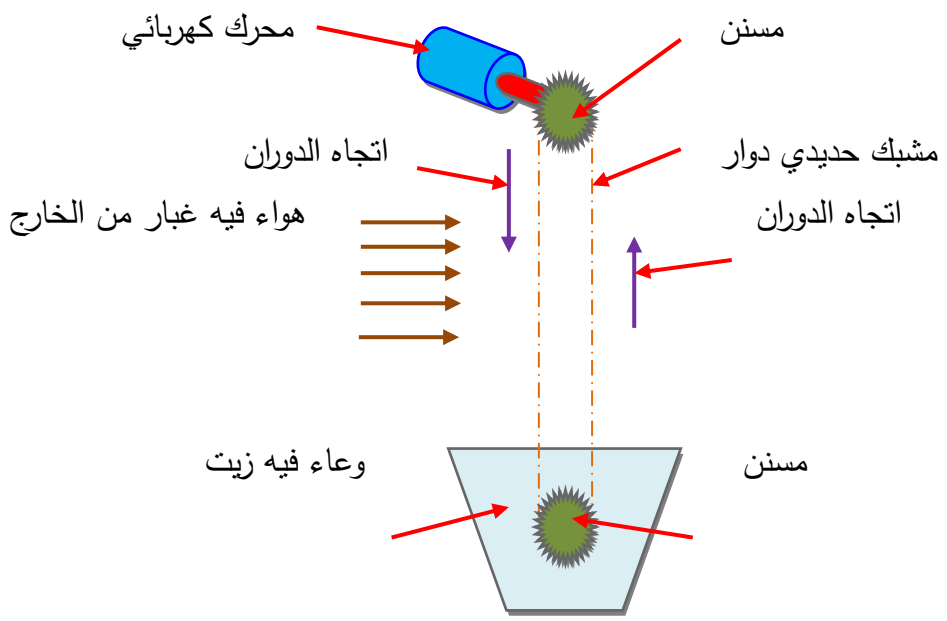
أ. **المرشحات الالكتروستاتيكية :-** وهي مرشحات تحتوي على ألواح تحمل شحنات كهربائية استاتيكية تشحن جسيمات الغبار بشحنة معاكسة تلتصق بالألواح فيتخلص منها الهواء .

ب. **المرشحات الجافة :-** وفيها ألواح من مادة سليلوزية تمسك الذرات والجسيمات وعند وصول فرق الضغط خلالها إلى واحد انج من الماء ينظف المرشح أو يبدل بلوح جديد .

ت. **المرشحات نوع الإعصار الحلزوني (Cyclone):-** وفيه يفصل الغبار عن الهواء بواسطة فعل الحركة الدورانية في جهاز الإعصار الحلزوني (Cyclone) .



ث. **المرشحات المبللة بالزيت :-** وفي هذا النوع من المرشحات توجد شاشة (Screen) مصنوعة من مشبك حديدي وتدور هذه الشاشة صعودا ونزولا على عجلتين العليا تدور بواسطة محرك كهربائي والعجلة السفلى والشاشة تدوران في إناء يوجد بداخلة زيت فتتبلل الشاشة بالزيت وعندما يمر عليها تيار الهواء الخارجي يعلق الغبار بالزيت. وعند تنزل الشاشة في الإناء مرة أخرى يعلق الغبار في إناء الزيت. ويتم تنظيف الإناء كلما تجمع الغبار فيه أثناء الصيانة الجزئية والشاملة. وفيما يلي أدناه رسم توضيحي لهذا النوع من المرشحات.



مخطط رقم (1) يوضح مرشحة مبلله بالزيت

2. منظومة بدأ التشغيل (Starting System)

إن أول خطوة في تشغيل التوربين الغازي هو تعجيل سرعة ضاغطة الهواء إلى السرعة التي تعطي فيها ضغطا كافيا للهواء لإدخال الوقود في هذا الضغط لينتج عنه احتراق وسرعة توربين قادرة على الاستمرار بحيث لا يتوقف الاحتراق. ويتم ذلك باستخدام إحدى الوسائل التالية :- (Self – Sustained Combustion)بل يديم نفسه

أ. هواء مضغوط مجهز من مصدر كافي لتدوير التوربين الذي يدور الضاغطة .

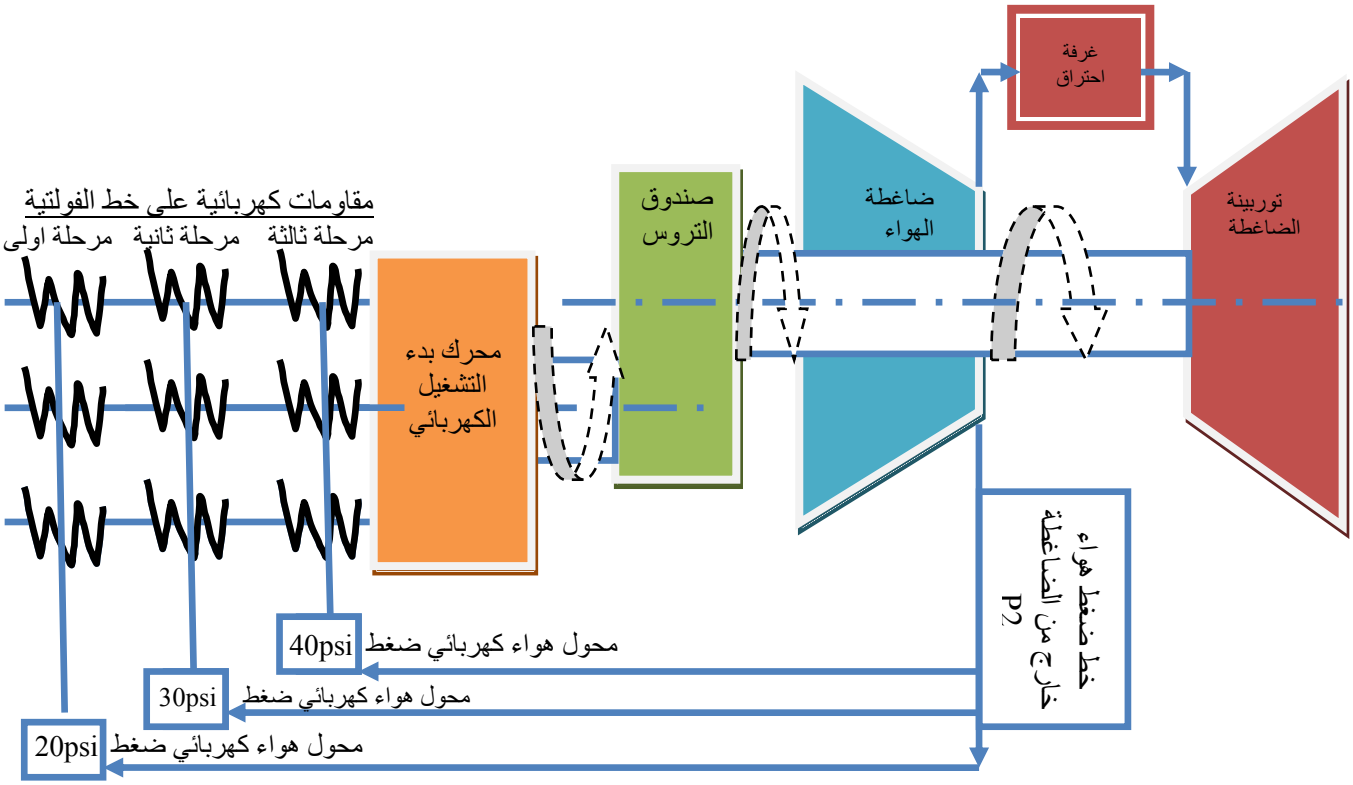
ب. بواسطة كبسولة هواء مضغوط تدير توربينا صغيرا مساعدا مربوطا على المحور الدوار للضاغطة كما في الطائرات العسكرية.

ذو قدرة حصانية (D.C &. A.C). ت. بواسطة إدارة المحور الدوار للضاغطة بماكنة ديزل أو محرك كهربائي

تتناسب مع وزن المحور الدوار للضاغطة وسرعته المطلوبة لحد بدء الاحتراق . كما يتم في الحقول النفطية التي يتوفر فيها الغاز بضغوط كافية لإدارة المحور الدوار للضاغطة بواسطة توربين غازي إذا كان المحور الدوار للضاغطة صغيرا نسبيا. أما إذا كان المحور الدوار كبيرا نسبيا وتتوفر الطاقة الكهربائية فيدار التوربين بواسطة محرك كهربائي ذو تيار متناوب يكون مربوطا إلى صندوق مقاومات كهربائية. وتزداد سرعة المحرك بإزالة المقاومات الكهربائية تدريجيا بحيث تزداد سرعة المحرك والمحور الدوار إلى السرعة المطلوبة التي عندها يصبح الاحتراق قادرا على إدامة عند هذه السرعة تعمل أجهزة السيطرة للتوربين على إيقاف المحرك وفصله عن (Self – Sustained Speed) نفسه

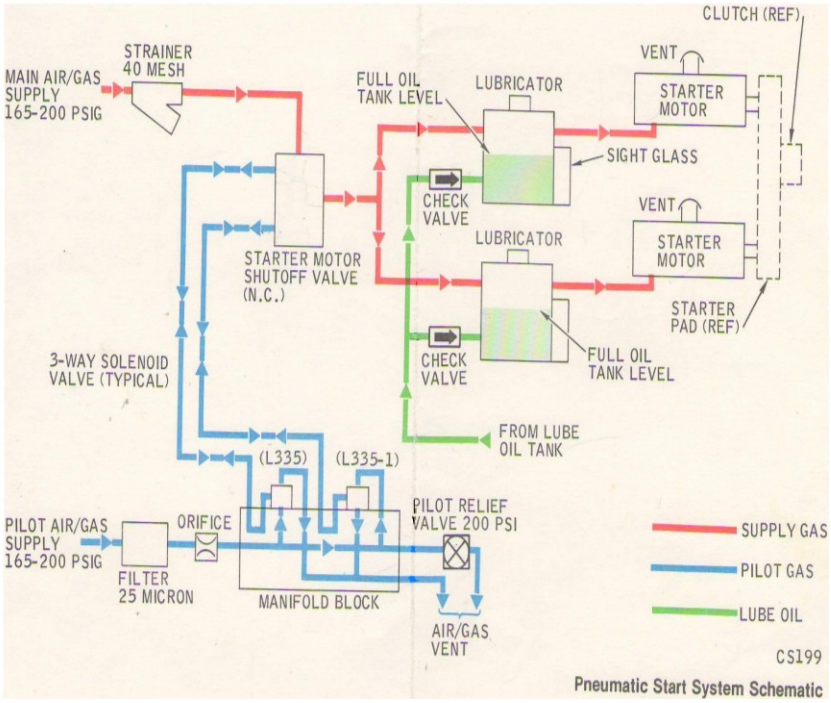
المحور الدوار . وهناك طريقتان من طرق فصل المقاومات الكهربائية وزيادة سرعة المحور الدوار للضاغطة تدريجيا. إحدى هذه الطرق هي بالاعتماد على ضغط الهواء الخارج من الضاغطة، فكلما زاد ضغط الهواء

الذي ينتج عن زيادة سرعة الضاغطة يتم بواسطة محول هوائي \ كهربائي فصل إحدى المقاومات. ويتم ذلك على ثلاث أو أربع مراحل حتى يتم فصل جميع المقاومات وكما موضح بالمخطط أدناه.



مخطط رقم (2) يوضح طريقة فصل المقاومات الكهربائية

ويوجد نظام آخر لفصل المقاومات الكهربائية الداخلة في الدائرة الكهربائية للمحرك وزيادة سرعته مستخدم في توربينات سلزر S7 حيث يتم فصل المقاومات الكهربائية حسب جدول زمني معين موجود في جهاز السيطرة للتوربين معد لهذا الغرض .



شكل رقم (3) يمثل منظومة بادئ الحركة تعمل بالغاز و الهواء المضغوط

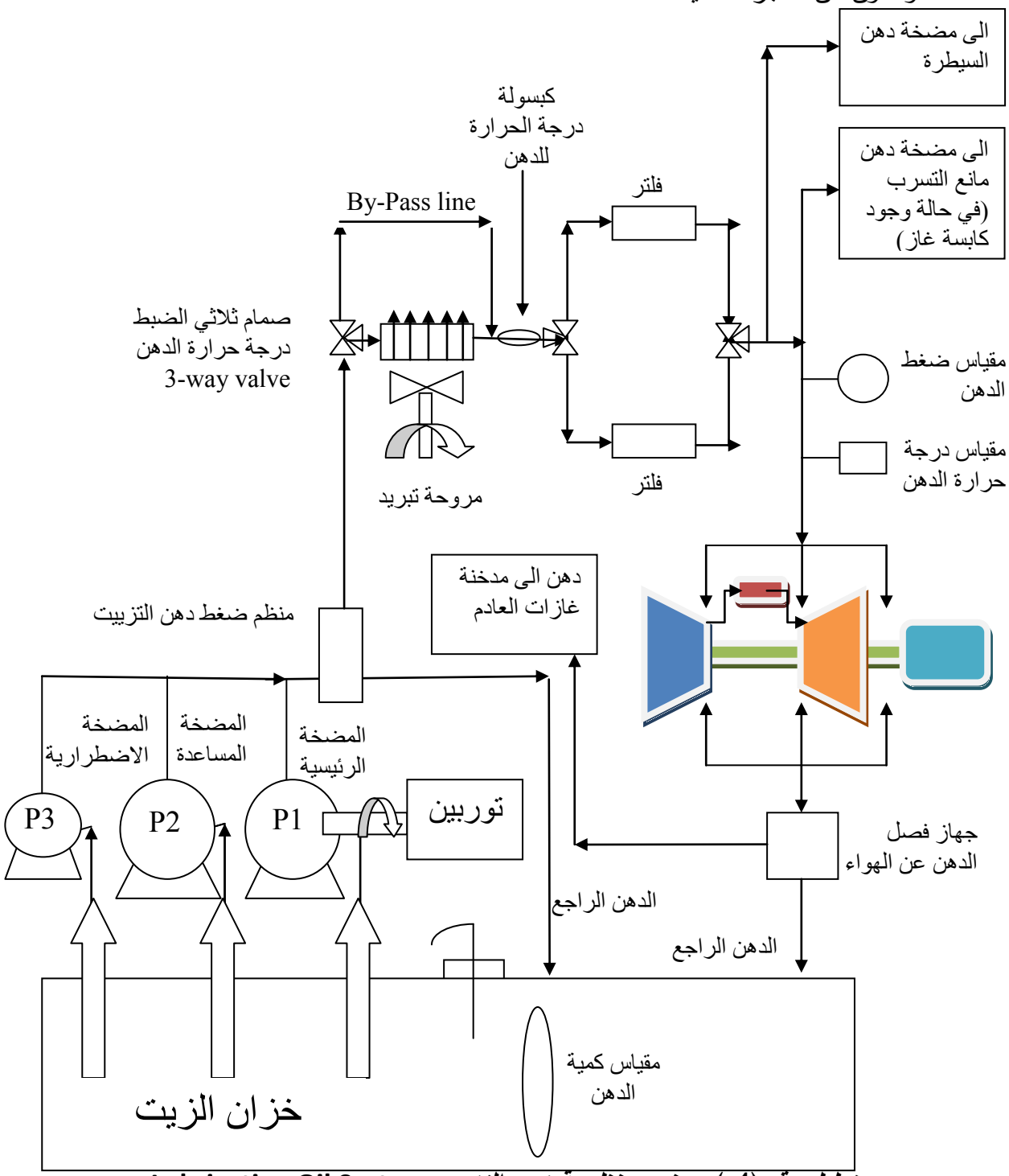
3. منظومة زيت التزييت (Lubricating Oil System)

*** تعريف المنظومة:**

هي المنظومة المسؤولة عن تزييت كافة محامل التوربين الغازي وماكنة الحمل وصندوق التروس منذ لحظة بدء تشغيل التوربين Starting وأثناء فترة تشغيله working distance وبعد إيقافه Shut Down لساعات عديدة لحين وصول درجة حرارة أمنة بحدود 30 درجة مئوية لا تسبب ضررا للمعدن الأبيض white metal لهذه المحامل .

*** مكونات المنظومة:-**

وتتكون من الأجزاء التالية :-



مخطط رقم (4) يوضح منظومة زيت التزييت Lubricating Oil System

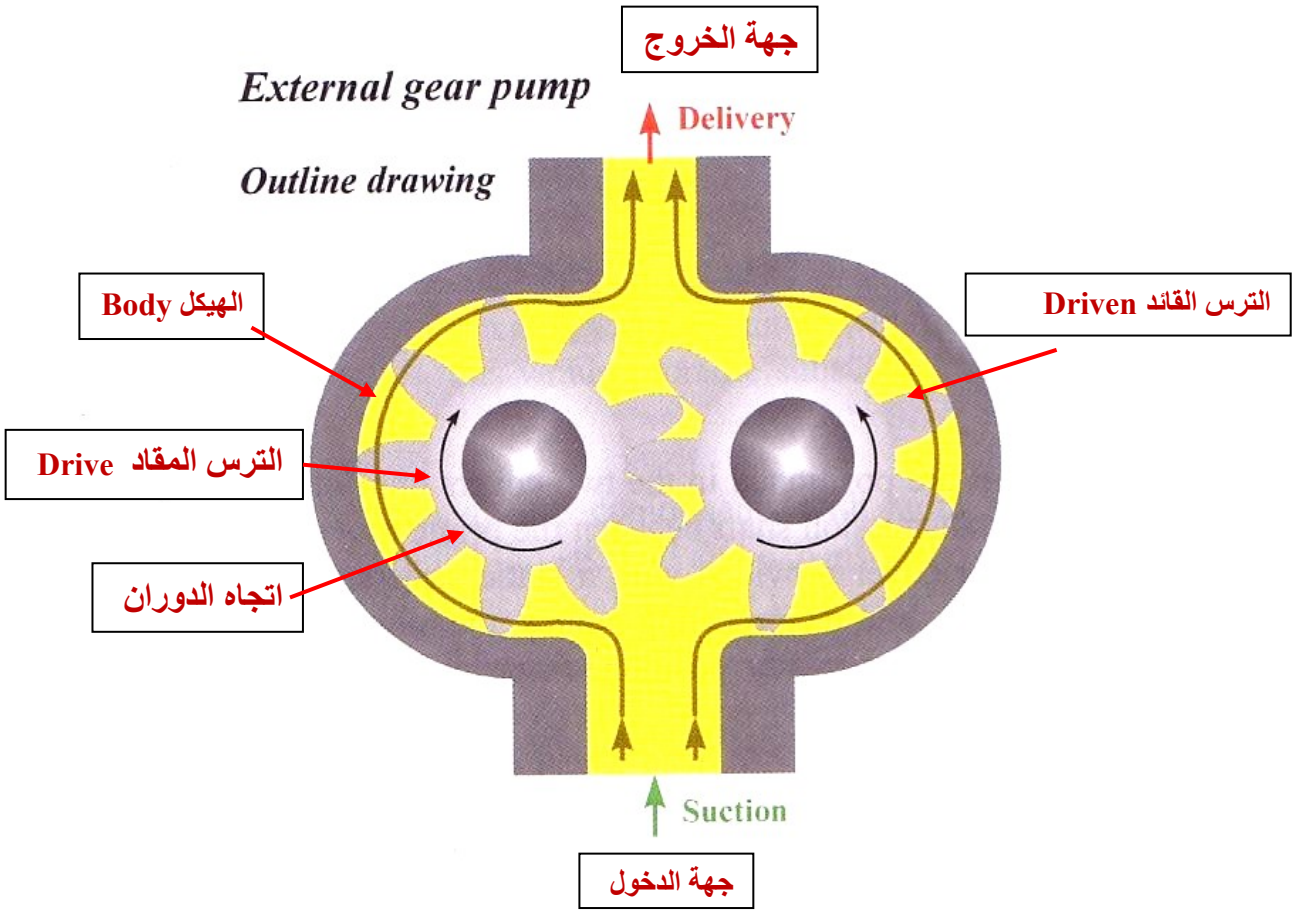
ملاحظة :- توجد بعض المنظومات التي تعمل بالوقود السائل وتحتاج إلى منفث(Nozzle) وهيترات لتقليل اللزوجة .

أ. خزان الدهن Oil Reservoir :-

ويكون جزء من قاعدة التوربين ويحتوي على كمية كافية من دهن التوربينات الخاص مثلا Turbine Oil 200 .

- المضخة الرئيسة Main Oil Pump:-

وهي مضخة ميكانيكية تدار من صندوق التروس الرئيسي أو المساعد بواسطة وصلة رابطة مرنة Flexible Coupling بينهما. وهذه المضخة من نوع الترس الدوار Rotary Gear Pump حيث يوجد فيها ترسين Two Gears كل منهما مركب على محور دوار Rotor محمول على محملين من نوع البوشة Bush Bearing أو محملين من النوع الكروي Ball Bearing. وأثناء دوران هذين الترسين على بعضهما البعض يسحبان دهن التزييت من فتحة سحب المضخة ويدفعانه خلال فتحة الخروج. وتعمل هذه المضخة منذ لحظة دوران التوربين إلى لحظة إيقافه. وعلية فإننا نحتاج إلى مضخة كهربائية لا تعتمد على دوران التوربين لتزييت المحامل قبل بدأ دوران التوربين وبعد توقف دورانه. وهذه المضخة هي المضخة المساعدة .



شكل رقم (5) يوضح المضخة الرئيسية لدهن التزييت من نوع المضخات الدوارة الترسية Rotary Gear Pumps

- المضخة المساعدة Stand By or Auxiliary Lube Oil Pump :-

وهي من المضخات الكهربائية تعمل على التيار المتناوب .A.C قبل دوران التوربين وبعد توقفه وذلك لضمان استمرار دوران دهن التزييت في المحامل حيث توجد طاقة حرارية هائلة مخزونة في جسم التوربين. وفي نفس لحظة توقف المضخة الرئيسية فان الحرارة المخزونة تتسبب في ارتفاع درجة حرارة المحامل وتلف المعدن الأبيض للمحامل Bearing white metal إذا لم تعمل المضخة المساعدة.

علما إن دوران الدهن بواسطة المضخة المساعدة يمنع حصول هذا التلف، حيث يقوم الدهن بتبريد المحامل، علما إن حجم وشكل هذا النوع من المضخات يشبه المضخات الرئيسية.

- المضخة الاضطرارية Emergency Lube Oil Pump:-

وهي مضخة كهربائية تعمل على التيار المستمر .D.C من بطاريات مشحونة مسبقا، وفي حالة فشل المضخة المساعدة على العمل لأي سبب كان ولحماية محامل التوربين من التلف سوف تعمل هذه المضخة، وهذه المضخة اصغر حجما من المضخة الرئيسية لأنها تجهز محامل التوربين فقط.

ت.مبردة دهن التزييت Oil Cooler :-

وهي مبادلة حرارية ذات أنابيب مزعنفة Finned Tubes يمر بها الدهن ويمرر خارجها تيار ضخم من الهواء بواسطة مراوح محورية Axial Fans وبذلك يفقد الدهن الحرارة التي اكتسبها أثناء مروره بالتوربين ومحامله ويبرد ليصبح صالحا للمرور بالمحامل مرة أخرى .

ث.صمام حراري ثلاثي الاتجاه Three Way Valve Thermometer:-

وهو صمام مثبت على أنبوب الدهن المار بمبردة دهن التزييت يتحكم فيه منظم درجة الحرارة Thermostat ويتحرك

هذا الصمام لإمرار قسم من دهن التزييت من المضخات إلى المحامل دون المرور بالمبردة عندما تكون درجة حرارة الدهن اقل من 50 درجة مئوية .

ج.مرشحة ثنائية Dual Filters :-

وهما مرشحتان متناظرتان لتنظيف الزيت من الأوساخ وقبلهما يوجد صمام ثلاثي واجبه توجيه الزيت إلى احد الصمامين ويغلق الصمام الأخر وذلك لغرض القيام بعملية تنظيفه . ومن احد هذين المرشحين يتوزع زيت التزييت لثلاثة أغراض هي:

- تزييت محامل التوربين ومحامل ماكنة الحمل ومحامل صندوق التروس الموجود بينهما . وهو الواجب الرئيسي لهذه المنظومة .
- تزويد مضخة زيت الإحكام (منع التسرب) Seal Oil Booster Pump لكابسات الغاز فقط .
- تزويد الزيت لنظام السيطرة Control Or Servo وذلك بعد رفع ضغط زيت التزييت بواسطة مضخة إلى مستوى ضغط زيت السيطرة أو زيت السر فو Seal Oil.

ح.صمام تنظيم ضغط زيت التزييت :-

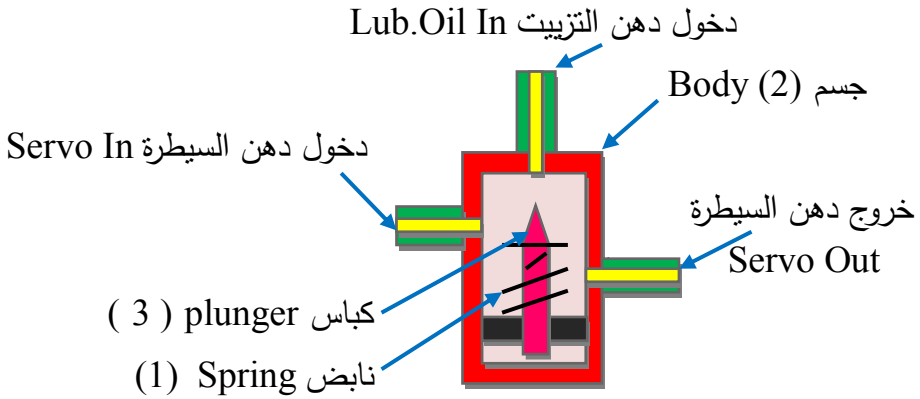
وهو صمام يوضع على أنبوب تصريف الزيت Discharge Pipe في المضخات لغرض تحديد مقدار ضغط الزيت. وبداخلة مكبس وضغوط بنابض Spring Leaded Piston ويمكن زيادة شد النابض أو تقليله بواسطة تدوير برغي مسنن يستعمل لغرض تعيين مقدار الضغط المطلوب . ويضغط الزيت المتدفق من المضخة على المكبس لغرض الخروج مـن الصمام .

خ.الأزرار الكهربائية للحماية ضد درجات الحرارة العالية High Lubricating Oil Temp. Safety Switch :-

وهذه الأزرار الكهربائية مرتبطة بكبسولة حرارية Temp. Capsule موضوعة في مجرى زيت التزييت وعند ارتفاع درجة حرارة الزيت إلى حد معين مثلا 95 درجة مئوية فأن احد الأزرار يغلق الدائرة الكهربائية لكي تعطي إنذارا ضوئيا وصوتيا لتنبيه المشغل لارتفاع درجة حرارة الزيت لحد غير معقول لكـي يسرع باتخاذ الإجراءات اللازمة لتلافي الخطأ فـان درجة الحرارة تستمر بالارتفاع وعندما تصل إلـى مثلا 99 درجة مئوية فان الزر الكهربائي الثاني سيغلق دائرة كهربائية ثانية تؤدي إلـى إيقاف التوربين اضطراريا وظهور علامـة توقف التوربين بسبب ارتفاع درجة حـرارة زيت التزييت على لوحة السيطرة .

ر.جهاز الحماية ضد انخفاض ضغط زيت التزييت :-

وهذا الجهاز هو عبارة عن صمام مرتبط بمنظومة زيت التزييت ويسبب إيقافا اضطراريا للتوربين في حالة انخفاض ضغط الزيت دون (13 باوند/ عقدة مربعة)،($0.914kg/cm^2$). ويضغط زيت التزييت على الكابس (3) الذي ينزل دافعا النابض (1) مانعا دهن السر فو Seal Oil من المرور خلال الصمام في حالة الاشتغال الاعتيادي. وحال انخفاض ضغط الزيت يرتفع الكابس ويمر زيت السر فو من خلال الصمام فينخفض ضغط زيت السر فو ويغلق صمام غلق الوقود Fuel Shut – Off Valve فيتوقف التوربين عن العمل وذلك حماية لمحامل التوربين والماكنة الدوارة من التلف .



مخطط رقم (6) يوضح صمام إيقاف التوربين عند انخفاض ضغط دهن التزييت

4. منظومة تجهيز الوقود (Fuel System)

1. أنواع الوقود :-

وتستخدم هذه المنظومة الوقود السائل كالنفط الخام والكازويل والكيروسين. ولكن معظم التوربينات الصناعية تستخدم الوقود الغازي المتوفر في حقول النفط الخام وهو خليط من غازات هيدروكاربونية مثل (البروبان،البيوتان،الميثان) وغاز المصافي أو غاز الفحم، ويتميز الوقود الغازي بالخواص التالية :-

أ. الخواص الفيزياوية :-

- القيمة الحرارية السفلى للوقود L.H.V. (Lower Heat Value) بحدود 2800Kcal/N.m^3.min ومقدار السماح للتغير في هذه القيمة هو بحدود L.H.V.+1%max.
- لا تزيد الشوائب فيه على 30ppm .

ملاحظة:- (ppm) مختصر للعبارة التالية (Part per million) (جزء من مليون).

ب. الخواص الكيماوية :-

- المواد القلوية (Alkaline Metals) الموجودة في الوقود مثل (Na,K,Li) لا تزيد على 5ppm .
- لا تزيد نسبة الكبريت فيه على 30ppm .

ملاحظة:- (ppm) مختصر للعبارة التالية (Part per million) (جزء من مليون).

2. أجزاء وعمل منظومة الوقود الغازي :-

وسنقوم بوصف عمل وأجزاء منظومة الوقود الغازي والتي تشبه كثيرا منظومة الوقود السائل نظرا لكونها مستعملة في معظم التوربينات الصناعية. وتتكون من الأجزاء التالية حيث يدخل الغاز بضغط بحدود 10 جو إلى الأجزاء التالية :-

1 -صمام غلق يدوي manual shut off valve

2 -منظم ضغط الغاز pressure regulator:-

يثبت على خط غاز اللهبة الرئيسية ويوجد صمام أخر يثبت على خط غاز اللهبة الرائدة ويكون من جزئين (منظم رئيسي ومنظم صغير) المنظم الرئيسي يوضع بين مصدر تجهيز الغاز وبين منظومة الغاز الرئيسية وبين قبة المنظم الرئيسي وبتدوير عتلة على المنظم الصغير سوف يتغير ضغط الغاز المسلط على قمة المنظم الرئيسي وبهذا يتحدد ضغط الغاز الخارج من المنظم الرئيسي.

3 -مزيل السوائل gas demister:-

هو جهاز يستخدم لإزالة السوائل من الغاز مثبت في بداية منظومة الوقود حيث يمر السائل المحمول بتيار الغاز مع كتل الأوساخ الثقيلة في أنبوب تجهيز الغاز ويكون على شكل قطرات فيدخل الغاز مزيل السوائل عند الغرفة السفلية ومن خلال مرشحة ينتقل من الغرفة السفلية الى الغطاء العلوي تاركا السوائل في الأسفل ويخرج الغاز الى الأعلى نظيف وعندما يصل مستوى السائل الى مستوى فتحة الخروج يجري الى مصيدة ثم ينضح الى الخارج ،هذا الجهاز يسبب إيقاف التوربين عند ازدياد النسبة عن الحد المقرر حيث يصبح الجهاز غير قادر على ازالة هذه السوائل في الغاز.

4 -مرشحة الوقود fuel filter:-

وتستخدم لإزالة الأوساخ من الوقود قبل دخول الوقود للمنظومة

5 -صمام غلق ذاتي station servo:

يكون هذا الصمام مغلقا في بداية التشغيل ويفتح ذاتيا عند اللحظة المناسبة لتشغيل التوربين

6 -جهاز معايرة ضغط الوقود مع نسبة الهواء\ سرعة للضاغطة المحورية:-

يزداد ضغط الوقود تدريجيا مع كميته بطريقة مناسبة لزيادة سرعة وضغط الهواء الخارج من الضاغطة وذلك منعا لارتفاع درجة حرارة الغازات (T_{3max}) وبصورة مفاجئة ويسمى هذا الجهاز اسماء مختلفة حسب الشركات مثل (Servo Reg. Valve)

7 -جهاز معايرة بين كمية الغاز مع سرعة التوربين والحمل:-

وله تسميات مختلفة حسب الشركات ((Variable Control Electronic Valve (VCE) ويزيد هذا الجهاز او ينقص من كمية الوقود الغازي حسب زيادة او نقصان ضغط (Servo oil) او حسب زيادة او نقصان اشارة الفولتية من جهاز السيطرة والتي تتغير حسب سرعة التوربين والحمل.

8 -صمام حاكم الوقود(Governor Full Valve):-

وهو صمام يتحرك من اجل زيادة او تقليل كمية الوقود وحسب حركة تأتي له من منظم السرعة حيث يتصل بمنظومة ميكانيكية (عن طريق عتلة) او منظومة هيدروليكية للمحافظة على سرعة التوربين ثابتة بغض النظر عن زيادة او نقصان الحمل.

9 -صمام غلق ذاتي ثاني servo-shut off valve:-

مهمة هذا الصمام غلق خط الوقود وايقاف التوربين بسرعة عند حدوث حالة تستدعي ذلك (انخفاض ضغط زيت التزييت او ارتفاع درجة الحرارة)

10 -صمام غلق يدوي للحالات الاضطرارية emergency manual shut off valve:-

يستخدم هذا الصمام لغلق خط الوقود يدويا من قبل المشغل في حالة حدوث حالة اضطرارية

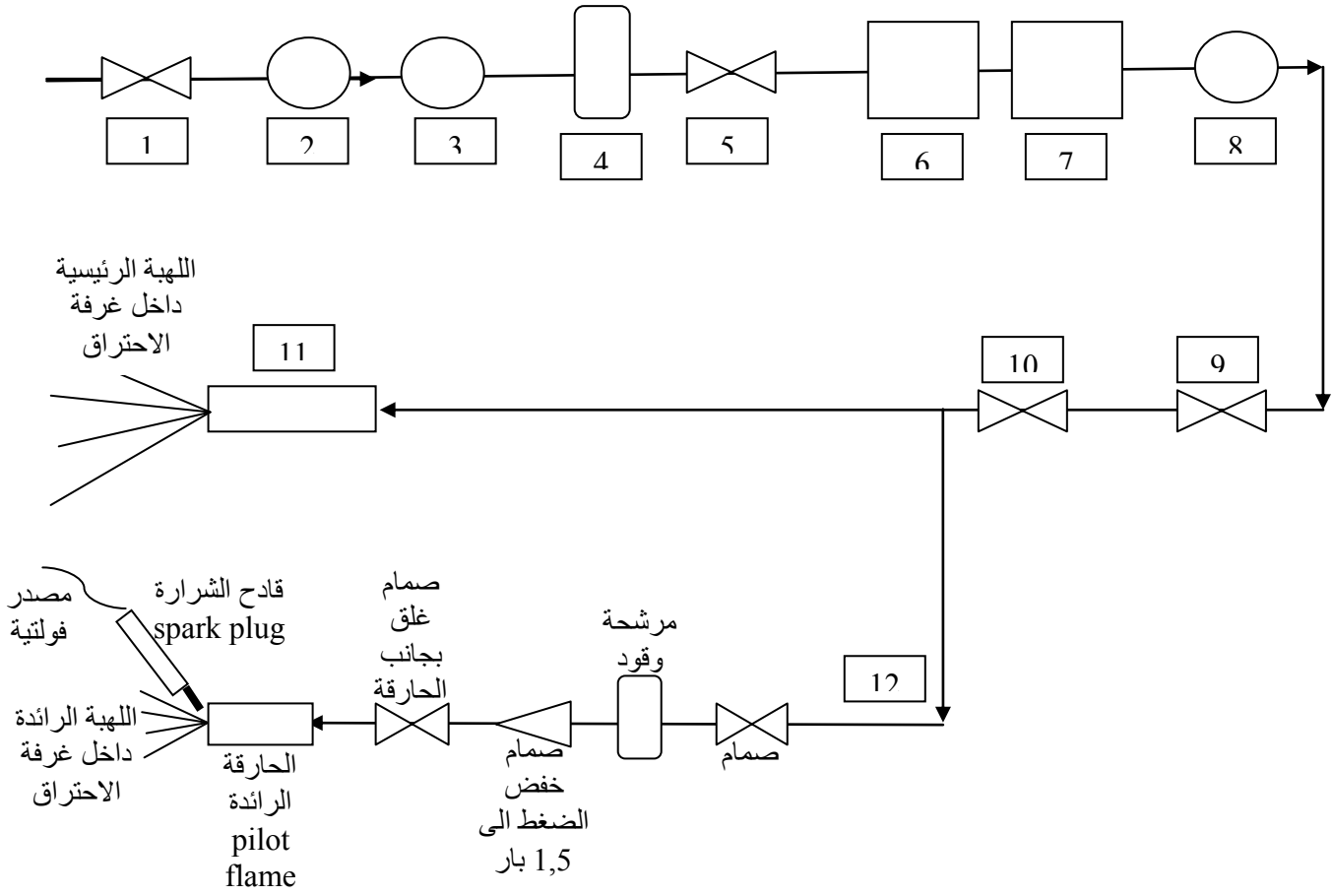
11 -الحارق الرئيسي main fuel burner:-

وهو الذي يجهز اللهبة الرئيسية بالوقود بداخل جدار حاوية اللهب في غرفة الاحتراق

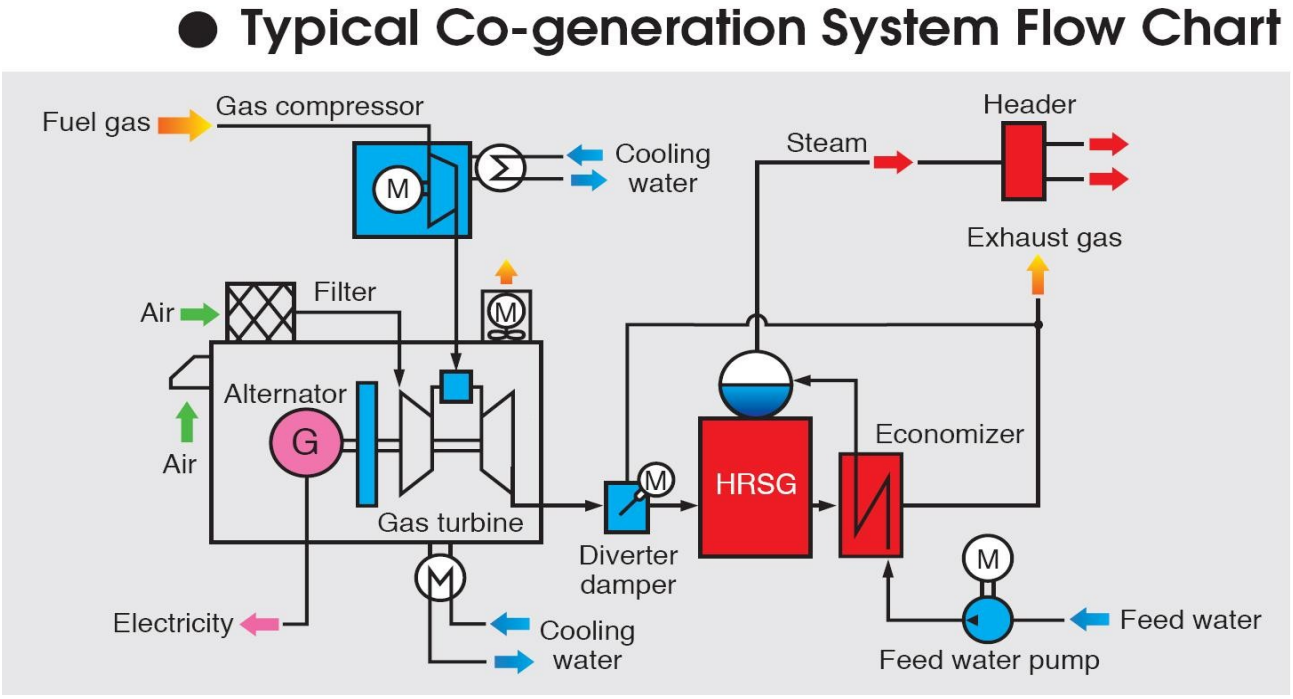
12 -خط وقود فرعي (اللهبة الرائدة):-

وهو خط يتفرع من خط الغاز ويحتوي على أ- صمام يدوي ب- مرشحة وقود ج- صمام تخفيض ضغط حتى 0,5 كيلو غرام على السنتيمتر المربع($0.5\ kg/cm^2$) د- صمام الغلق الذاتي هـ- حارق صغير بجانب شمعة القدح لانتاج اللهبة الرائدة .عندما تُرى بالعين السحرية هذه اللهبة يفتح صمام الوقود في الخط الرئيسي الى حارق الوقود الرئيسي لانتاج اللهبة الرئيسية

وفيما يلي مخطط توضيحي لهذه المنظومة :-



مخطط رقم (7) يوضح منظومة تجهيز الوقود لتوربين غازي Gas Fuel System



مخطط رقم (8) يمثل منظومة الوقود

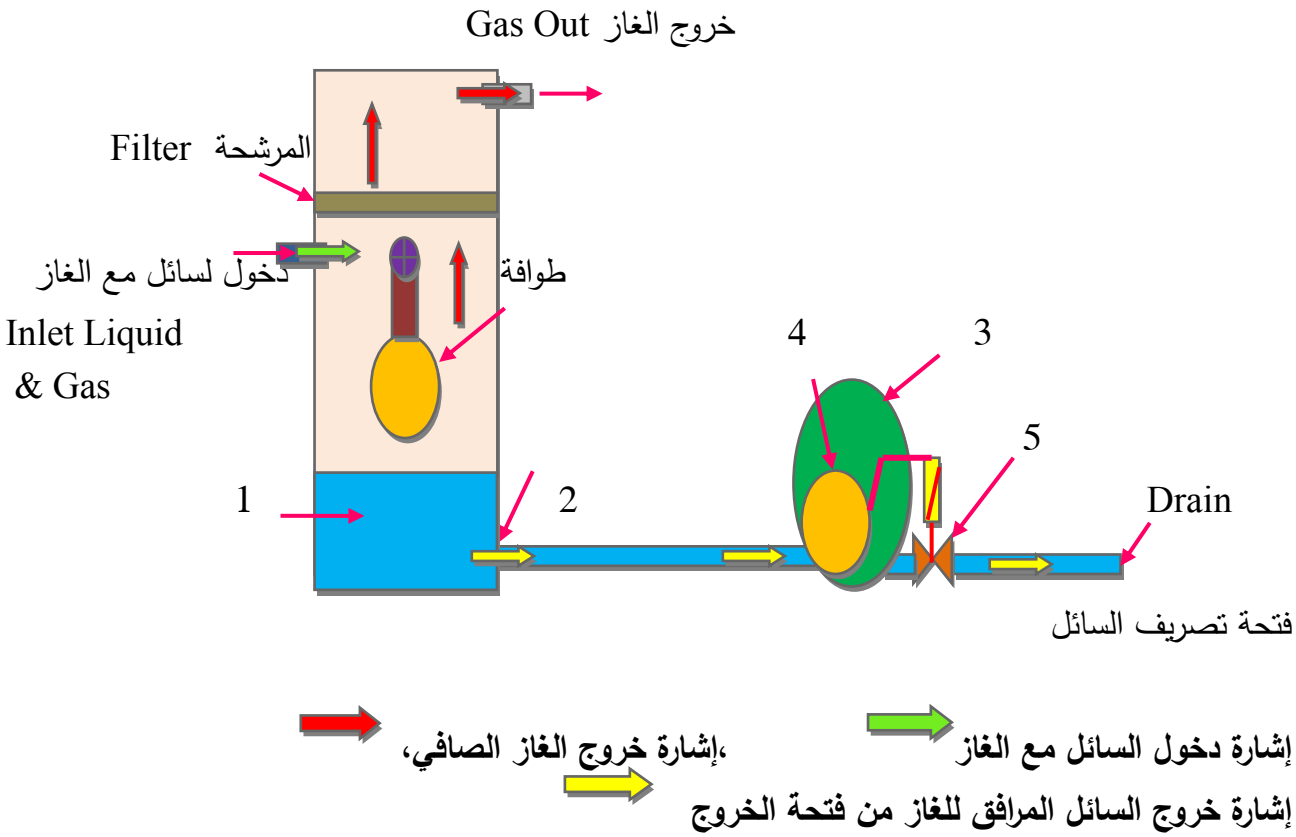
وصف لبعض الأجزاء الرئيسية في منظومة الوقود:-

أ. **إزالة السوائل Liquid Removal:-**

وهذا الجهاز كما هـو موضح أدناه مثبت في بداية المنظومة لإزالة السائل المحمول بتيار الغاز أو كتل أوساخ ثقيلة في أنبوب تجهيز الغاز أو على شكل قطرات محمولة بالغاز.

يدخل الغاز مزيلة الغاز من غرفتها السفلى ويمر من غرفة الطوافة المفتوحة إلى الغرفة العلوية ومن ثم يمر بالمرشحة إلى الغطاء العلوي والذي منه يترك الغاز مزيلة السوائل بشكل غاز نظيف جاف.

وفـي حالة وجود سوائل محمولة بتيار الغاز فسيجري السائل إلـى الغرفة السفلية (1) Lower Chamber وعندما يصل مستوى السائل فتحة الخروج (2) Outlet ومن ثم إلى الطوافة (3) فسوف يجري إلى الفخ Trap مسببا دفـع الطوافة (4) وبعدها يرفـع ويفتح لصمام (5) وسوف ينضح السائل بعد ذلك إلـى الخارج عن طريق فتحة تصريف السائل Drain بواسطة ضغط الغاز.

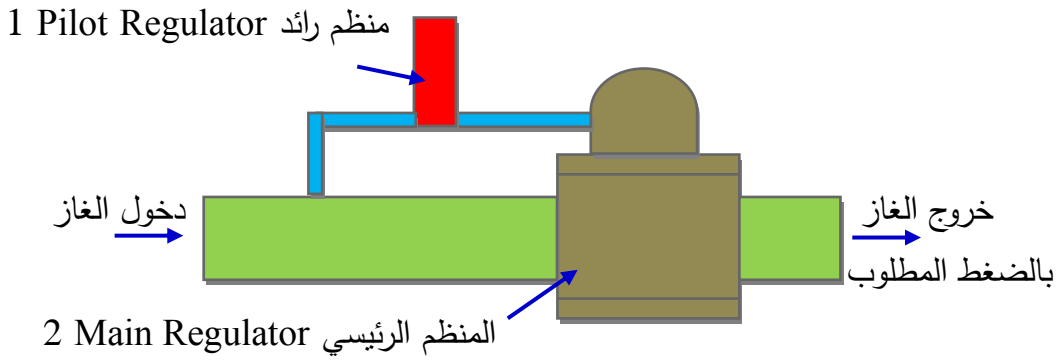


مخطط رقم (9) يوضح جهاز مبسط لمزيل السوائل

ب. **منظم ضغط الوقود Fuel Pressure Regulator :-**

ويثبت هذا المنظم في خط الغاز للهبة الرئيسية وأخر في خط الغاز للهبة الصغيرة الرائدة . ويتم تنظيم ضغط الغاز الرئيسي باستخدام منظم ذو جزئين، المنظم الرئيسي ومنظم صغيركما في المخطط أدناه :-

ويوضع المنظم الرئيسي Main Regulator(2) بين مصدر تجهيز الغاز وبين منظومة الوقود بينما يوضع المنظم الصغير Pilot Regulator (1) على خط غاز صغير بين خط الغاز الرئيسي وبين قبة المنظم الرئيسي (2) ، ويمكن بواسطة تدوير عتلة على المنظم الصغير من تغير ضغط الغاز المسلط على قبة المنظم الرئيسي. وهذا يحدد ضغط الغاز الخارج من المنظم الرئيسي.



مخطط رقم (10) يوضح منظم ضغط الوقود المبسط Fuel Pressure Regulator

طريقة التشغيل هي كما يلي:-

- **الصمام الرئيسي:-**

يعتبر الصمام في وضع الغلق عندما يكون مضغوطا بواسطة النابض. ولغرض فتح الصمام وجريان الغاز خلال المنظم الرئيسي فان الغرفة يجب أن تتعرض لضغط أعلى من مجموع قوى نابض الصمام زائدا الضغط المسلط من تحت رأس الصمام، وحالما يفتح الصمام فان أية زيادة في ضغط الغرفة فوق ما مطلوب لفتح الصمام هو مساوي تماما للضغط المطلوب الخارج من الصمام الرئيسي.

- **المنظم الصغير:-**

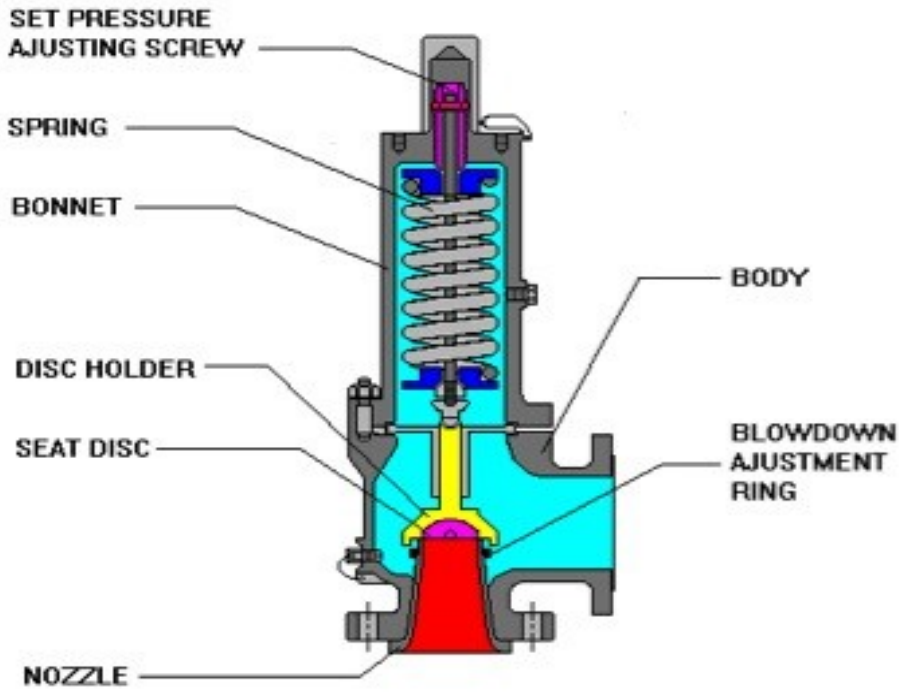
إن تدوير عتلة السيطرة باتجاه عقرب الساعة يضغط على النابض الذي يقوم بالضغط على الغشاء الجلدي، وهذا يجبر صمام الدخول بعيدا عن مقعدة مسببا دخول ضغط الغاز إلى غرفة الغشاء الجلدي وخط خروج الغاز وعندما يضغط هذا الغاز على الغشاء الجلدي منتجا قوة تساوي قوة شد النابض، عندها يرتفع الغشاء الجلدي غالقا خط الدخول.

ت. **حارقة الوقود (غاز)،Burner Fuel (Gas) :-**

تشبه حارقة الوقود السائل إلا إنها اقل تعقيدا منها حيث لا يحتاج الوقود الغازي إلى عملية ترذيذ جزيئاته لغرض خلطه مـع الهواء.وتتألف الحارقة من أنبوب فولاذي مركب في نهاية غطاء مثقب ويدخل هذا الأنبوب بداخل أنبوب أخر مثبت فـي نهاية غرفـة الاحتراق ويثبت فيه بواسطة الصامولة ويدخل الوقـود الغازي من منظومة الوقود إلـى داخل ثقب الأنبوب الفولاذي ومنـه يخرج خلال الثقوب المنتشرة حـول محيـط الغطاء المثقب ليختلط مع تيار الهواء الرئيسي Primary Air الخارج من الريش الملتوية Twisted Blades المثبتة فـي مقدمـة حاوية اللهب. وعندما يختلط الغاز مع الهواء خلطا جيدا يسبب الحركة الدورانية التي يكسبها الهواء أثناء مـروره بين الريش الملتوية ليحترقان بنار اللهبة الرئيسية الراجعة وتستمر عملية الاشتعال Combustion.

ث. **صمام الأمان بالتنفيس Safety Relief Valve :-**

وهو صمام يوضع في خط غاز الوقود عادة بعد صمام تنظيم ضغط الغاز. مهمته فتح خط تنفيس الغاز عند زيادة الضغط عن الحد المقرر. ويمكن زيادة أو نقصان هذا الحد أي تعيير الصمام بواسطة تدوير عمود دوران الصمام



ج. **صمام الغاز المتصل بحاكم السرعة Speed Governor With Joint Gas Valve:-**

وهو صمام في خط غاز الوقود إلى الحارقة ويعمل كفتحة متغيرة القطر للتحكم في كمية الغاز المجهز للحارقة. ويتغير قطر الفتحة حسب حركة العتلة التي تربط هذا الصمام بحاكم السرعة. وتتحرك هذه العتلة حسب زيادة أو نقصان سرعة التوربين. يدخل الغاز من فتحة الدخول العمودية ويمر عبر فتحات الدخول ومن ثم يدخل إلى غرفة الاستلام ومنها يجري الغاز إلى فتحة الخروج أي إلى الحارقة.

وعندما يكون التوربين يعمل فان ضبط كمية جريان الغاز إلى الحارقة تكون بواسطة ضبط حركة العتلة والتي بحركتها تكشف أو تغطي جزئيا فتحات الدخول التي يمر منها الغاز فتزداد أو تقل كميته تبعا لذلك. إن أي تغير في سرعة التوربين تؤدي إلـى حركـة العتلة الرابطة بين حاكم السرعة والصمام لكشف أو تغطية فتحات الدخـول بحيث تعود السرعة إلـى مقدارها الأصلي.

ح. **صمام الغلق الذاتي المشغل بدهن السيطرة Servo – Operated Fuel Shut – Off Valve :-**

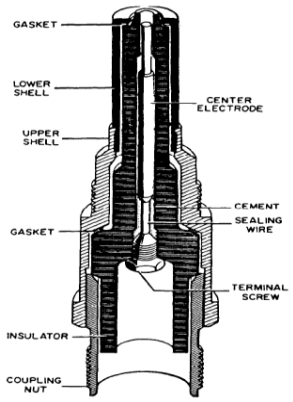
هو الصمام يعمل لغلق خط غاز الوقود ذاتيا عندما ينخفض ضغط دهن السيطرة Servo Oil بسبب حدوث أي طارئ يؤدي إلـى عمل احد أجهزة السيطرة مثل جهاز السيطرة على ارتفاع درجة حرارة دهن التزييت أو جهاز انخفاض ضغط دهن التزييت. ويتألف الجهاز من جزئين، جزء مرور غاز الوقود وجزء دهن السيطرة فالجزء العلوي من الجهاز أو جزء مرور غاز الوقود يشمل وصلات ربط دخول الغاز وخروجه والجزء السفلي من الصمام وفيه نابض يجعل الصمام في وضع الغلق.

والجزء السفلي أو الجزء الخاص بدهن السيطرة له فتحة اتصال واحدة بخط دهن السيطرة حيث يحيط الدهن بالمنفاخ المعدني Operating Bellows، وعندما يسلط دهن السيطرة على المنفاخ المعدني فسوف يعمل على تقليصه عاملا على فتح صمام غاز الوقود الذي يجري إلى الحارقة.

خ. **جهاز إشعال الشرارة SPARK IGNITER SYSTEM (نوع الغاز):-**

جهاز الإشعال عبارة عن حارقة صغيرة Burner مع قادح شرارة Spark Plug موضوعان معـا ويعملان كحارقة رائدة للحارقة الرئيسية Main Burner ، فـان المشعل يتكون مـن قبة مشفهة Flanged Dome مثبتة علـى الغطاء الخارجي لغرفة الاحتراق ومـن قادح شرارة Spark Plug وتوصيلة دخـول الغاز Gas Connection وقـادح الشرارة وتوصيلة دخول الغاز مثبتان في الغرفة بزاوية حادة بينهما.

وتحتوي توصيلة دخول الغاز على فتحة تدفق Orifice Plate ويدخل الغاز بزاوية بحيث يكون موجها على قادح الشرارة وعند عملية بـدء تشغيل التوربين يجهز قـادح الشرارة بفولتية عالية مـن وحدة إشعال (كمحولة فولتية مثلا) فحالما يدخل الغاز فانه يحترق بنفس اللحظة مكونا اللهبة الرائدة الصغيرة Pilot Flame .



SPARK IGNITER SYSTEM

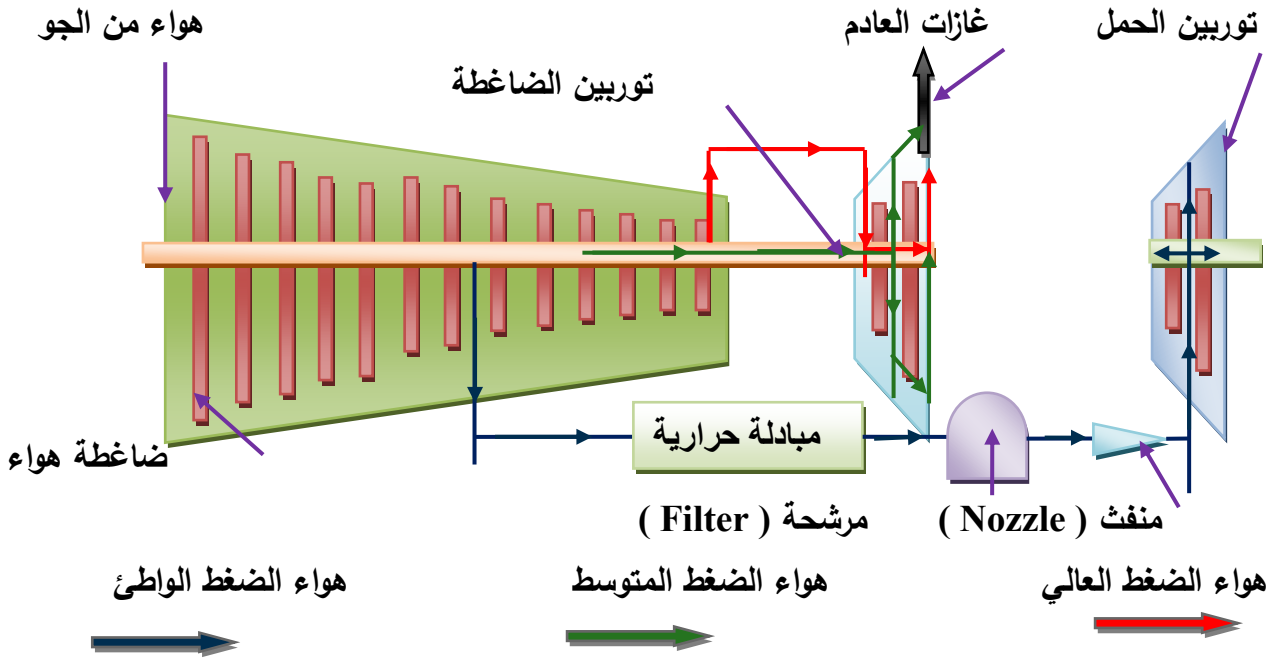
شكل رقم (12) يمثل نظام حرق الوقود

5. منظومة الهواء(Air System)

ويستخدم الهواء في التوربين الغازي لغرضين هما أولا التبريد Cooling وثانيا العزل Sealing وهي عملية عزل دهن التزييت عن الغازات الساخنة للتوربين.

أولا: التبريد Cooling:-

إن الهواء يستخدم لإغراض التبريد في التوربين كليا ولو إن الماء يستخدم في بعض التوربينات لتبريد دهن التزييت بواسطة مبادلات حرارية. وبالإضافة إلى إن الهواء يستخدم في تبريد الأجزاء المهمة من التوربين ، فانه أيضا يستخدم في إحماء التوربين عند بداية التشغيل حيث إن درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغطة المحورية هي بحدود أكثر من 200 درجة مئوية وهي كافية لإحماء وتدفئة جسم التوربين تدريجيا إلى درجة حرارة تشغيله المستقرة Stable Working Temperature دون تعريضه إلى اجهادات حرارية Thermal Stresses وتستخدم ثلاثة مستويات من الضغوط لإغراض تبريد أجزاء مختلفة من التوربين وهي الضغط العالي والضغط المتوسط والضغط الواطئ والتي تؤخذ من مراحل مختلفة من الضاغطة المحورية وكما موضح بالمخطط أدناه :-



مخطط رقم (13) يوضح توزيع منظومة التبريد للضاغطة المحورية

أ. **هواء الضغط العالي:-**

ويؤخذ من آخر مرحلة من مراحل الضاغطة المحورية ويمر من ثقوب في جسم التوربين إلى أن يصل إلى وجه القرص الدوار للمرحلة الأولى First Stage Rotary Disc لتوربين الضاغطة لتبريد وجه هذا القرص. وبعد تبريده إياه يختلط مع تيار الغازات الساخنة .

ب. **هواء الضغط المتوسط:-**

ويؤخذ من المرحلة العاشرة أو الثانية عشر من ضاغطة الهواء ويمرر خلال الثقب المركزي لمحور الدوران Garden Shaft إلى ما بين وجهي القرص الأول والثاني لمحور الدوران لتوربين الضاغطة لتبريد هذين الوجهين. ثم يختلط مـع تيار الغازات الساخنة.

ت. **هواء الضغط الواطئ:-**

ويؤخذ من المرحلة السابعة والثامنة من ضاغطة الهواء لإغراض تبريد الأقراص الدوارة والمحور الدوار لتوربين الحمل وكذلك لتبريد الغلاف الخارجي لتوربين الحمل والضاغطة. ويمرر الهواء في بعض التوربينات على مبردة هواء ومرشح ومضيقة Orifice قبل دخوله لتوربين الحمل.

ث. **تبريد الريش المتحركة والثابتة:-**

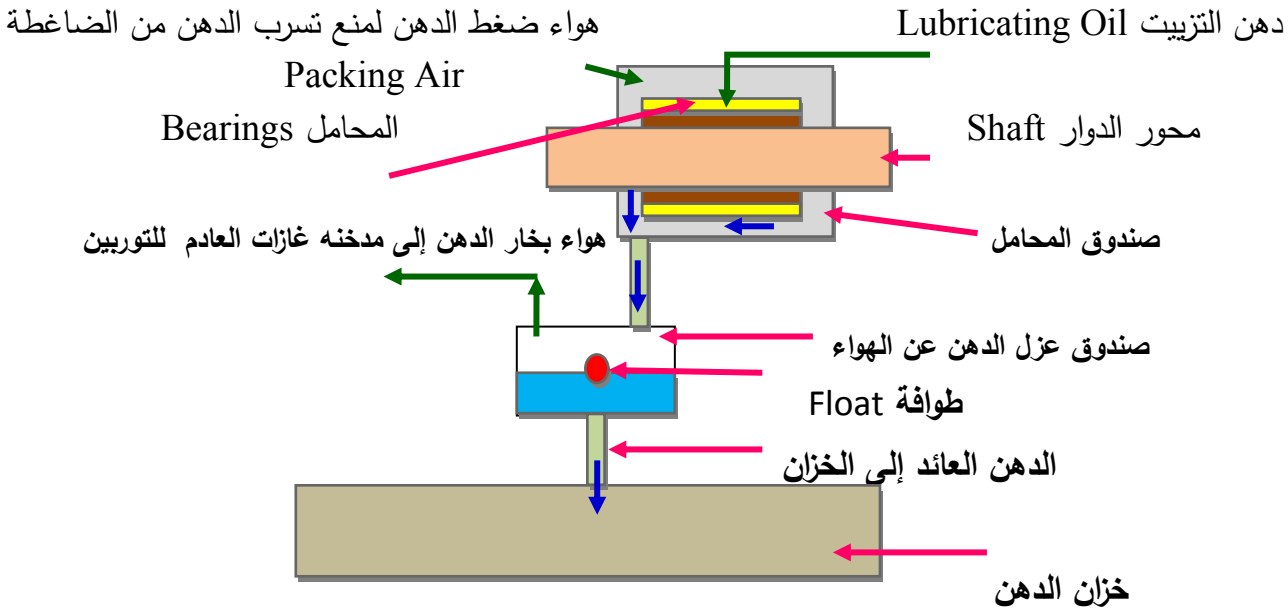
يؤخذ قسم من هواء المحور الدوار لتوربين الضاغطة ومن خلال ثقوب داخلية في قرصي المرحلة الأولى والثانية إلى جذور ريش المرحلتين حيث يدخل الفراغ الموجود داخل الريش لتبريدها ويخرج مـن ثقوب في سطوح الريش ليختلط بالنهاية مع الغازات الساخنة.

أما تبريد الريش الثابتة فيتم عن طريق هواء يؤخذ من إحدى المراحل الأولى أو الثانية ويدخل بأنبوب خاص إلى بدن توربين الضاغطة ومنة إلى جذر الريش الثابتة حيث يدخل في جوفها لتبريدها ثم يخرج من ثقوب في سطحها ويختلط مع تيارات الغازات الساخنة.

ثانيا: عزل الهواء لدهن التزييت عن غازات الاحتراق Gland Packing/Air Sealing :-

يمتاز التوربين عـن ماكنة الديزل والبنزين بعدم استهلاكه لدهن التزييت. ويعود ذلك للتصميم الفريد لغطاء محامل محور التوربين حيث إن قسما من الهواء المأخوذ من الضاغطة يؤخذ إلى محمل التوربين ويحيط بغلافه ويختلط مع دهن التزييت الخارج مـن المحمل. بعدها يؤخذ خليط الدهن والهواء إلـى جهاز لفصلهما ويعاد الدهن إلى الخزان بينما يذهب الهواء ليخرج مع غازات العادم وكما موضح بالمخطط التوضيحي التالي.

ويستهلك التوربين من الهواء لإغراض التبريد وعزل الدهن عندما يكون صمام الاستنزاف Blow – Off Valve مغلقا في حالة التشغيل الاعتيادي ما يعادل نسبة 1- 2% من هواء الضاغطة الكلي.

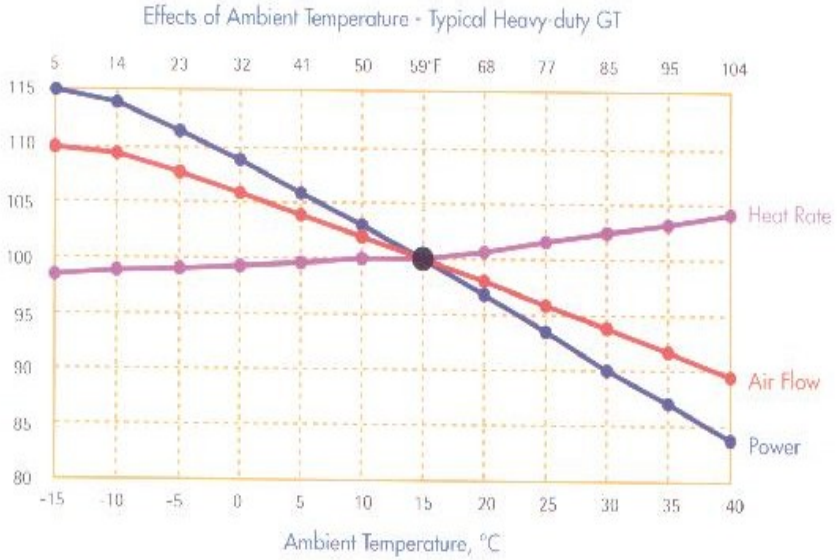


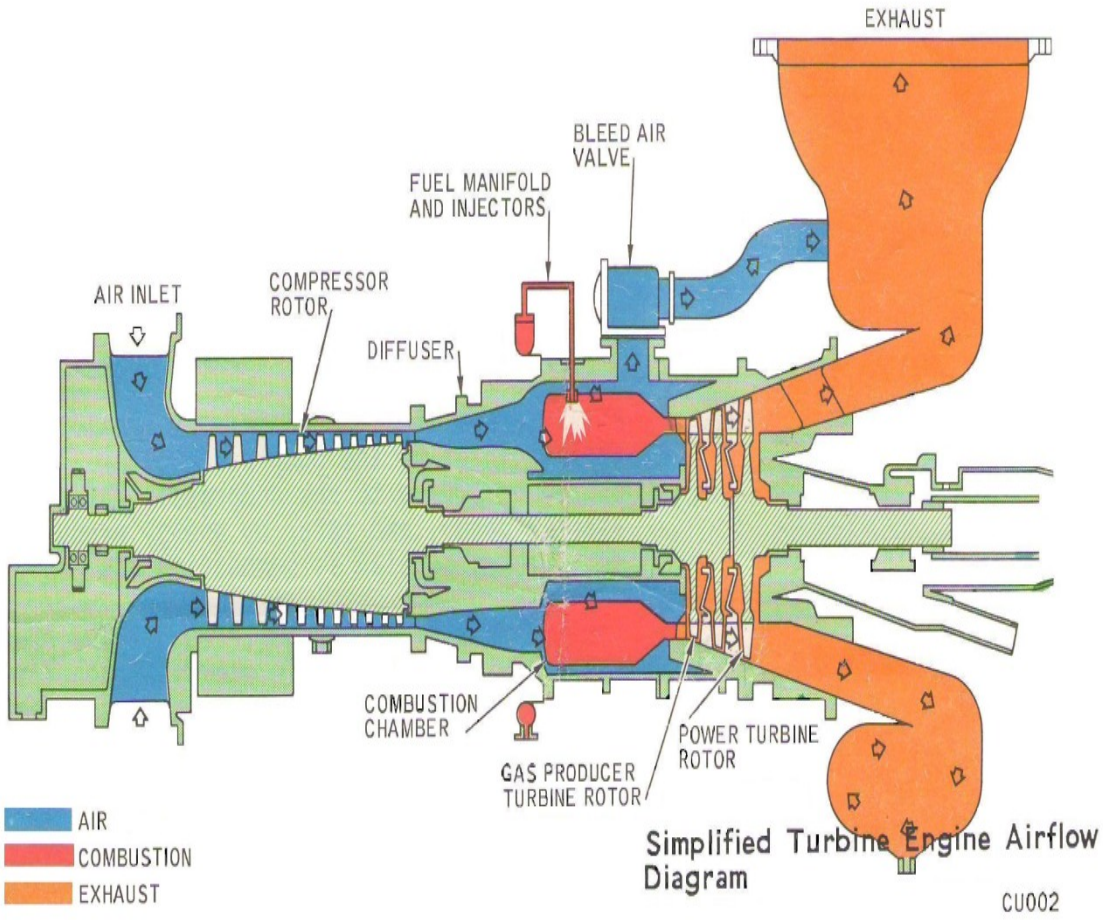
مخطط رقم (14) يوضح منظومة عزل دهن التزييت بواسطة الهواء

نظام تبريد هواء الدخول في التوربينات الغازية
GAS TURBINE INLET AIR FOGGING

كما هو معروف إن الطاقة المنتجة تنخفض كلما زادت درجة حرارة الجو كما هو حاصل في فصل الصيف والعكس صحيح . لذا فان هذا النظام يعتمد على تقليل درجة حرارة الهواء الداخل إلى ضاغطة الهواء وذلك بواسطة ضخ كمية من الماء البارد تقدر (11 درجة مئوية) في وجه الهواء الداخل بعد فلتر الهواء . وبذلك يتم تخفيض درجة حرارة الهواء قبل دخوله إلى الضاغطة ، ويساعد ذلك زيادة كفاءة وأداء عملية توليد الطاقة حيث تصل هذه الزيادة إلى حوالي (20 %). أي انه لو كان التوربين ينتج (60 ميغا وات) فانه بعد تركيب هذا النظام سوف يرتفع الإنتاج إلى حوالي (72 ميغا وات) بزيادة قدرها (12 ميغا وات) وهي زيادة معتبرة ومقبولة.

ويبين المخطط رقم (15) أدناه علاقة الطاقة وكمية الهواء و الحرارة مع درجة حرارة الجو :-





شكل رقم (19) يمثل مشبه جريان الهواء في مولد توربين

6. منظومة السيطرة (Control System)

تعريف نظام السيطرة وواجباته :-

إن منظومة السيطرة هي مجموعة المعدات والأجهزة وآلات القياس المرتبطة معها والتي تقوم بتأدية الواجبات التالية متكاملة وحسب التسلسل أدناه:-

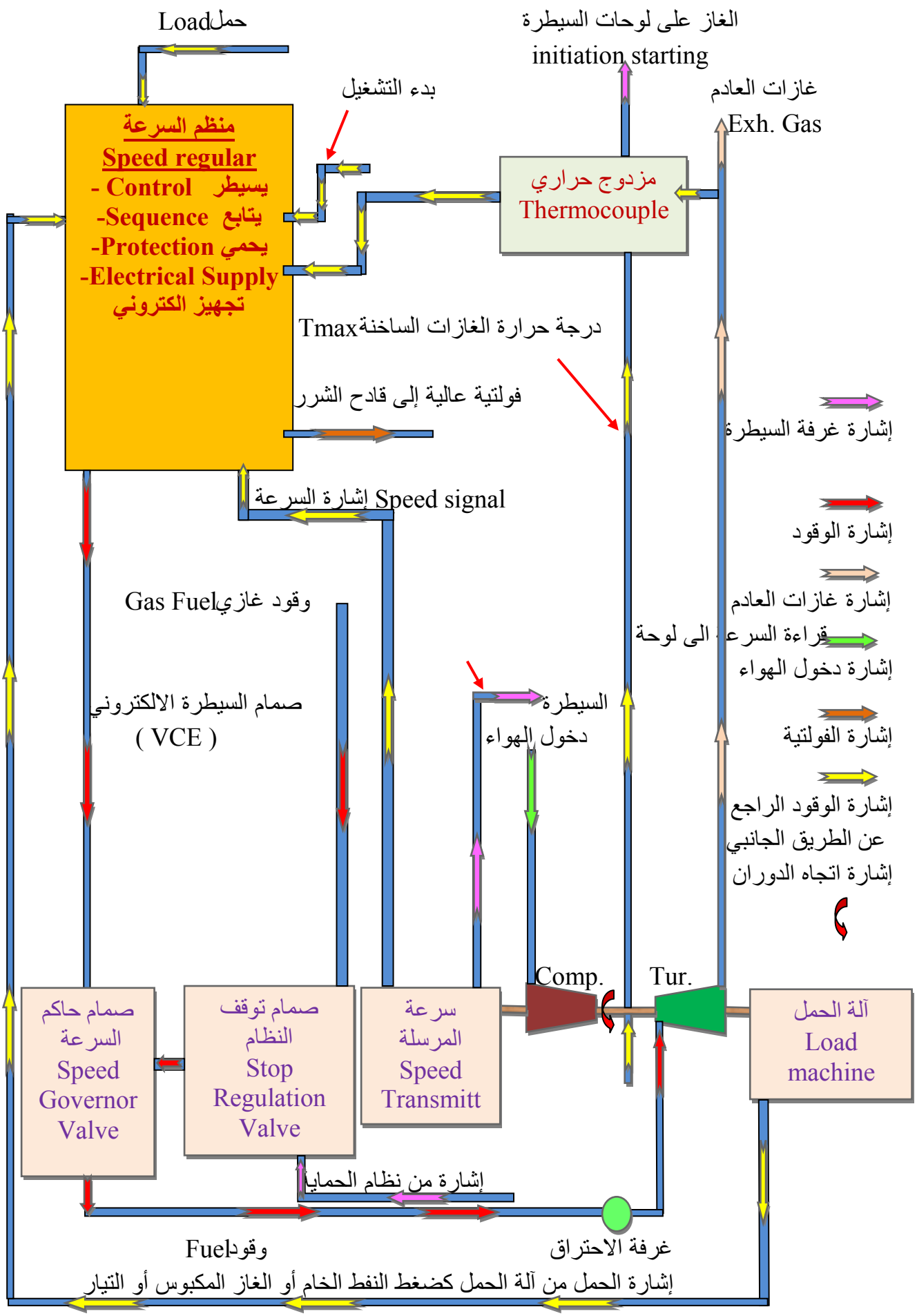
أ. التأكد من توفير الشروط اللازمة لبدا التشغيل السليم للتوربين كجريان كمية كافية بضغط معين كما في دهن التزييت وبالدرجة الحرارية المطلوبة إلى محامل التوربين وماكنة الحمل وصندوق التروس الرئيسي. كذلك التأكد من إن ضغط غاز أو سائل الوقود هو بالمستوى المطلوب وليس منخفضا.

ب. تشغيل منظومات التوربين حسب تسلسل معين بدءا بمنظومة بدء التشغيل ثم تجهيز الشرارة الكهربائية وتجهيز الوقود ورفع سرعة التوربين إلى السرعة التي يصبح فيها قادرا على الاستمرار بالدوران بدون الحاجة إلى محرك بدء التشغيل.

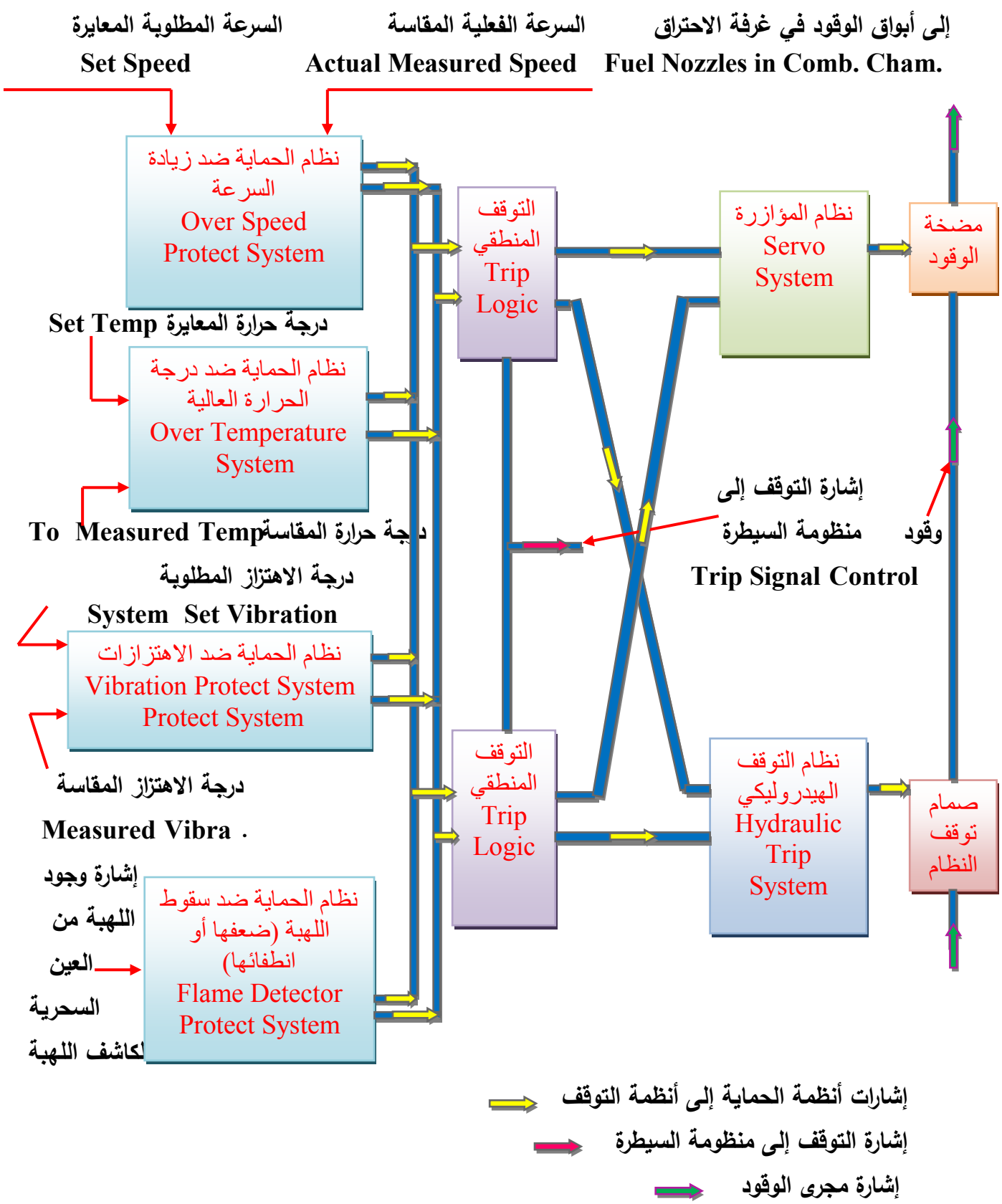
ت. تحميل التوربين والمحافظة على سرعته بواسطة حاكم السرعة Speed Governor أو تغيرها حسب الطلب أو تغير الحمل على ماكنة الحمل .

ث. قياس درجة حرارة الغازات المتولدة أثناء مرورها بريش التوربين ومجرى غاز العادم وقياس درجات حرارة المحامل ودرجات حرارة دهن التزييت وضغط دهن التزييت وضغط دهن السيطرة وقياس شدة الاهتزازات على المحامل وعلى نقاط مختارة من جسم التوربين وبصورة مستمرة وإظهارها على مقاييس أو أوراق تسجيل على لوحات السيطرة لغرض المعاينة من قبل المشغل.

ج. مقارنة القياسات في النقطة (ث) أعلاه مع مقادير مراجع محددة لهذه القياسات، فمثلا عندما تصل درجة حرارة احد المحامل إلى 80 درجة مئوية فإنها لا تزال مقبولة ولكن عند وصول الدرجة الحرارية إلى 90 درجة مئوية فإنها في هذه الحالة تقترب من 95 درجة مئوية وهي درجة التنبيه Alarm عندها يرسل جهاز السيطرة إشارة إلى لوحة السيطرة وتظهر علامة التنبيه " درجة حرارة المحامل عالية " High Bearings Temp. لتنبيه المشغل لذلك لاتخاذ الإجراءات اللازمة لتخفيض هذه الدرجة، أما إذا ارتفعت درجة حرارة المحامل إلى 99 درجة مئوية عندها يقوم جهاز السيطرة بقطع غاز أو سائل الوقود عن التوربين وإيقافه فورا وإظهار علامة " توقف بسبب ارتفاع درجة حرارة المحامل " Trip High Bearings Temp. على لوحة السيطرة. وترتبط بمنظومة السيطرة أجهزة وآلات دقيقة ومقاييس ومبينات لقياس درجات الحرارة والضغوط والاهتزازات وهذه الأجهزة موضحة بالمخططين رقم (11) و(12)



مخطط رقم (20) يوضح منظومة السيطرة الرئيسية (دائرة التحوير)



مخطط رقم (21) يوضح أنظمة السيطرة لدائرة التوقف الفجائي

أولا:- الآلات الدقيقة Instruments المستخدمة مع منظومة السيطرة:-

وهـي معدات مثبته علـى أجزاء التوربين لقياس عوامل معينه مثل درجة الحرارة والسرعة والضغوط والاهتزازات وترسل إشارات كهربائية أو هيدروليكية إلـى أجهزة السيطرة والـى مبينات درجـة الحرارة والسـرعة والضغـوط والاهتزازات على لوحة السيطرة لاطلاع المشغل على حالة التوربين، وهي كما يلي:-

أ. **كاشفات السرعة المغناطيسية Speed Magnetic Pick-Ups:-**

ويوجد اثنان منـها، واحد مثبت في جسم التوربين أمام مسنن مركب على المحور الدوار للضاغطة وأخر مثبت في جسم التوربين أمـام مسنن مركب علـى المحور الدوار لتوربين الحمل. وهـو عبارة عن ملف مغناطيسي يرسل ذبذبات كهربائية إلـى جهاز قياس السرعة بعدد أسنان المسنن التي تمر أمامـه أثناء دوران المحور الدوار. ويمثل عـدد هـذه الذبذبات سرعـة المحور الدوار. عليه يمكن قراءة سرعة توربين الضاغطة وسرعة توربين الحمل على مقياسي السرعة المثبتين علـى لوحة السيطرة. كذلك ترسل نفس الذبذبات لتوربين الحمل إلى جهاز حاكم السرعة Speed Governor لمقارنة السرعة الفعلية مع السرعة المطلوبة من قبل هذا الجهاز وتعديل كمية غاز أو سائل الوقود حسب المطلوب.

ب. **المزدوجات الحرارية Thermocouples:-**

المزدوج الحراري عبارة عن سلكان من معدنين مختلفين يستعمل لقياس درجة الحرارة، ومنها مجموعة موزعة بانتظام حـول مجرى غـاز العادم ومجموعة أخرى موزعة بانتظام حول المجرى الحلقي Space Annular الذي تمر منـه الغازات الساخنة الخارجة من غرفة الاحتراق وقبل دخولها توربين الضاغطة لقياس درجة حرارتها Tmax وهي أعلـى درجة حرارة للغازات الساخنة في التوربين، وترسل هـذه المزدوجات الحرارية إشارات كهربائية إلـى مبينات درجات الحرارة علـى لوحة السيطرة لغرض قراءتها والـى منظومـة السيطرة لغرض مقارنتها مـع المراجع المحددة لقيم هذه الدرجات الحـرارية لغرض تقليل كمية غـاز الوقـود Comparison With Max Alarm and Trip Value Of Temperatures لتلافي وصـول هذه الدرجات الحرارية إلـى درجة التنبيه Alarm أو درجة الإيقاف الاضطراري Trip، وهناك مزدوجات حـرارية لقياس درجـة حـرارة محامل التوربين وماكنة الحمل وصندوق التروس في بعض التوربينات.

ت. **مقياس شدة الاهتزازات Vibration Monitor :-**

وتثبت هذه الأجهزة على محامل التوربين أو نقاط مختارة على غلافه الخارجي. وتقيس شد الاهتزازات بالميكرون أو بسرعة الاهتزاز ميكرون\ ثانية أو بتعجيل الاهتزاز ميكرون\ ثانية^2 أو بوحدات التعجيل الأرضي ، وترسل الإشارات إلى مبين القراءات على لوحة السيطرة فقط وأحيانا إلى أجهزة السيطرة وذلك حسب تصميم التوربين.

وعند وصول شد الاهتزاز إلى درجة التنبيه Alarm ترسل إنذارا صوتيا أو ضوئيا على لوحة السيطرة Alarm On Vibration وعند وصول شدة الاهتزاز إلى درجة الإيقاف الاضطراري تقوم بإيقاف التوربين وتظهر علامة " توقف التوربين بسبب الاهتزاز " على لوحة السيطرة Trip On Vibration.

ث. **مقياس ضغط دهن التزييت Lube Oil Pressure.**

ج. **مقياس ضغط دهن السيطرة Control Or Servo Oil Press.**

ح. **مقياس ضغط غاز أو سائل الوقود.**

خ. **عداد الساعات التشغيلية للتوربين Running Hours.**

د. **عداد عدد مرات ابتداء التشغيل On. Of Starts.**

ذ. **المفاتيح الكهربائية للتوقفات الفجائية الأخرى مثل Low Lube Oil Pressure S/D Switch.**

ر. **كاشف اللهب Flame Detector :-**

ويقوم بمراقبة اللهبة داخل غرفة الاحتراق وإرسال إشارة بذلك إلى أجهزة السيطرة لإيقاف التوربين عندما يرى بعينه السحرية Fire – Eye ضعف اللهبة أو انطفائها. وتظهر علامة " توقف التوربين بسبب فشل اللهبة " على لوحة السيطرة.

ثانيا:- **حاكم السرعة Speed Governor :-**

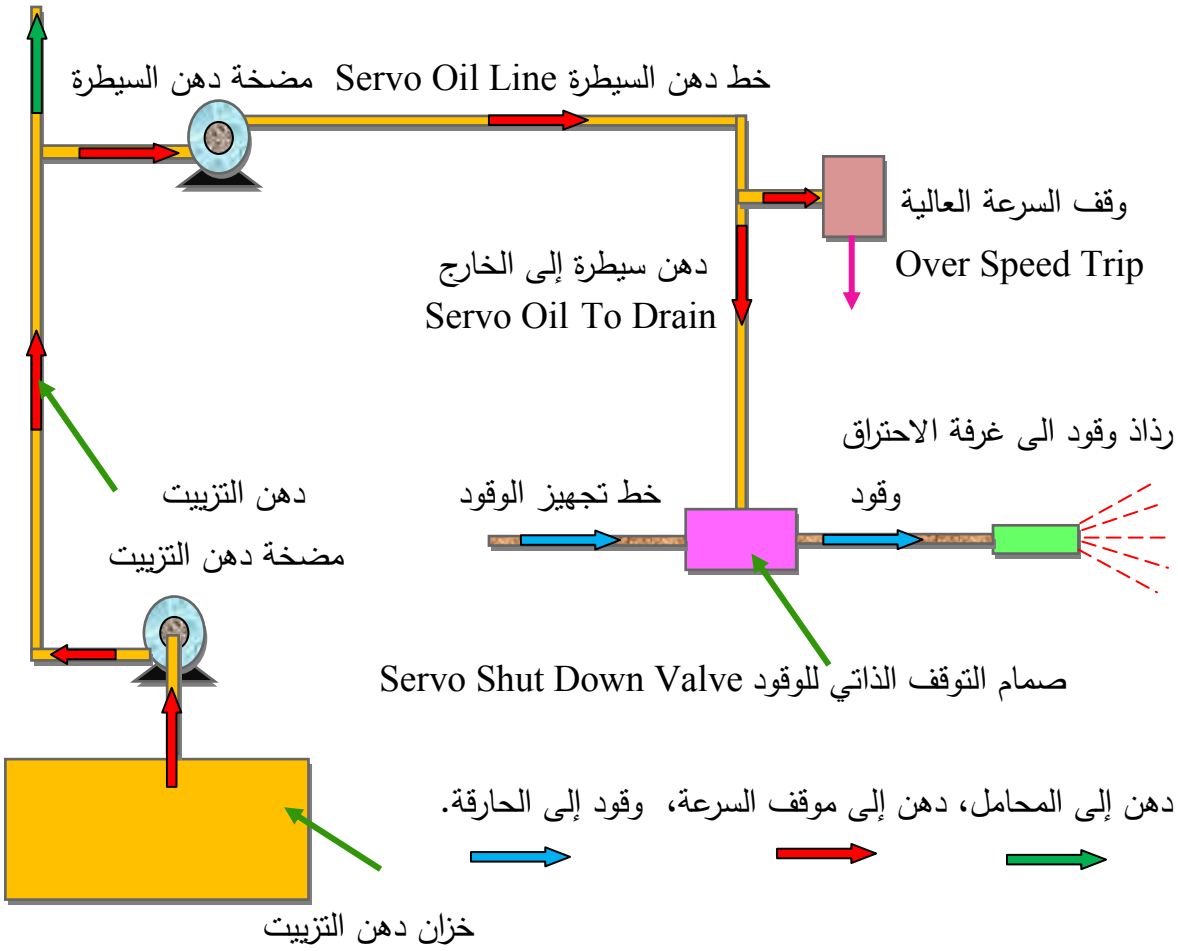
وهو جهاز هيدروليكي أو ميكانيكي أو كهربائي أو الكتروهيدرليكي أو الكتروني يقوم بضبط سرعة التوربين عند السرعة التي يختارها المشغل على الرغم من التغيرات التي تحصل على مقدار الحمل للماكنة المرتبطة بالتوربين.

ثالثا:- **جهاز الإيقاف الإجباري بسبب انفلات السرعة Over Speed Trip Device :-**

وهو جهاز مركب على محور صندوق التروس Gear Box Rotor Shaft ، وعند عدم استطاعة حاكم السرعة السيطرة على ارتفاع سرعة التوربين إلى أكثر من 10% من السرعة المقررة لحاكم السرعة يقوم هذا الجهاز بتفريغ خط دهن السيطرة الذاهب إلى صمام غلق الوقود الذاتي ونتيجة لذلك يغلق هذا الصمام خط الوقود إلى الحارقات ويتوقف التوربين لتلافي حدوث أي ضرر للتوربين نتيجة السرعة غير المسيطر عليها،

وكما موضح بالمخطط أدناه:-

إلى المحامل In Bearings



مخطط رقم (22) يمثل موقف التوربين وموقعة من دهن السيطرة

رابعا:- **<u>الغاية من استخدام منظومة السيطرة:-</u>**

إن قدرة التوربين الميكانيكية تستخدم لغايات متعددة منها:-

أ. لتدوير مولد كهرباء.

ب. لتدوير مروحة سفينة.

ت. لتسيير طائرة.

ث. لتدوير مضخة نفط خام أو كابسة غاز.

ج. لتسيير قطار أو سيارة شحن.

وفي كل حالة من هذه الحالات تستخدم منظومة السيطرة المناسبة للغرض المطلوب.

- **بالنسبة لتدوير مولدة كهرباء:-**

يجب المحافظة على ثبات قيمة ذبذبة التيار الكهربائي المجهز من المولدة (50 ذبذبة \ ثانية) وذلك بالمحافظة على ثبات سرعة توربين القدرة المربوط بالمولدة بواسطة حاكم السرعة.

- **أما بالنسبة إلى تسيير سفينة :-**

فان الغرض هنا المحافظة على القدرة الحصانية لتوربين القدرة لأنها تتناسب طرديا مع سرعة السفينة وابسط طريقة للسيطرة على القدرة الحصانية هي تغيير وضع صمام الوقود يدويا.

- **أما بالنسبة إلى تدوير مضخة نفط خام أو كابسة غاز:-**

فان المطلوب هنا هو السيطرة على ضغط النفط الخام الخارج من المضخة أو على ضغط الغاز الخارج من الكابسة ومنع هذه الضغوط من الارتفاع إلى حد خطير. وترسل إشارة هذا الضغط إلى حاكم السرعة للتحكم في كمية الوقود وضبط سرعة توربين القدرة ومنعه من الزيادة التي تؤدي إلى ارتفاع مخيف في ضغط النفط الخام أو ضغط الغاز. وتسمى إشارة هذا الضغط التي يرسل إلى حاكم السرعة كإشارة كهربائية (فولتية) أو هوائية \ هيدروليكية (ضغط) كإشارة الحمل المتغير Variable Load إلى حاكم السرعة.

خامسا :- **دائرة منظومة السيطرة Circuits Of Control System :-**

تنقسم منظومة السيطرة إلى أربعة دوائر هي:-

أ. **دائرة منظومة السيطرة أثناء التحميل الاعتيادي أو منظومة السيطرة الرئيسية principal Circuits Of Control System:-**

وتقوم بواجبات منظومة السيطرة أثناء الشغل الاعتيادي للتوربين بواسطة حاكم السرعة، ويقوم بزيادة أو نقصان كمية الوقود عند تغير الحمل للمحافظة على سرعة التوربين.

أما عند تعرض التوربين لخطر معين بسبب تلف في احد أجزائه أو أجزاء ماكنة الحمل المرتبطة معه كخطر انخفاض ضغط دهن التزييت أو ارتفاع درجة حرارة الدهن أو ارتفاع شديد في درجة حرارة الغازات أو المحامل أو زيادة الاهتزازات إلى أكثر من الحد المقبول به ففي هذه الحالة ينقل جهاز السيطرة الرئيسي الإشارات من دائرة التحميل الاعتيادية أو دائرة حاكم السرعة إلى دائرة أجهزة السيطرة الوقائية التي تأخذ زمام الأمور وتقوم بإيقاف التوربين أو تخفيض سرعته رغما عن إشارة حاكم السرعةGovernor Over Speedحماية للتوربين من الضرر.

ب. **دائرة أجهزة السيطرة الوقائية Protective Control :-**

والغاية من هذه الدائرة المحافظة على التوربين وماكنة الحمل من الضرر وتكون هذه الدائرة بجزئين:- دائرة الإيقاف الفوري ودائرة التحوير.

أولا:- **دائرة الإيقاف الفوري Trip Circuit:-**

وهذه الدائرة تتدخل لإيقاف التوربين فورا عند حدوث خطر عليه لا يمكن الاستمرار معه على تشغيل التوربين مثل الانخفاض المفاجئ لضغط دهن التزييت أو حدوث اهتزاز شديد، وتظهر علامة هذا العطل كضوء احمر على لوحة السيطرة. وتتدخل دائرة الإيقاف الفوري بغلق صمام غاز الوقود أو سائل الوقود الذاتي Servo Shut Down Valve فيتوقف التوربين حالا.

ثانيا:- **دائرة التحوير Modulation Circuit:-**

وهذه الدائرة من أجهزة السيطرة والقياس تتحسس الخطر على التوربين عندما يمكن معالجته دون الحاجة إلى إيقاف التوربين كارتفاع قليل في درجة حرارة الغازات الساخنة العليا الخارجة من غرفة الاحتراق Tmax وقبل وصول هذه الدرجة إلى 950 درجة مئوية يبدأ نظام التحوير بتقليل كمية الوقود إلى غرفة الاحتراق بحيث لا تصل هذه الدرجة إلى الحد الذي يجب عنده إيقاف التوربين. وتستمر دائرة التحوير بتخفيض تدريجي لكمية الوقود إلى غرفة الاحتراق كلما ازدادت درجة حرارة الغازات الساخنة فوق 900 درجة مئوية.

ت. **دائرة السيطرة بالتتابع successively Control Circuit :-**

وتحتوي هذه الدائرة على عناصر مناظرة argument Elements والتي تتابع بدء التشغيل Starting والتوقف الفوري Shut Down والموضحة بالمخططين السابقين رقم (11,12).

ث. **دائرة تجهيز القدرة Power Supply Circuit:-**

وتقوم هذه الدائرة بتحويل تيار ثابت من مجموعة من البطاريات اللولبية الموجودة في أجهزة السيطرة كي تقوم بواجباتها حتى في حالة انقطاع التيار المتناوب من مصدره. كما تقوم بتجهيز فولتية عالية متناوبة إلى قادحات الشرر بداخل غرفة الاحتراق.

سادسا:- **الحالات التي تتدخل فيها دائرة الإيقاف الفوري:-**

تتدخل دائرة الإيقاف الفوري Trip Or Shut Down Circuit عند حدوث الأعطال التالية:-

1. زيادة درجة حرارة الغازات الساخنة ودرجة حرارة غازات العادم عن الحد المقرر Turbine Tmax Over Temperature.
2. زيادة سرعة التوربين عن الحد المقرر (10% من السرعة المقررة) Turbine Over Speed.
3. انخفاض ضغط دهن التزييت Low Lube Oil Pressure .
4. ارتفاع درجة حرارة دهن التزييت أو المحامل إلى 100 درجة مئوية تقريبا.
5. زيادة شدة الاهتزازات عن الحد المسموح به حسب تعليمات الشركة المصنعة Excessive Vibration.
6. ضعف أو انطفاء اللهبة داخل غرفة الاحتراق كما يتحسسها كاشف اللهبة Flame Detector بواسطة العين السحرية Fire - Eye المثبتة في غرفة الاحتراق.

سابعا:- **طريقة عمل دائرة السيطرة التتابعية:-**

كما ذكرنا سابقا فان هذه الدائرة تقوم بمراقبة وتنفيذ عمليات بدء التشغيل إلى حد وصول سرعة التوربين إلى السرعة المحكمة من قبل حاكم السرعة Speed Governor أو ما تسمى أحيانا بسرعة الاعتماد على النفس Self – Sustained Speed وبعد هذه السرعة تقوم دائرة السيطرة الرئيسية بالسيطرة على تشغيل التوربين بواسطة حاكم السرعة إلى السرعة المقررة له من قبل المشغل والمخطط أدناه يوضح ارتباط ثلاث دوائر سيطرة وهي :-

- دائرة بدء التشغيل.
- دائرة السرعة.
- دائرة درجة حرارة غازات العادم .

فالإشارة الخارجة من هذه الدوائر الثلاث تذهب إلى بوابة وحدتها الفولت فتختار الإشارة المناسبة وترسلها إلى بوابة السيطرة الالكترونية للسائل Liquid Control Electronic (LCE) حيث يتم التحكم بفتحة صمام الوقود السائل الذاهب إلى غرفة الاحتراق أو إلى بوابة السيطرة الالكترونية للغاز Control Electronic Gas (GCE) حيث يتم التحكم بفتحة صمام الوقود الغازي الذاهب إلى غرفة الاحتراق أي إن الإشارة التي تختارها بوابة Valve Control Electronic (VCE) من الإشارات الثلاث من الدوائر الثلاث المذكورة أعلاه هي الإشارة التي سوف تتحكم بكمية الوقود ومن ثم بسرعة التشغيل ودرجة حرارة غازات العادم. وعند بدء التشغيل تكون قيمة (VCE) صفرا ويبدأ محرك بدء التشغيل Starter Motor بتدوير توربين الضاغطة إلى حين وصوله إلى سرعة 20% من السرعة المحكومة حين يتم طرد غازات العادم المتبقية من التشغيلات السابقة ويكون ضغط الهواء وتوزيعه بداخل غرفة الاحتراق مهيئا لبدء الاشتعال. عندها تبدأ إشارة (VCE) بالظهور على لوحة السيطرة ويبدأ تجهيز الوقود لغرفة الاحتراق وتبدأ عملية توليد الاحتراق التي تقوم بتدوير توربين الضاغطة ثم توربين القدرة. ولتجنب حدوث صدمات حرارية لأجزاء التوربين الساخنة Hot Component تتم زيادة مقدار إشارة (VCE) بالفولتية بشكل تدريجي وفتح صمام الوقود بشكل تدريجي خلال الدقيقة الأولى من بدء الاشتغال. وبعد الدقيقة الأولى يرفع معدل زيادة قيمة (VCE) لغرض إعطاء التعجيل المطلوب لزيادة سرعة التوربين وفي نفس الوقت تتم مراقبة عملية ارتفاع درجة حرارة غازات العادم حيث يجب أن تكون بحدود 3C°/sec . وعند وصول سرعة التدوير إلى 45 – 50 % من سرعة التوربين المحكومة يزداد تعجيل التوربين بشكل ملحوظ بفضل تحسن كفاءة تمدد الغازات بين ريش توربين الضاغطة والقدرة عند هذه السرعة. ويلاحظ انخفاض معدل ارتفاع درجات حرارة غازات العادم وتتم السيطرة على تعجيل التوربين من قبل منظم التعجيل Acceleration Control حتى يتم الوصول إلى السرعة المحكومة.

وفي سرعة معينة قبل الوصول إلى السرعة المحكومة يتوقف وينفصل محرك بدء التشغيل. ولدى وصول التوربين إلى السرعة المحكومة تتحول السيطرة علية من دائرة السيطرة التتابعية إلى دائرة حاكم السرعة. وتقاس سرعة توربين الضاغطة والقدرة بواسطة كاشفات السرعة المغناطيسية Magnetic Speed Pick Up التي ترسل إشارات كهربائية تمثل سرعة التوربين إلى حاكم السرعة لمقارنتها مع السرعة التي يختارها المشغل.

فإذا اختلفت السرعة الفعلية عن السرعة التي اختارها المشغل فان الفرق بينهما يرسل كإشارة كهربائية لتغيير فتحة صمام الوقود حتى تتغير سرعة التوربين وتقترب من السرعة التي اختارها المشغل وتصبح مساوية لها عندما تثبت فتحة الصمام عند مقدار معين.

أما الدائرة الثالثة الأساسية فهي التي تحدد درجة حرارة غازات العادم. فهذه الدرجة الحرارية تؤخذ كمبين لحالة الاجهادات الحرارية Thermal Stress التي تتعرض لها أجزاء المحرك التوربيني.

ودرجة حرارة غازات العادم تعتبر عامل أساسي يدخل في أمور السيطرة عند مختلف ظروف التشغيل (التشغيل الابتدائي والتحميل Loading) أو أقصى تحميل Maximum Loading، إن أعلى درجة حرارة للغازات في الدورة الحرارية للتوربين هي درجة Tmax للغازات في نهاية غرفة الاحتراق وعند بداية دخولها للمرحلة الأولى للريش الثابتة لتوربين الضاغطة ولصعوبة قياسها فعلا فهي لا تؤخذ كقاعدة قياس لمعرفة الاجهادات الحرارية على التوربين بل تستخدم درجة حرارة غازات العادم التي يمكن قياسها كمبين تقريبي لحالة الاجهادات الحرارية.

ويتم قياس هذه الدرجات باستخدام مجموعة مزدوجات حرارية Thermocouples يصل عددها إلى 12 مزدوج حراري موزعة توزيعا هندسيا على ممرات مجرى غازات العادم لغرض الحصول على أفضل معدل قياسي لدرجة حرارة غازات العادم. ويتحول هذا المعدل إلى إشارة كهربائية تذهب إلى دائرة السيطرة لمقارنتها مع درجة حرارة مراجع محددة Set Points.

2-8 صناديق التروس Gear BOX

تستخدم التروس لتقليل السرعة في المحركات الابتدائية كأن يكون (محرك بدء التشغيل في التوربين الغازي، مولدة ديزل) إلى المستوى الملائم للمعدة، وفي بعض الحالات تستخدم التروس لرفع السرعة بسبب كون المعدة تحتاج لكي تعمل عند سرعة أعلى من السرعة المقررة لها في المحرك الابتدائي.

وهناك وظائف أخرى يجب على مسننات القيادة أدائها مع وحدات الضخ، فالمعدة من الممكن أن تكون من النوع العمودي، بينما يكون المحرك الابتدائي يعمل بصورة أفقية كما هو الحال في (محرك الديزل)، ولضبط الترس ذات الزاوية القائمة يمكن أن يدمج الترس القائد لنقل القدرة " حول الزاوية حتى لو إن التروس كانت بنفس النسبة (1:1) وليس هناك تغير بالسرعة ".

وفي نفس الوقت، الترس القائد يجب أن يجمع قوة المحاور للمحركين الابتدائيين فلنقل مثلا (المحرك الكهربائي و ومولد الديزل)، وهذا الجمع في قوة المحاور يكون مرغوب فيه عندما يكون هناك طلب لقدرة طارئة في حالة انقطاع أو نقص في الطاقة الكهربائية.

فان المحرك يستخدم عادة مادام مولد الديزل يعمل بالحالة الطارئة، وفي مثل هذا الترتيب فان المحرك من المحتمل أن يحمّل عموديا عند قيمة مسنن القيادة ليقود بشكل صحيح من خلال المحور (Shaft) ، في حين إن محرك الديزل سوف يعشق بزوايا عمودية إلى المحرك.

كذلك فان مسننات القيادة تستخدم لتغيير سرعة المعدة، وتغيير ترتيب المسننات يمكن أن يستخدم في تغيير نسبة التعشيق (Gear Ratio). ويستخدم نظام التروس (Gear System) في كثير من التطبيقات منها ما يلي:-

1. البكرات ذات الحزام الناقل (Variable Pulley Belts) .
2. الروابط الهيدروليكية (Hydroleic Couplings) .
3. المسننات الهيدروستاتيكية (Hydrostatic Gears) .
4. اللزوجة الهيدروليكية (Hydro viscous) .
5. اسطوانة احتكاك (Friction Roller) .

أنواع التروس Gear Type:-

1. ترس اسطواني عدل (Spur Gear) .
2. ترس لولبي (Helical Gear) .
3. ترس لولبي مزدوج مستمر (كفقارسمك الرّنكة) (Continuous Double Helical Gbone Gear) .
4. ترس مخروطي ذات أسنان مستقيمة (عدله) (Straight Tooth Bevel) .
5. ترس مخروطي (حلزوني الأسنان) (Spiral Bevel Gear) .
6. ترس هيبُودّي (ذو محورين) (Hypoid Gear) .
7. الترس الصفري (Zerol Gear) .
8. ترس دُودّي ثابت (Constant Worm Gear) .

9-2 تشغيل التوربين Turbine Operation

- **خطوات تشغيل التوربين وتحميله ومراقبته وإيقافه:-**

1. عملية التشغيل:-

إن تشغيل التوربين مـن حالة السكون لحن الوصول إلى السرعة المقررة له يتطلب المرور بعدة مراحل أم بتدخل مــن المشغل أو بواسطـة أجهزة السيطرة الذاتية Automatic Control Equipment والمراحـل الرئيسية لتشغيل التوربين هي:-

أ. تدوير ضاغطة الهواء بواسطة محرك بدء التشغيل Starter Motor.

ب. بدء شرارة القدح وتكوين اللهبة الرائدة الصغيرة Pilot Flame ثم تكوين اللهبة الرئيسية Main Flame.

ت. تعجيل التوربين إلى السرعة المحكومة Governed Speed.

ث. التحكم بسرعة التوربين أثناء التحميل بواسطة حاكم السرعة Speed Governor.

وهناك خطوات أخرى يمر بها التوربين حسب تصميمه من قبل الشركة المصنعة، وتعتمد هذه الخطوات على نوع محرك بدء التشغيل وعلـى نوع الوقـود المستعمل (غازي أم سائل) وعلـى نـوع أجهزة السيطرة Control Equipment هيدروليكية أم الكترونية.

- **خطوات التشغيل التفصيلية:-**

إن خطوات التشغيل بصورة التفصيلية هي كما يلي:-

أ. يتم إيصـال القدرة الكهربائية إلـى لوحـة السيطرة الخاصة بالتوربين Turbine Control Board فتضاء بذلك جميع مصابيح الإنذار والتوقف Alarm & S/D Lights .

ب. يتم الضغط على الزر الكهربائي الخاص بإعادة الدوائر الكهربائية إلى وضع التهيؤ للتشغيل Reset Push Button .

ت. تشغيل مضخة دهن التزييت ومضخة دهن السيطرة الكهربائيتين وتشغيل مروحـة تبريد الهواء لمنظومة تبريد دهن التزييت.

ث. عند وصول ضغط دهن التزييت إلى الحد المطلوب يتم تشغيل محرك بدء التشغيل يدويا أو ذاتيا.

ج. يقوم محرك بدء التشغيل بتدوير ضاغطة الهواء التي تقوم بطرد غازات العادم المتبقية في غرفة الاحتراق لمدة عدة دقائق للتأكد مـن عدم بقاء هذه الغازات قبل قدح الشرارة الكهربائية، وبعكسه فسوف يحصل انفجار عند قدح الشرارة إذا كانت هناك غازات متبقية في غرفة الاحتراق من التشغيل السابق.

ح. أثناء تدوير الضاغطة Rotation فان مضخة الوقود السائل ستقوم برفع ضغط الوقود إلى الحد المطلوب .

خ. عند وصول ضغط الوقود إلـى الحد المطلوب ووصول سرعة الضاغطة إلى سرعة معينة فسوف ترسل كمية صغيرة من الوقود إلى Igniter مع بدء قدح الشرارة لتكوين اللهبة الصغيرة الرائدة Pilot Flame.

د. عند ملاحظة اللهبة الرائدة من قبل العين السحرية Fire Eye لكاشف اللهب المثبتة بداخل غرفة الاحتراق فان الإشارة الكهربائية من العين السحرية إلى كاشف اللهبة Flame Detector ومن ثم إلى أجهزة السيطرة تجعل هذه الأجهزة تفتح صمام الوقود الرئيسي لتكوين اللهبة الرئيسية Main Flame التي تشعل من قبل اللهبة الرائدة داخل حاوية اللهب بغرفة الاحتراق.

ذ. سوف تزداد سرعة توربين الضاغطة ويبدأ توربين القدرة بالتحرك بفعل تكون غازات الاحتراق وزيادة سرعة محرك بدء التشغيل سوية. وعند وصول توربين القدرة إلى سرعة 70% من السرعة المحكومة يتوقف محرك بدء التشغيل.

ر. يصل توربين القدرة إلى سرعته المحكومة مثلا 5000 – 7000 دورة / دقيقة وعندها يتحكم حاكم السرعة Speed Governor بسرعة التوربين حسب طلب المشغل وحسب متغيرات الحمل على ماكنة الحمل المربوطة بالتوربين.

ز. وقبل وصول توربين القدرة إلى هذه السرعة بقليل تكون مضخة دهن التزييت الميكانيكية ومضخة دهن السيطرة الميكانيكية قد وصلتا إلى السرعة اللازمة لتوليد ضغط الدهن الكافي فتوقف مضخة دهن التزييت ومضخة دهن السيطرة الكهربائيتين.

2. <u>تحميل التوربين ومراقبته:-</u>

إن طريقة تحميل التوربين وسرعته التي يتم عندها بدء تحميله تعتمد على تصميم شبكة الأسلاك الكهربائية الناقلة للقدرة الكهربائية المربوطة مع مولدة الكهرباء المدارة من قبل التوربين أو على شبكة أنابيب النفط الخام أو على شبكة أنابيب كبس الغاز. فهناك مضخة نفط تبدأ التحميل حالما تصل سرعة التوربين إلى السرعة الحاكمة إذا كان ضغط النفط الخام في أنبوب الدفع الرئيسي واطئا. أما إذا كان الضغط عاليا فان المضخة قد لا تدفع النفط الخام في أنبوب الدفع إلا بعد وصول التوربين إلى سعة عالية أكثر بكثير من السرعة المحكومة. وهناك مقياس للضغط يحول الضغط إلى إشارة كهربائية Pressure Transducer ترسل إلى جهاز السيطرة الرئيسي وذلك لتخفيض سرعة التوربين إذا تجاوز هذا الضغط حدا معينا مثل 65 بار مهما كانت السرعة المطلوبة لتحقيق كمية الضخ المطلوبة وذلك حماية لأنابيب ضخ النفط والمضخة من التلف .

3. <u>مراقبة التوربين وماكنة الحمل وتسجيل القراءات:-</u>

من اجل المحافظة على التوربين ومراقبة قيامه وقيام ماكنة الحمل بواجباتهما. يجب تسجيل مجموعة من القراءات التالية مرة كل ساعة على الأقل وهذه القراءات المطلوبة هي:-

أ. سرعة توربين الضاغطة وتوربين القدرة.

ب. درجة حرارة الغازات الساخنة Tmax ودرجة حرارة غازات العادم.

ت. درجة حرارة محامل التوربين ومحامل ماكنة الحمل.

ث. شدة الاهتزاز على محامل التوربين وجسمه وجسم ماكنة الحمل.

ج. ضغط الدخول Suction Pressure وضغط الدفع Discharge Pressure لمضخة النفط الخام أو كابسة الغاز وكمية جريان النفط الخام بآلاف البراميل/ يوم أو متر مكعب/ دقيقة أو ألف متر مكعب/ ساعة من الغاز المدفوع من قبل الكابسة أو تسجيل التيار والفولتية والذبذبة لمولدة الكهرباء.

ح. ضغط غاز الوقود أو سائل الوقود وضغوط دهن التزييت والسيطرة وضغط هواء الضاغطة الخارج من الضاغطة المحورية.

4. <u>إيقاف التوربين:-</u>

يتم إيقاف التوربين من قبل المشغل أو بسبب اضطراري من قبل أجهزة السيطرة لغرض المحافظة عليه من احد الإضرار التالية:-

أ. توقف بسبب شدة الاهتزازات.

ب. توقف بسبب ارتفاع درجة حرارة المحامل.

ت. توقف بسبب ارتفاع درجة حرارة الغازات الساخنة أو غازات العادم.

ث. توقف بسبب ارتفاع درجة حرارة دهن التزييت.

ج. توقف بسبب انخفاض ضغط دهن التزييت.

ح. توقف بسبب انخفاض ضغط الوقود.

خ. توقف بسبب ضعف أو انطفاء اللهبة.

وفي كل الأحوال عندما يتوقف التوربين تقوم أجهزة السيطرة بتشغيل مضخة دهن التزييت الكهربائية المساعدة التي تشتغل على التيار المتناوب Auxiliary Lube Oil Pump Or A.C. وتشتغل هذه المضخة لان مضخة دهن التزييت الرئيسية الميكانيكية تتوقف حالما يتوقف التوربين عن الدوران. ويجب استمرار تدوير دهن التزييت إلى المحامل التي لا تزال حارة (وتبقى كذلك لعدة ساعات) لكي يمتص الدهن الحرارة الكامنة في المحامل وكتلة التوربين الحارة المحيطة بالمحامل منعا لتميع وتلف المعدن الأبيض White Metal للمحامل في حالة عدم وصول الدهن إليها.

ويقوم الدهن الذي يمتص الحرارة بالتخلص منها في المبادلة الحرارية المبردة بواسطة مروحة الهواء المسلطة على المبادلة الحرارية. وفي حالة عدم اشتغال المضخة المساعدة لأي سبب كان كانقطاع التيار الكهربائي أو خلل في المحرك فان أجهزة السيطرة تقوم بتشغيل مضخة دهن التزييت الاضطرارية التي تشتغل على تيار مستمر مستمد من مجموعة من البطاريات Lube Oil Pump Or D.C. Emergency.

10-2 الفحوصات والصيانة الشاملة والاضطرارية للتوربينات الغازية :-

INSPECTIONS, MAJOR AND SHUT-DOWN OVERHAUL OF GAS TURBINES

مفهوم الصيانة في التوربين الغازي:

ان تشغيل التوربين الغازي كاي محرك رئيسي يتطلب برنامجا للفحص الدوري يجري عليه بعد ساعات معينة من اشتغاله (مابين 4 الاف الى 10 الاف ساعة عمل) وقد يصحب الفحص تعديل قياسات اجزاء او اصلاحها او تبديلها وذلك للتوصل الى اعلى درجة من الاعتمادية RELIABILITY او اعلى درجة من توفر التوربين للتشغيل AVAILABILITY .

وتحدد الشركة المصنعة للتوربين الساعات التي يشتغلها التوربين قبل فتح اجزائه للصيانة الشاملة MAJOR OVERHAUL وتكون عادة بين 20 الف الى 30 الف ساعة عمل . اما الصيانة الاضطرارية التي تجري عليه فهي نتيجة توقف التوربين نتيجة حدوث عطل طارئ عليه.

الاعتمادية RELIABILITY هي مقياس لعدد ساعات توقف التوربين بسبب العطلات الاضطرارية التي تحصل وتعرف بالمعادلة التالية :

((الاعتمادية = (ساعات اشتغال التوربين- ساعات التوقف بسبب العطلات الاضطرارية) \ساعات اشتغال التوربين*100%))

وتوفر التوربين للتشغيل AVAILABILITY فهي ساعات توفر التوربين للاشتغال وكما في المعادلة التالية:

((التوفرية = (ساعات اشتغال التوربين- ساعات التوقف بسبب الصيانة الشاملة والاضطرارية) \ساعات اشتغال التوربين*100%)) ويكون عدد العمال الذين يشتغلون على الصيانة الشاملة للتوربين بحدود ثلث عدد العمال الذين يشتغلون في الصيانة لماكنة الديزل بنفس القدرة الحصانية ولنفس الفترة الزمنية . وتكون تكاليف صيانة التوربين بحدود ربع تكاليف صيانة ماكنة الديزل لنفس القدرة الحصانية.

بعض الاعتبارات حول صيانة التوربينات الغازية:

هناك بعض الاعتبارات التي يجب ملاحظتها عند القيام بصيانة التوربينات الغازية وهي:-

1 - السرع العالية للتوربين تتراوح بين 4 الاف الى 10 الاف دورة بالدقيقة مقارنة بما يسمى مكائن الديزل عالية السرعة والتي سرعتها بحدود الف دورة بالدقيقة تقريبا.

2 - درجة حرارة الغازات الساخنة التي تتعرض لها اجزاء غرفة الاحتراق COMBUSTION CHAMBER والريش الثابتة والدوارة للمرحلة الاولى من توربينة الضاغطة هي بحدود 950 درجة مئوية ودرجة حرارة الغازات العادمة 550 درجة مئوية مقارنة بما لايزيد على 500 درجة مئوية داخل غرفة الاحتراق لماكنة الديزل.

3 - بما ان التوربين الغازي هو ماكنة احتراق مستمر وغير محكوم بحركة جزء معين منه كالمكبس الموجود في ماكنة الديزل عليه فلا توجد مشاكل بالنسبة للقدح IGNITION او لتوقيت الشرارة TIMING .

4 - لا توجد هناك أجزاء تحتك مع بعضها البعض rubbing كما موجود في الماكنة المكبسية (احتكاك حلقات المكبس مع الاسطوانة مثلا). لذلك تكون الفترة الزمنية اللازمة بين صيانة شاملة والتي تليها

فترات طويلة نسبيا 20 الف الى 30 الف ساعة قياسا بماكنة الديزل التي تكون هذه الفترة بحدود 5 الاف ساعة. الا انه مع فقدان احتكاك الاجزاء في التوربين الغازي مما يطيل الفترة بين صيانة والتي تليها يوجد عاملان يتسببان في سرعة تلف التوربين وتقليل الفترة المبينة اعلاه وهذان العاملان هما :

اولا: ان سرعة التوربين عالية مما يسبب عنه حدوث اهتزازت عند عدم مراعات الدقة في اجراء القياسات عند تركيب اجزاء التوربين سواء اثناء النصب ام اثناء الصيانة وخاصة قياسات المحامل bearing و قياس استقامة محور التوربين مع محور ماكنة الحمل المربوطة به alignment

ثانيا: هو درجات الحرارة للغازات التي تمر باجزاء التوربين 950 درجة مئوية تقريبا مقارنة بدرجة اوطأ هي 500 درجة مئوية لماكنة الديزل. وهذا يتطلب فحصا دقيقا للشقوق في hot path components مثل اجزاء غرفة الاحتراق وريش التوربين، والانتباه الى التأكسد الحار hot corrosion والالتواء الذي يحصل بهذه الاجزاء.

5 -بما ان تصميم محامل التوربين الغازي لاتسمح لاختلاط دهن التزييت مع الغازات الساخنة، عليه فان دهن التزييت لايحتاج الى تبديل اثناء الفحص او الصيانة الشاملة بل يجب فحصه مختبريا للتأكد من عدم تلوثه او فقدانه لخواصه المطلوبة. وفي حالة عدم صلاحيته فقط يتم استبداله بشحنة من الدهن تزييت جديدة.

الصيانة الجزئية او الفحص الدوري Inpection:

هذه الفحوصات تجري على التوربين اما اسبوعيا او شهريا او كل ثلاثة اشهر او سنويا او تجري حسب ساعات اشتغال التوربين (كل 4 الاف ساعة الى ما بين 8-10 الاف ساعة)اعتمادا على نوع التوربين. ويجب ان تسجل معلومات كافية عن ساعات اشتغال التوربين منذ الفحص السابق وسرعة توربين الضاغطة والقدرة ودرجة حرارة الغازات والمحامل. ويتم فحص الاجزاء او استبدالها اعتمادا على توجيهات الشركة المصنعة.

الصيانة الشاملة Major Overhaul :

التوربينات الصناعية مكائن تتحمل العمل الشاق لفترة طويلة بين صيانة شاملة والتي تليها قد تمتد من 20 الف ساعة الى 30 الف ساعة اعتمادا على عدد مرات ايقاف التوربين وتشغيله والاحمال القصوى التي تتحملها ودرجة حرارة الجو والرطوبة والغبار ومدى حسن المراقبة للتوربين. ويجب طبعا تسجيل كافة المعلومات الضرورية قبل ايقاف التوربين للصيانة الشاملة وكذلك اعادة التسجيل بعد اكمال الصيانة وتشغيل التوربين لغرض المقارنة ومعرفة مدى التحسن او ربما التدهور الذي يحصل على كل جزء من اجزاء التوربين وتقدير سبب ذلك واتخاذ الاجراءات اللازمة في حالة تدهور جزء ما في التوربين كاعادة فتحه واستبداله او تغير قياساته لاعادة الوضعية الصحيحة له. ويتم فحص الاجزاء او استبدالها اعتمادا على توجيهات الشركة المصنعة.

2-11تشخيص العطلات التي تطرأ عند تشغيل التوربين الغازي وملحقاته وطرق معالجتها:-

Fault Finding During Operation Of Gas Turbines & Auxiliaries

ان الصيانة الشاملة والفحص الدوري المستمر ومراقبة درجات حرارة الغازات ودهن التزييت وغاز الوقود وضغوطها وشدة الاهتزازات اثناء اشتغال التوربين الغازي يقللان كثيرا من العطلات التي تحصل له. ولكن بعض هذه العطلات قد تحصل عند تشغيل التوربين بعد انتهاء اعمال الفحص الدوري او الصيانة الشاملة او قد تحصل اثناء التشغيل المستمر للتوربين.

الجدول ادناه يحتوي على معظم العطلات المتكررة التي لا يمكن حصرها وهناك اعطال لايمكن ادخالها في الجدول لانها تخص انواع معينة من التوربينات ولكن يمكن التعرف عليها من خلال كتالوكات الشركات المصنعة:

العطل	سبب العطل	اجراءات المعالجة
1 عدم كفاية التعجيل في التوربين الغازي	سرعة محرك ابتداء التشغيل غير كافية للاسباب التالية: أ -(اذا محرك بدا التشغيل غازي)عدم كفاية ضغط غاز التشغيل او تلف جزئي لريش المحرك الغازي ب عدم اسراع محرك بدء التشغيل الكهربائي لعدم فصل المقاومات الكهربائية الداخلة في دائرة تشغيله ت انخفاض ضغط غاز الوقود او سائل الوقود مما يسبب ضعف تيار الغازات الساخنة ث خلل في صمامات السيطرة المنظمة لكمية الوقود قبل دخوله الحارقة ج تلف الريش الثابتة لتوربين الضاغطة	أ -اعادة تعيير منظم غاز التشغيل وتغيير الريشة اذا كانت تالفة ب فحص ضغط الهواء من الضاغطة الذي يفصل هذه الدوائر وفحص مفاتيح التشغيل (هواء/كهرباء) التي تفحص المقاومات ت البحث عن السبب ومعالجته ث فحص دوائر السيطرة الكهربائية او ضغط زيت السيطرة المتصلة بهذه الصمامات ج فحص هذه الريش واستبدالها

2 عدم دوران محرك بدء التشغيل (المحرك الغازي)	أ –عدم كفاية ضغط غاز التشغيل ب تلف ريش محرك التشغيل ت عطل الصمام الكهربائي الذي يسمح بمرور الغاز ث عدم وصول اشارة السيطرة الكهربائية للصمام الكهربائي	أ –اعادة تعيير منظم غاز التشغيل ب استبدال الريش ت استبدال الصمام أو إصلاحه ث فحص الدائرة الكهربائية لتحديد الخلل واصلاحه
3 عدم دوران محرك بدء التشغيل (المحرك الكهربائي)	أ –عدم كفاية ضغط دهن التزييت ب عدم حصول التعشيق مع المحور الدوار ت عدم وصول اشارة التشغيل الذاتي	أ –البحث عن السبب لرفع ضغط الدهن الى الحد المطلوب ب فحص ضغط دهن السيطرة والصمام الكهربائي الخاص بمنظومة التعشيق ت فحص الدائرة الكهربائية الخاصة بذلك وازالة الخلل
4 عدم اشتعال اللهبة الرائدة الصغيرة Pilot Flame	أ –عدم كفاية ضغط الغاز ب عدم حصول الشرارة الكهربائية للاسباب التالية: 1 عدم وصول التيار الكهربائي الى شمعة القدح. 2 تلف شمعة القدح. 3 وجود رطوبة على شمعة القدح.	أ –يتم اعادة تعيير منظم غاز الوقود. 1 فحص الدائرة الكهربائية وخاصة محولة الاشتعال 2 استبدال الشمعة 3 تجفيف الشمعة
5 ارتفاع درجة حرارة المحامل	1 انخفاض كمية زيت التزييت للمحمل 2 ضيق فسحة خلوص المحمل 3 وجود حمل اكثر من المعتاد على ذلك المحمل 4 تلف جزئي للطلاء المعدني الابيض لذلك المحمل	1 رفع ضغط زيت التزييت لهذا المحمل 2 معالجة الفسحة لزيادة مقدارها او استبدال المحمل 3 البحث عن سبب زيادة الحمل ومعالجته 4 فحص المحمل وتبديله البحث عن سبب ازالة طلاء المعدن الابيض

6 عدم اشتعال اللهبة الرئيسية Main Flame	1 انقطاع او انخفاض ضغط الوقود 2 عدم ملاحظة اللهبة الرائدة من قبل العين السحرية Fire Eye	1 فحص الصمام اليدوي وصمام السيطرة وصمام الغاز المتصل بحاكم السرعة 2 فحص العين السحرية والدائرة الكهربائية المتصلة بها Flame Detector
7 ارتفاع درجة حرارة الغازات الساخنة Tmax او الغاز العادم	1 قلة كمية هواء التبريد لغرفة الاحتراق 2 اتساخ الكابسة (ضاغطة الهواء) 3 وجود حمل فوق الاعتيادي 4 سرعة توربين القدرة اقل من اللازم 5 خلل في صمامات السيطرة على غاز الوقود/سائل الوقود	1 فحص نظافة مرشح الهواء الرئيسي وتنظيفه 2 اجراء عملية الغسل لضاغطة الهواء 3 البحث عن السبب وازالته 4 البحث عن السبب وازالته 5 البحث عن السبب وازالته
8 حصول اهتزازت Vibrationعلى جسم التوربين	1 حصول الاهتزازات على جسم ضاغطة الهواء للاسباب التالية: أ -كسر ريشة من الريش الدوارة للضاغطة او توربينة الضاغطة ب اتساع فسحة الخلوص لمحمل الضاغطة آو محمل توربين الضاغطة 2 حصول اهتزازات في منطقة غرفة الاحتراق بسبب عدم انتظام تدفق غاز الوقود	1 طريقة المعالجة هي: أ -استبدال الريشة ب تبديل المحمل 2 فحص الحارقات والبحث عن تلفها او التاكل الذي يسبب عدم توزيع الوقود بصورة متساوية ومنتظمة على الحارقة

	3 -حصول اهتزازات على جسم توربين القدرة للاسباب التالية: أ -كسر ريشة من الريش الدوارة لتوربينة القدرة ب -اتساع فسحة الخلوص لمحمل توربين القدرة 4 -عدم استقامة المحور بين محور توربين القدرة ومحور الماكنة المربوطة Alignment ليست ضمن الحدود المقبولة. 5 -تلف جزء من احد اجزاء الوصلة الرابطة او استبدال جزء منها باخر غير مساو له بالوزن	3 -تكون طريقة العلاج كما يلي: أ -استبدال الريشة ب -استبدال المحمل 4 -ازالة الوصلة الرابطة Coupling بينهما وتصحيح Alignment واعادة الوصلة الرابطة 5 -استبدال الوصلة الرابطة كاملة او الجزء التالف منها مع اعادة وزن الوصلة الرابطة

2-12ظاهرة الكبرته او التأكسد الحار Sulfidation or Hot Corrosion :

وهي عبارة عن تفاعل مواد سبيكة النيكل والكوبالت المكونة للريش مع الاملاح القلوية في هواء الاحتراق كاملاح البوتاسيوم والفناديوم ونسبة من الرصاص ومع الكبريت الموجود في مادة الوقود. وتتكون من هذا التفاعل مركبات خضراء اللون تظهر على شكل بقع على سطح الريشة تسبب تاكل معدنها ويتم هذا التفاعل بفعل درجة حرارة الغازات الساخنة التي تصل مابين 825-950 درجة مئوية.

2-12-1العوامل التي تعتمد عليها عملية التاكسد الحار:

يعتمد التاكسد الحار على اربعة عوامل هي:

أ -يتناسب مقدار التاكسد الحار طرديا مع درجة حرارة الغازات الساخنة

ب -يتناسب مقدار التاكسد الحار طرديا مع درجة حرارة سطح معدن الريشة

ت -يتناسب مقدار التاكسد الحار طرديا مع الضغط المسلط على سطح الريشة

ث -يتناسب طرديا مع نسبة املاح الصوديوم والفناديوم والبوتاسيوم ونسبة من الرصاص وبدرجة اقل مع نسبة عنصر الكبريت الموجود في سائل او غاز الوقود

2-12-2طرق منع حصول التأكسد الحار او التقليل منه:

بالنظر للتاثير الاتلافي للتاكسد الحار على الريشة حيث يجعلها غير صالحة للاستعمال لساعات تشغيلية اخرى وضرورة استبدالها، فقد ابتدعت طرق مختلفة لمنع حدوثه او التقليل من ذلك وهذه الطرق هي:

أ -انتاج واستعمال سبائك محسنة لمنع حدوث التاكسد الحار في صنع الريش

ب -استخدام مواد كيمياوية ضد التاكل لاكساء الريش

ت -معالجة الهواء ومادة الوقود للتقليل من مستوى المواد الملوثة (الاملاح القلوية وعنصر الكبريت)

2-13غسل ريش ضاغطة الهواء Compressor Washing:-

وهذه العملية تجرى على الضاغطة خلال مدة اشتغال التوربين وتعتبر احدى عمليات الصيانة الوقائية Preventive Maintenance وتغسل ريش الضاغطة لمنع تكلس الاملاح عليها والتي تسبب ضيق ممرات الهواء خلالها وتقليل كمية الهواء المار بها وارتفاع درجة حرارة الغازات الساخنة Tmax ، وعند حدوث التكلس وارتفاع درجة حرارة الغازات الساخنة يضطر المشغل الى تخفيض سرعة التوربين لتخفيض درجة حرارة الغازات الساخنة وينتج عن ذلك خفض في القدرة الحصانية للتوربين وكفاءته.

عليه يجب اجراء عملية غسل الضاغطة عند ارتفاع درجة Tmax بمقدار 10 درجة مئوية عن المقدار الاعتيادي ولسرعة التوربين.

وتغسل ريش الضاغطة بإحدى او اثنتين من الطرق ، وتسجل درجات حرارة Tmax ودرجة حرارة غازات العادم وسرع توربين الضاغطة وتوربين الحمل قبل وبعد الغسل وتقارن بنفس الشروط لضاغطة نظيفة. ويعاد الغسل في حالة عدم حدوث اي تحسن في سرع التوربين او درجات الحرارة، عندئذ تتوقف عملية الغسل. وطرق غسل الضاغطة هي كما يلي:-

1 -عملية الغسل بتدوير الضاغطة Crank soak washing:

وتتم هذه العملية بفترة قصيرة من ايقاف التوربين عن العمل وذلك بتدوير ضاغطة الهواء بواسطة محرك الابتداء Starter motor cranking ويحقن من نقطة بمدخل الضاغطة مزيج من الماء الخالي من المعادن Dematerialized water ومادة تنظيف Cleaning agent ويكون المزيج على شكل بخار خفيف ، وتحقن 3غالون من المخلوط بمعدل 1.5غالون بالدقيقة، بعدها تترك الضاغطة لتصبح رطبة Soak ويفرغ المخلوط خلال مدة 15دقيقة. ثم تعاد نفس العمليه مرة اخرى ولكن باستخدام الماء الخالي من المعادن فقط. وتترك الضاغطة لكي تكون رطبة ويفرغ المحلول لمدة 15دقيقة. بعد ذلك يشغل التوربين على سرعة اللاحمل Idling speed لازالة اية مواد عالقة ولتجفيف الضاغطة.

اذا كانت درجة حرارة الجو اقل من +5 درجة مئوية فتضاف مادة لمنع تكون الجليد الى محلول الغسيل.

2 -عملية الغسل اثناء التحميل بالقذف بالجسيمات On-load particle washing:

تجرى عملية الغسل هذه عند اشتغال التوربين بسرعة مناسبة فوق سرعة غلق صمام الاستنزاف Blow-off or Bleed Valve ((عند وصول سرعة توربين الضاغطة الى 70% من السرعة التصميمية ينفتح صمام الاستنزاف)) وتستعمل فيها مسحوق من مادة خادشة مثل التمن العنبر او مسحوق قشرة جوز الهند. ويحقن هذا المسحوق الى مدخل الضاغطة من انبوب خاص وبمعدل 20باوند خلال دقيقتين.

3 -عملية الغسل اثناء التحميل بالسوائل On-load liquid washing:

تتم هذه العمليه بحقن الماء الخالي من المعادن والنفط الابيض Emulsifying additive بداخل مجرى الضاغطة عند سرعة توربين مناسبة فوق سرعة غلق صمام الاستنزاف وتحقن كمية 70 غالون من المحلول بعدل 6غالونات بالدقيقة. ويستمر تشغيل التوربين بعد ذلك لمدة 10-15 دقيقة لتجفيف الضاغطة.

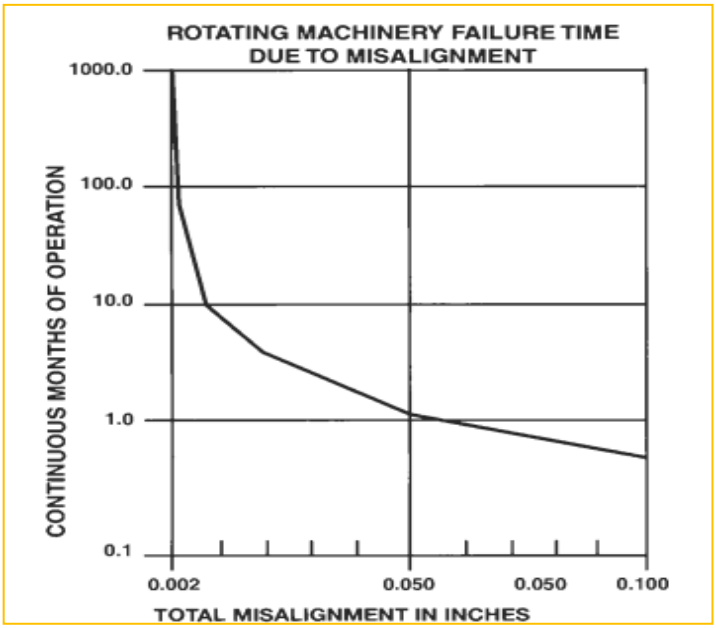
اذا كانت درجة حرارة الجو اقل من +5 درجة مئوية فتضاف للمحلول مادة ضد الانجماد وتكون هذه المادة اما مادة الميثانول Methanol او مادة الايسوبروبانل Isopropanol

14-2تطابق محاور المكائن الدوارة Alignment:

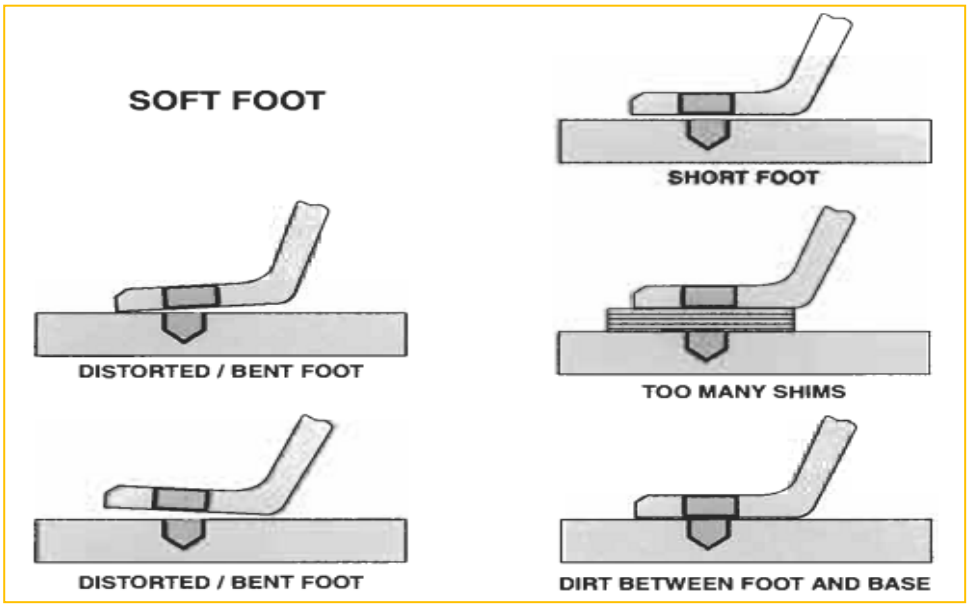
نظرا لما يسببه عدم تطابق محاور التوربين وماكنة الحمل وتاكل wear في المحامل وموانع التسرب seal وكسر في اسنان الوصلة الرابطة او مجمع التروس. ينتج عن ذلك كله توقف الماكنة عن الانتاج او الضخ وما يتبعه من خسائر مادية تنشأ عن التوقف.

وعليه يجب الاهتمام واجراء عملية تطابق المحاور بشكل دقيق كلما توقفت الماكنة لاجراء الصيانة الشاملة او الاضطرارية breakdown وثم مقارنة حالة الماكنة مع حالتها السابقة عند توقف سابق وتحديد سبب زيادة عدم التطابق misalignment ومعالجة السبب قبل اكمال عملية تطابق المحاور ومن ثم الاستمرار في تشغيل الماكنة.

بالإضافة إلى مقارنة حالة الماكنة من حيث تطابق المحاور وهي ساكنة cold alignment هناك طرق اخرى لمقارنة تطابق المحاور وهي بحالة شغالة hot alignment . فاذا تبين ان حالة تطابق المحور والماكنة الشغالة جيدة وضمن الحدود المقبولة وكذلك فان الاهتزازات على الماكنة ودرجات حرارة المحامل ودهن التزييت كلها جيدة فلا داعي لايقاف الماكنة ويمكن الاستمرار بالانتاج او الضخ لفترة اطول من الفترة المقررة سابقا وهذا يعطي انتاجية افضل للماكنة.

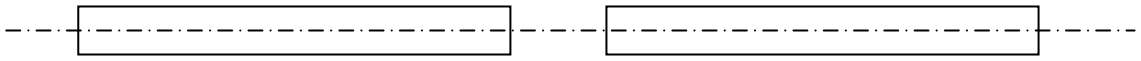


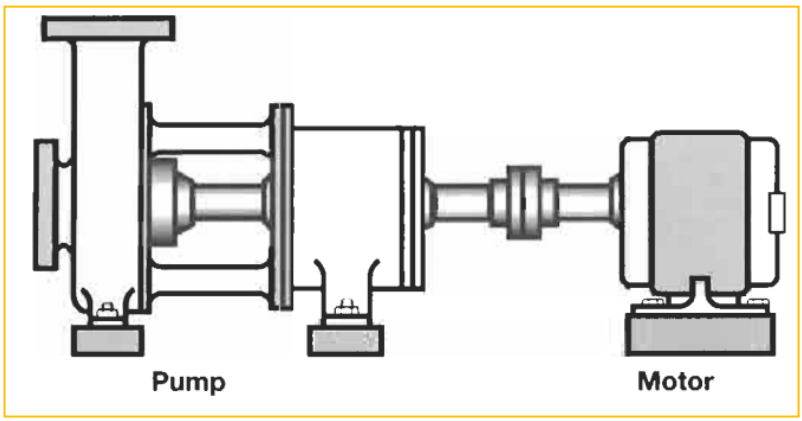
الشكل يوضح تاثير نسبة عدم التطابق على عمر المعدة واحتياجاتها للصيانة (وقت التشغيل الشهري المستمر مع الزيادة في عدم التطابق)



2-14-1عدم تطابق المحاور وحالاته:

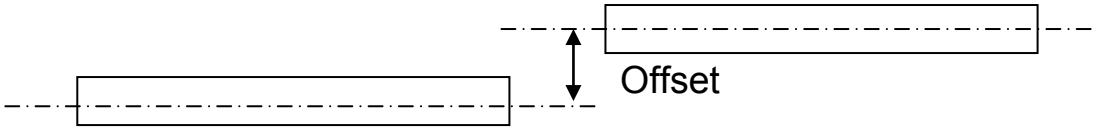
ان تطابق محور التوربين مع محور ماكنة الحمل وصندوق التروس هو جعل خط مركزي المحورين متطابقين كما في الشكل ادناه

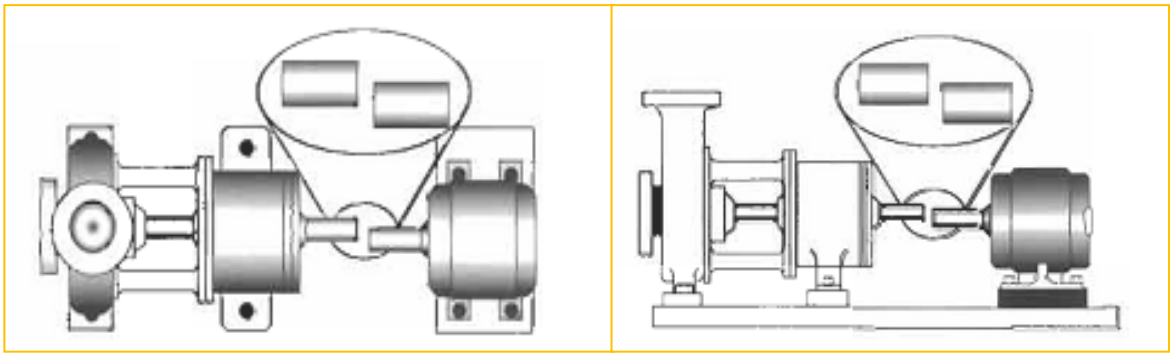




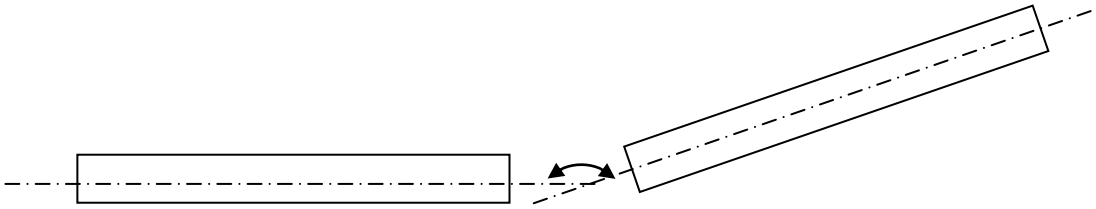
ويتم ذلك بتحريك ماكنة الحمل او مجمع التروس ومحاولة جعل مركزها مطابقا نظريا لخط مركز المحور الدوار للتوربين. ولكن هذا التطابق نظريا فقط ولايمكن الحصول عليه بسهولة لاسباب سوف نذكرها لاحقا. ولكننا نجعل خطي مركز المحورين متقاربين من حالة التطابق النظري الا بمقدار بسيط جدا من الحيد عن التطابق النظري ويجب ان يكون هذا الحيد على اقل قدر ممكن وتقرره الشركات المصنعة ولايتجاوز ماهو مقرر من قبلها وهناك ثلاث حالات من الحيد عن تطابق محوري التوربين وماكنة الحمل وهي:

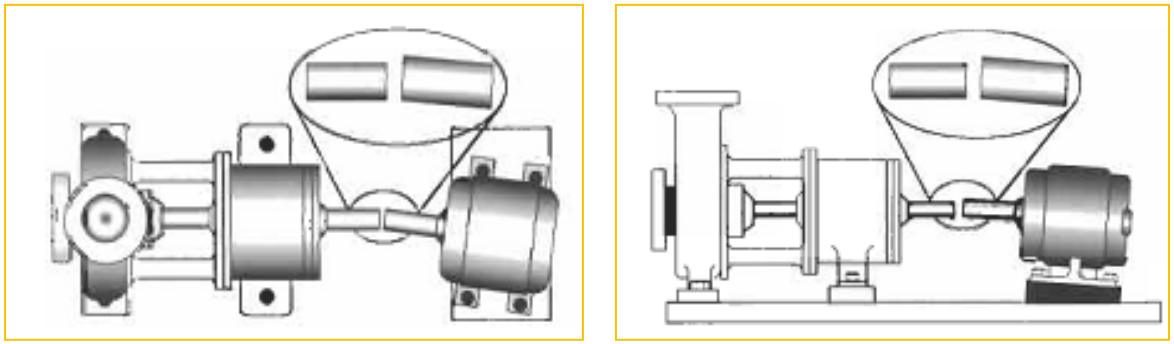
أ –توازي خطي مركز المحورين مع وجود بعد بينهما يسمى الOffset



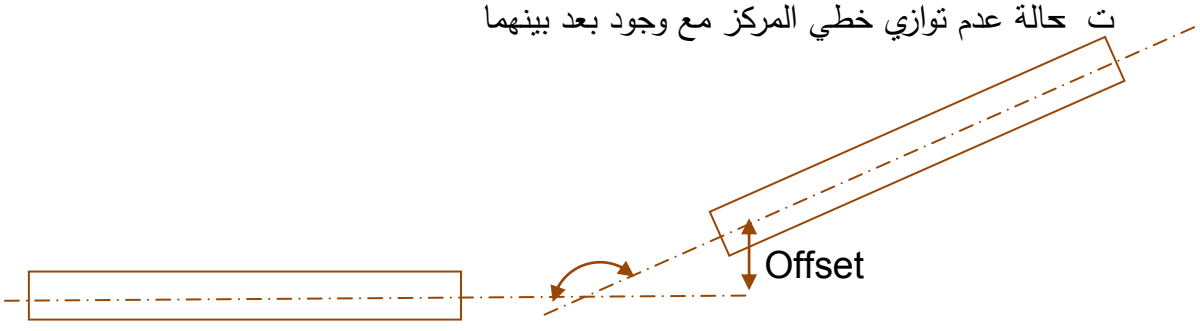


ب عدم توازي خطي مركز المحورين وتلاقيهما بزوية منفرجة وتسمى هذه الحالة الحيد الزاوي
angular misalignment





ت حالة عدم توازي خطي المركز مع وجود بعد بينهما



2-14-2اسباب زيادة عدم تطابق المحاور misalignment:

ان العوامل التي تؤدي الى زيادة عدم تطابق المحاور والتي يجب تحديد واحد او اكثر منها لغرض معالجتها قبل الاستمرار باجراء عملية تطابق المحاور هي:

1- تلف محامل التوربين او محامل ماكنة الحمل او مجمع التروس bearing wear

2- عدم استقرار ارضية الاساسات foundation unsettlement

3- الانتفاخ الحراري للمحور الدوار للتوربين اذا كانت القياسات تجري اثناء اشتغال التوربين

4- اعوجاج في بدن التوربين casing deformation

5- ضغط الانابيب على التوربين او ماكنة الحمل اذا كانت منصوبة بشكل غير صحيح ،التمدد والتقلص باختلاف درجات الحرارة للانابيب

6- ضغط السائل او الغاز في ماكنة الحمل اثناء عملية التشغيل

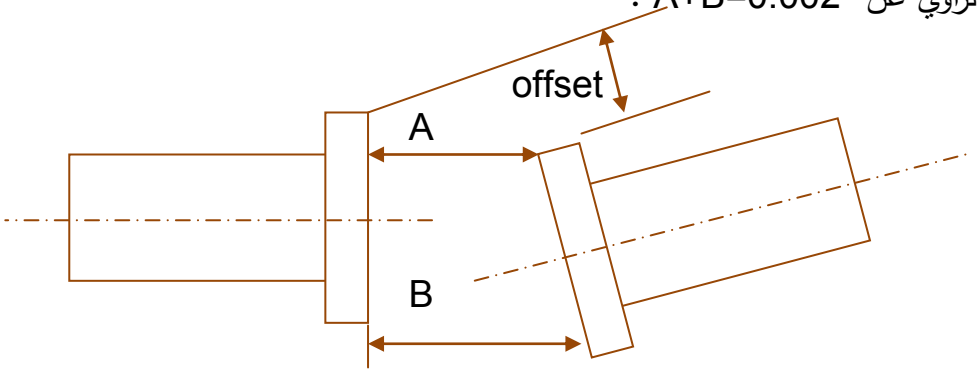
7- تعرض التوربين او ماكنة الحمل من جهة واحدة لاشعة الشمس او الرياح او سقوط الامطار والذي يسبب تمددا غير متناسق في بدنها

2-14-3مقدار الحيد عن تطابق المحاور المسموح به allowable misalignment:

ان مقدار الحيد عن تطابق المحاور المسوح به سواءاً مقدار offset او الحيد الزاوي يتقرر من قبل الشركة المصنعة للتوربين ومذكور في كتالوكات الماكنة، ولكن في حالة عدم ذكره فيمكن الاعتماد على الحدود العامة لغرض اجراء عملية تطابق المحاور وهي:

1- لايجوز جعل الحيد الزاوي اكثر من 1/4 درجة بين خطي مركز محوري التوربين وماكنة الحمل او محور مجمع التروس ويفضل ان يكون الحيد الزاوي 1/20 درجة

2- لايزيد البعد بين خطي مركز المحورين المتوازيين عن 0.010 انج اي ان offset=0.010 in وا لايزيد الحيد الزاوي عن "A+B=0.002 .



الحيد الزاوي A+B=0.002" (Angular Misalignment)

2-14-4كيفية تحديد الحدود المقبولة للحيد عن تطابق المحاور:

لغرض تحديد حدودا مقبولة للحيد عن حالة تطابق المحوار تؤمن تشغيلا لمدة طويلة نسبيا(من 3-5سنوات) بدون حدوث مشاكل ناجمة عن هذه الحالة فيجب اتباع الخطوات التالية في حالة عدم توفر معلومات دقيقة من الشركة المصنعة عن اجراء المطابقة في حالة سكون الماكنة او اشتغالها وهذه الخطوات هي:

1 -يجب تحديد حدود مقبولة للحيد عن تطابق المحاور المثالي مبنية على الخبرة السابقة مع مكائن مشابهة من حيث القدرة الحصانية والشكل الهندسي السرعة والحمل

2 -تحديد مقدار التغير في الحيد من حالة سكون المكائن الى حالة اشتغالها بسبب الانتفاخ الحراري لمحور التوربين عند الاشتغال وضغط الانابيب والسائل والغازات الناتجة عن الاشتغال .

3 -الاعتماد على نظام للقياسات للتحقق من تطابق المحاور وحيدها واستعمال واحدة او اكثر من طرق القياس

4 -نصب المكائن بوضعية تضمن تطابق المحاور وهي في حالة الاشتغال

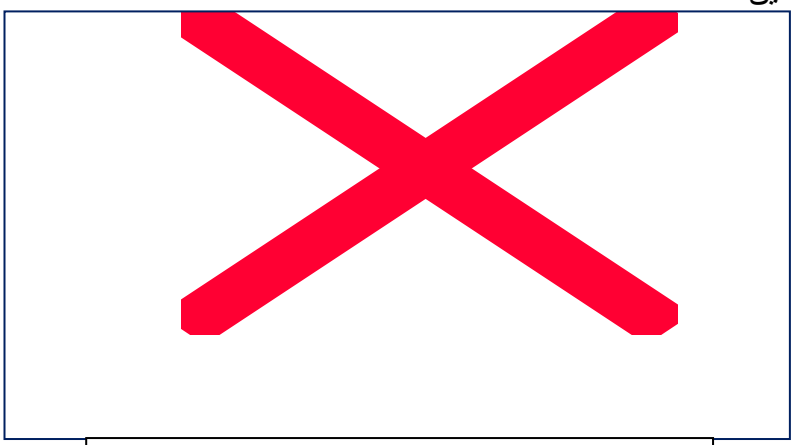
5 -مراقبة حالة التطابق المحاور والمكائن شغالة(مع مراقبة الاهتزازات ودرجات حرارة المحامل ودهن التزييت) لضمان سلامتها وتشغيله لفترات اطول دون الحاجة لايقافها

2-14-5طرق قياس تطابق المحاور alignment measuring methods

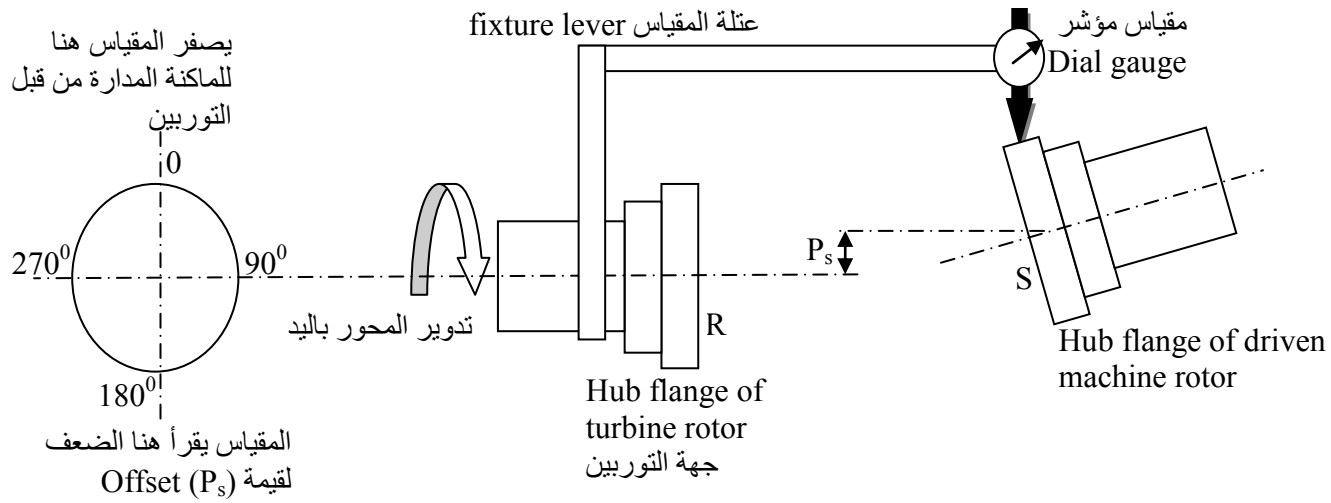
أ -**<u>طريقة مقياسي المؤشر:-</u>**

وفي هذه الطريقة يثبت مقياس مؤشر (مقياس يشبه الساعة Dial Gauge) في نهاية عتلة متينة وتثبت هذه العتلة على صرة الدوار Rotor Hub لأي الماكنتين (ولنفرض التوربين) التي يمكن تدوير محورها باليد بسهولة.

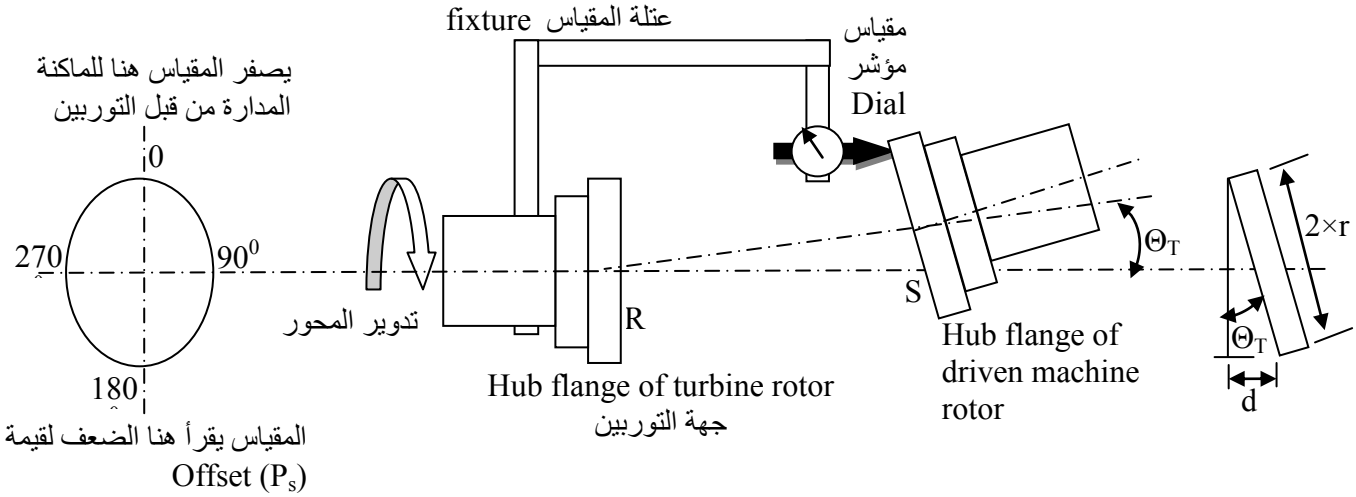
ويدار هذا المحور باليد بحيث يدور المقياس بزاويا (صفر-90-180-270-360) حول شفة صرة (Hub Flange) محور ماكنة الحمل Load Machine Rotor وفي وضع الشاقولي الاعلى أي بزاوية صفر يصفر المقياس . وقراءته في زواية 180درجة أي في الوضع الشاقولي الاسفل هي ضعف مقدار الـ(Offset) بين مركز محوري الماكنتين.



طريقة قراءة مقياس الدايل كيج



وتحتاج الان لتحديد مقدار الحيد الزاوي Angular Misalignment ولذلك نرفع المؤشر من مكانه في العتلة ونثبته بوضع جديد كما في الرسم ادناه:



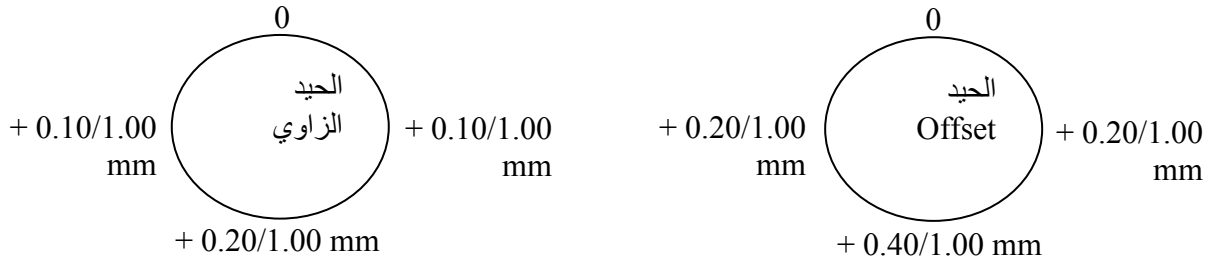
وعند البدء بالقياس يصفر المقياس في الوضع الشاقولي الاعلى (درجة صفر) ويدار ويسجل القياس كل 90 درجة وتكون القراءة عند الوضع الشاقولي الاسفل 180 درجة هي مقدار الحيد الزاوي d وتستخرج زاوية الحيد θ_T بواسطة العلاقة $\theta_T=2r/d$ حيث θ_T مقاسة بالقياس نصف القطري ومقدار γ هو نصف قطر شفة الصرة Hub Flange.

ويجب أن تعدل وضعية المكائن بحيث لا تزيد θ_T عن 1/20 درجة أو أن لاتزيد d عن 0.002 من الانج. اما بالنسبة إلى مقدار (offset) فيجب أن لايزيد عن 0,010 أنج.

وهذه الطريقة هي اكثر الطرق استعمالاً بالنسبة لقياس تطابق المحاور عندما تكون المكائن متوقفة عن العمل نظراً لبساطتها واعطائها قراءات مطلقة لمقادير الحيد عن التطابق النظري المثالي للمحاور.

ومن الامثلة على هذا القياس مايلي:-

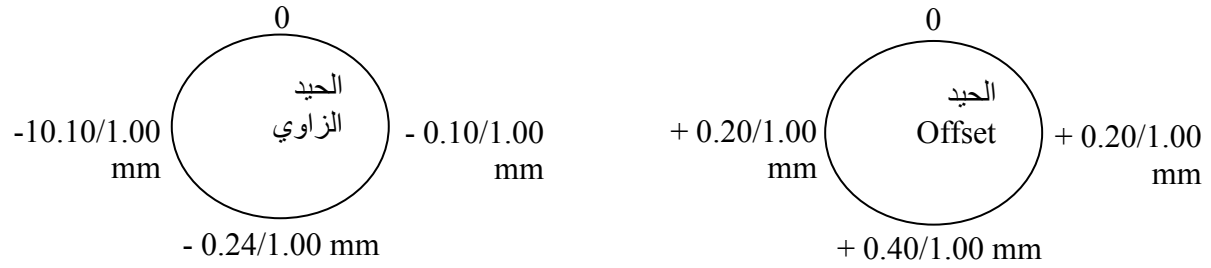
1 ماكينة توربين مربوطة مع ماكنة حمل اريد قياس الحيد الOffset والحيد الزاوي بينهما بطريقة مقياسي المؤشر فكانت القياسات لصرة محور ماكنة الحمل كما في الرسم ادناه: 2r=30cm



الجو اب //بما ان قراءة المؤشر هي موجبة في اسفل الصرة فيعني ذلك ان ماكنة الحمل اسفل من ماكنة التوربين بمقدار 0.40/2 = 0.20 mm لان هذه القراءة هي ضعف الحقيقية هذا بالنسبة لل Offset بالنسبة للحيد الزاوي بما ان القراءة في اسفل الصرة لماكنة الحمل هي موجبة فمعنى ذلك ان وجه الصرة من الاسفل يقترب عن وجه صرة التوربين بمقدار 0.20/1.00 mm ولدى احتساب الزاوية θ

θ =tanθ =d/2r=0.20/(30*10)radians

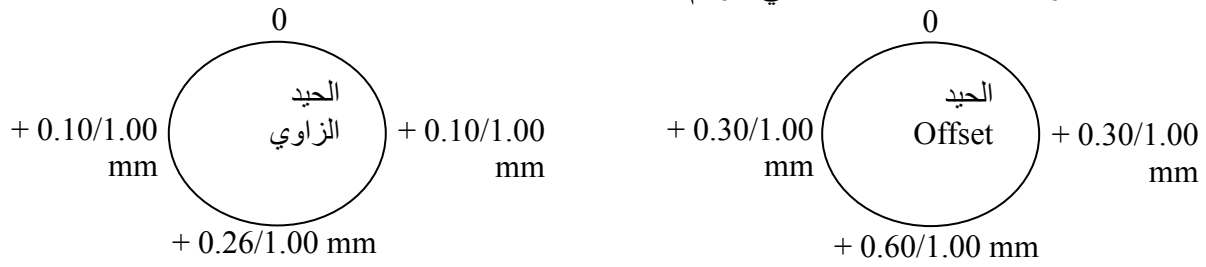
2 ماكينة توربين مربوطة مع ماكنة حمل اريد قياس الحيد ال Offset والحيد الزاوي بينهما بطريقة مقياسي المؤشر فكانت القياسات كما في الرسم ادناه: 2r=30cm



الجو اب //بما ان قراءة المؤشر هي موجبة في اسفل الصرة فيعني ذلك ان ماكنة الحمل اسفل من ماكنة التوربين بمقدار 0.40/2 = 0.20mm لان هذه القراءة هي ضعف الحقيقية هذا بالنسبة لل Offset بالنسبة للحيد الزاوي بما ان القراءة في اسفل الصرة لماكنة الحمل هي سالبة فمعنى ذلك ان وجه الصرة من الاسفل يبتعد عن وجه صرة التوربين بمقدار 0.24/1.00 mm ولدى احتساب الزاوية θ

θ =tanθ =d/2r=0.24/(30*10)radians

3 -ماكنة توربين مربوطة مع ماكنة حمل اريد قياس الحيد ال Offset والحيد الزاوي بينهما بطريقة مقياسي المؤشر فكانت القياسات كما في الرسم ادناه:2r=30cm

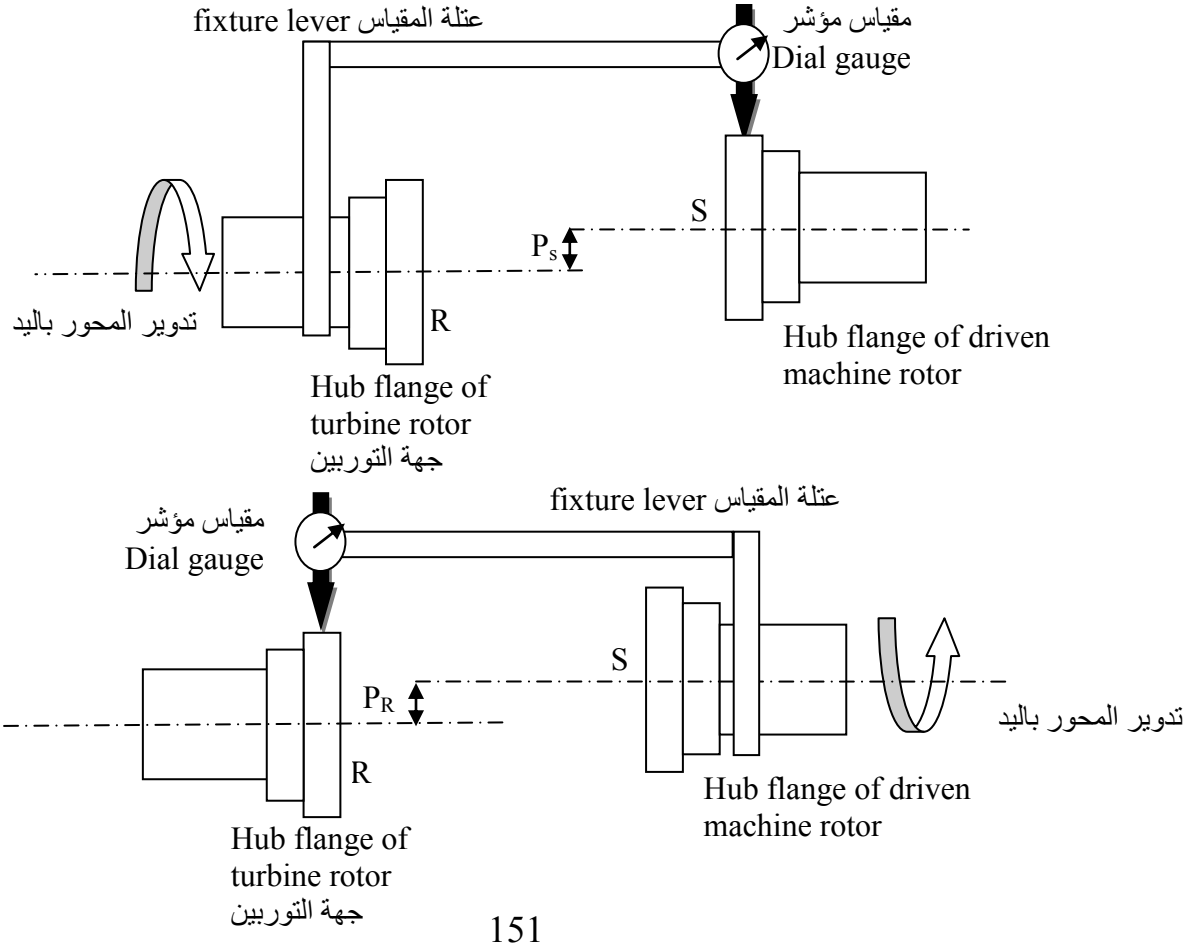


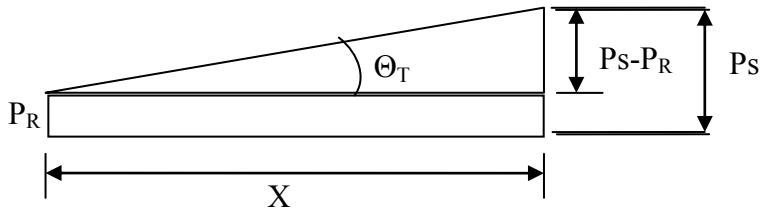
الجو اب //بما ان قراءة المؤشر هي موجبة في اسفل الصرة فيعني ذلك ان ماكنة الحمل اسفل من ماكنة التوربين بمقدار 0.30/2 = 0.15 mm لان هذه القراءة هي ضعف الحقيقية هذا بالنسبة للOffset بالنسبة للحيد الزاوي بما ان القراءة في اسفل الصرة لماكنة الحمل هي موجبة فمعنى ذلك ان وجه الصرة من الاسفل يقترب عن وجه صرة التوربين بمقدار 0.26/1.00 mm ولدى احتساب الزاوية θ

θ =tanθ=d/2r=0.26/(30*10)radians

ب طريقة مقياس المؤشر المعاكس Reverse Indicator (Gauge) Method :

وفي هذه الطريقة يثبت المؤشر على العتلة وتثبت العتلة على صرة أحد المحورين ويقيس المؤشر على صرة المحور الآخر كما في الشكل ، ثم تعاد العملية والعتلة مثبتة على صرة المحور الآخر ونحصل في هذه الحالة على قياس البعدين (Offset P_s, P_R) ومنها ايضاً يمكن الحصول على الحيد الزاوي (Angular Misalignment T) بالحساب كما مبين ادناه



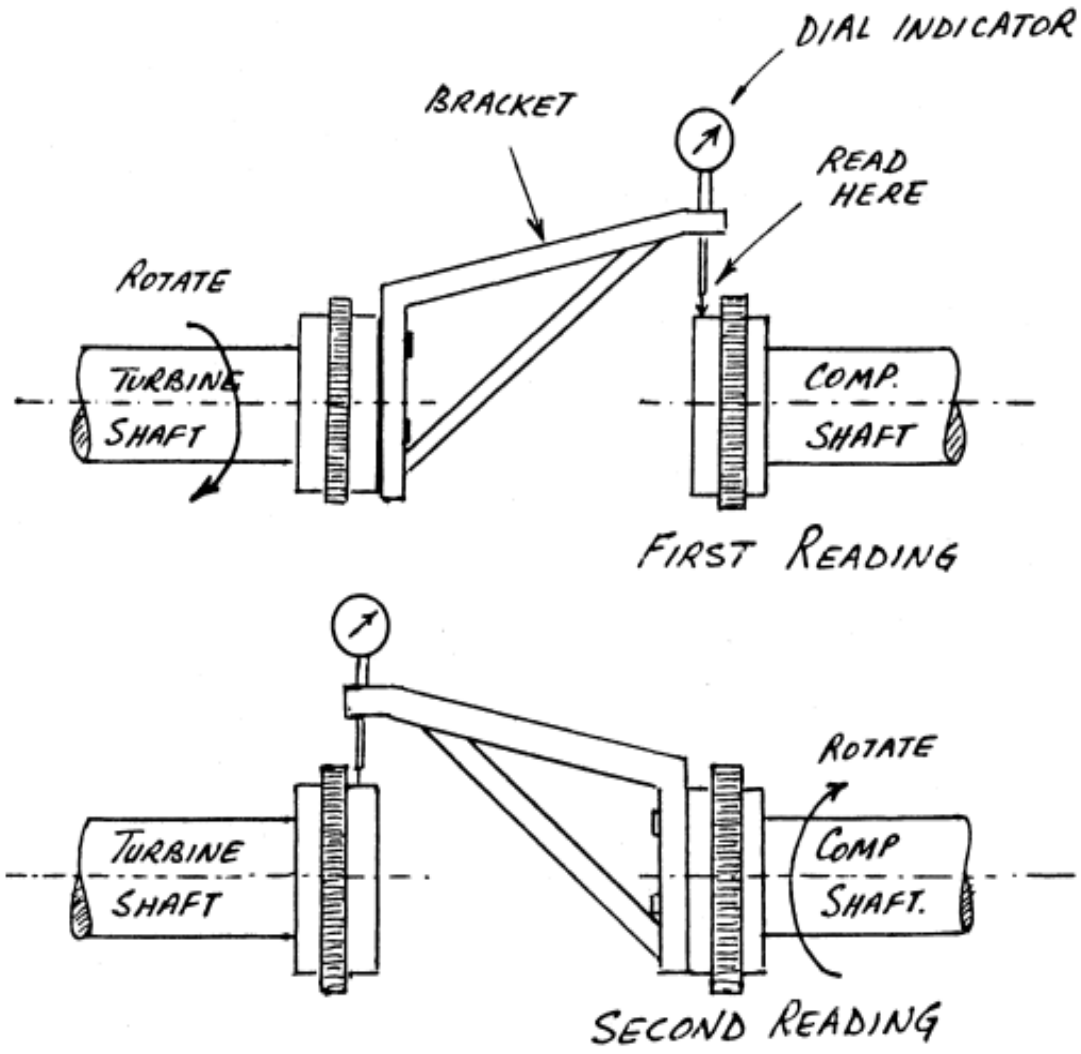


حيث نستخرج الحيد الزاوي بالمقياس النصف قطري θ_T

$(P_s-P_R)/X=\tan \theta_T$

ويمكن اختصار زمن القياس بتركيب مقياس وعتلة على كل صرة محور وثم تدوير المحورين بنفس الوقت وتسجيل مجموعتين من القراءات لتحديد (Offset) والحيد الزاوي (Angular Misalignment) بين المحورين .

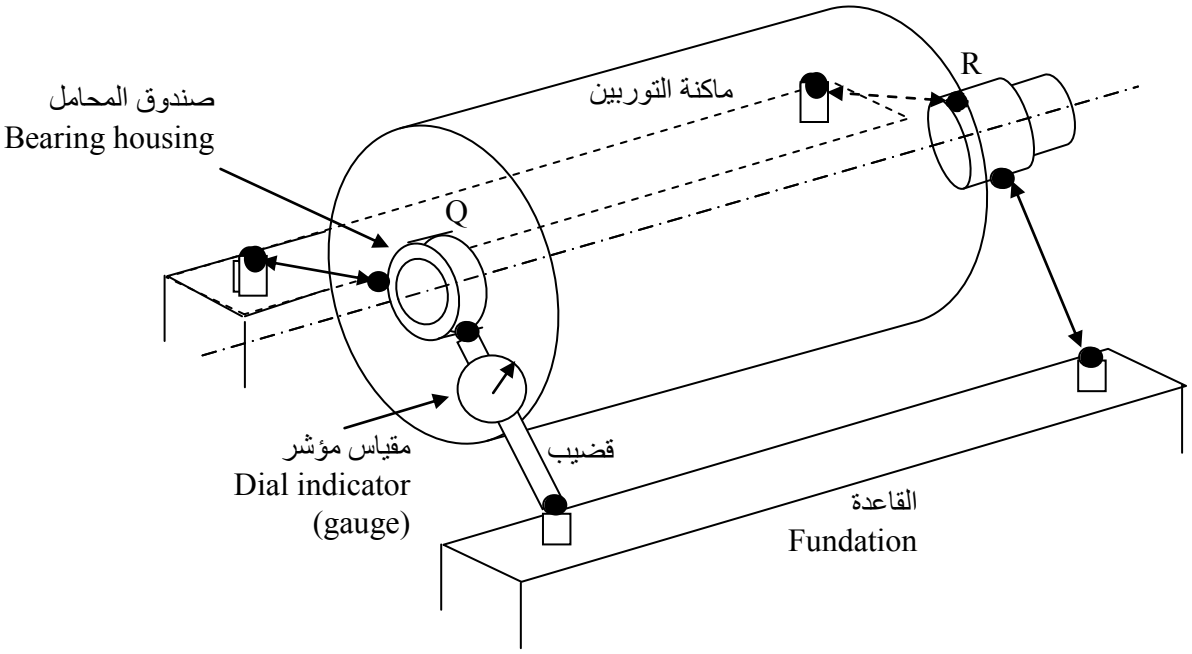
ومن الواضح أن الطريقتين اعلاه تعطيان القياسات والماكنة متوقفة عن العمل (Cold Alignment) وبمقادير مطلقة للحيد والحيد الزاوي .

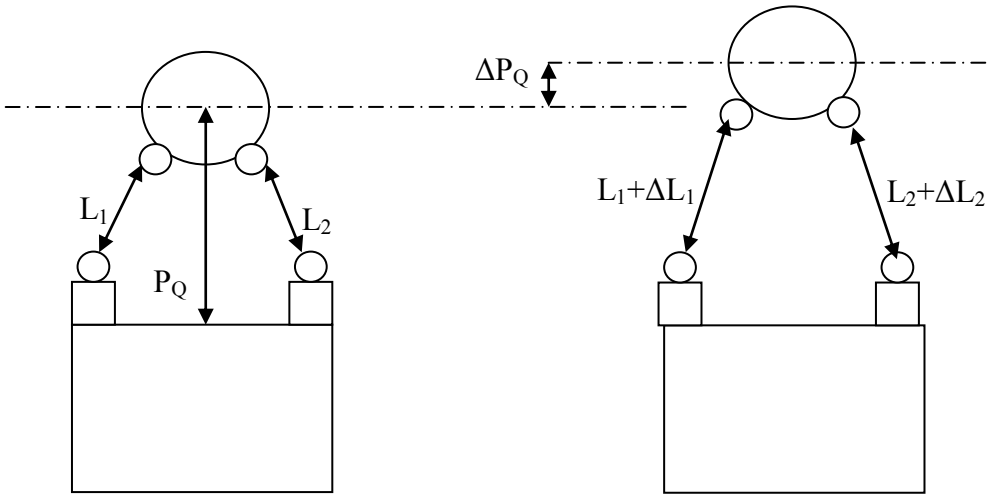


Reverse-dial indicator setup.

طريقة الاكيولاين Acculign Method :

وفي هذه الطريقة تجرى القياسات على الماكنة وهي شغالة (.Hot Align) وتعطى مقادير الحيد والحيد الزاوي بمقادير نسبية حسب تغير درجات الحرارة في الماكنة وكما سيتضح ذلك مع الشرح الاتي وتستخدم لغرض القياس نقاطاً ثابتة على قاعدة التوربين على شكل كرات ملساء (Tooling Ball) لتثبيت معدات القياس عليها وتستخدم مثل هذه الكرات على جهتي التوربين . ويثبت مقياس مؤشر (Dial Indicator) من نوع الساعة على قضيب للقياس ويثبت طرف من هذا القضيب على احدى الكرات الماساء ويثبت طرفه الآخر على صندوق المحامل (Bearing Housing) أو اقرب نقطة إلى المحامل وكما مبين في الشكل المخطط ادناه





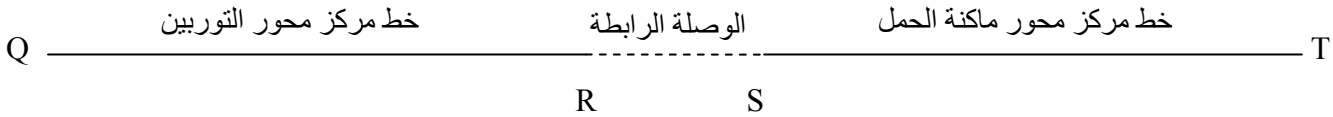
المقادير المقاسة ΔP_Q
على جانبي التوربين ΔL_1
ΔL_2

القياسات عند سكون الماكنة
Cold Alignment

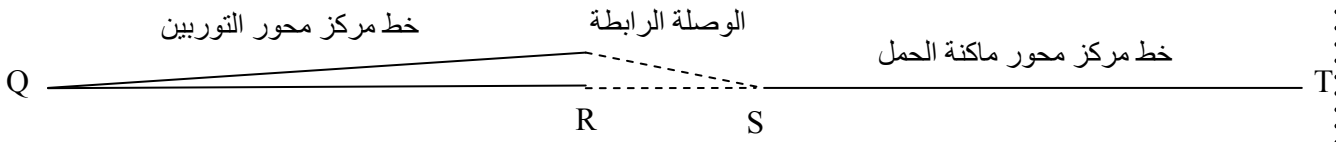
القياسات عند اشتغال الماكنة
Hot Alignment

في هذه الطريقة تسجل القياسات المبينة في الشكل مرتين ، مرة عندما تكون الماكنة متوقفة عن العمل (Cold Align.) ومرة عندما تكون الماكنة قد اشتغلت لمدة 24 ساعة على الاقل لتبلغ درجة حرارة مستقرة (Hot Align.) وتكون القياسات بأزواج على جانبي التوربين وتقارن القياسات في المرتين ويكون الفرق في ازواج القياسات هو مقدار التغير ΔP_0 ، ΔL_1، ΔL_2 هو التغير في الاطوال نتيجة ارتفاع درجة حرارة الماكنة والمحامل ، ومن هذه المقادير يحتسب ويرسم وضع خط مركز ماكنة التوربين في وضعي السكون والاشتغال ، وبنفس الطريقة تماما تقاس نفس المقادير لماكنة الحمل ويرسم خط مركزها في وضعي السكون والاشتغال ، ومن رسم خطي مركز الماكنتين يمكن تحديد مقدار الحيد والحيد الزاوي لهما في حالتي السكون والاشتغال .

أ- وضع المكائن في حالة السكون:-



ب- وضع المكائن في حالة الاشتغال:-

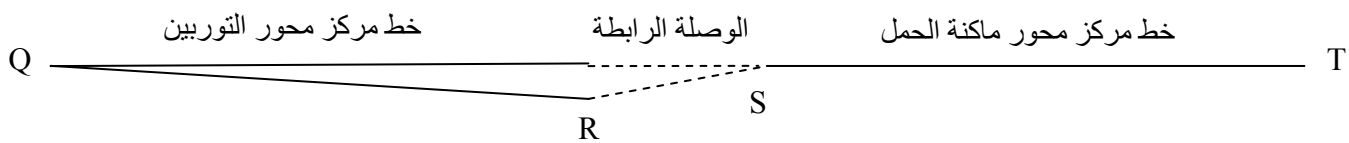


وضعية خطي مركزي محوري التوربين وماكنة الحمل قبل التعديل

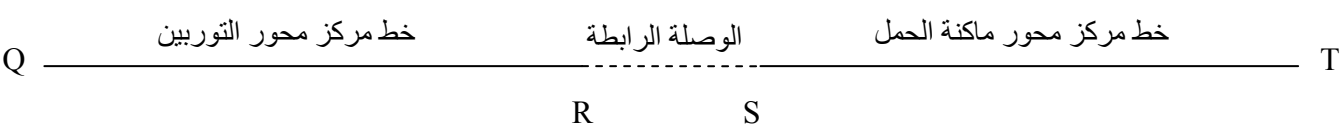
ويظهر في الرسم اعلاه أنه نتيجة ارتفاع درجة الحرارة فأن نقطة R وهي نهاية التوربين من جهة الوصلة الرابطة قد ارتفعت وكذلك ارتفعت نقطة (S) وهي نهاية ماكنة الحمل من جهة الوصلة الرابطة .

ولغرض تعديل وضعية الماكنتين والحصول على تطابق خط مراكز المكائن وهما في حالة شغالة وجعل الخطين المستقيمين QR , ST يقعان على خط واحد ، نجعل نقطة R وكذلك نقطة S منخفضة عن T, Q بتحريك ماكنتي التوربين والحمل أو احدهما (عادة ماكنة الحمل) وهي في حالة السكون .

أ- وضع المكائن في حالة السكون:-



ب- وضع المكائن في حالة الاشتغال:-



وضعية خطي مركزي محوري التوربين وماكنة الحمل قبل التعديل

وعند اشتغال الماكنتين ترتفع نقطة R عن Q ونقطة S عن T يسبب ارتفاع درجة حرارة التوربين وماكنة الحمل فتصبح حالة المستقيمين QR و ST في تطابق .

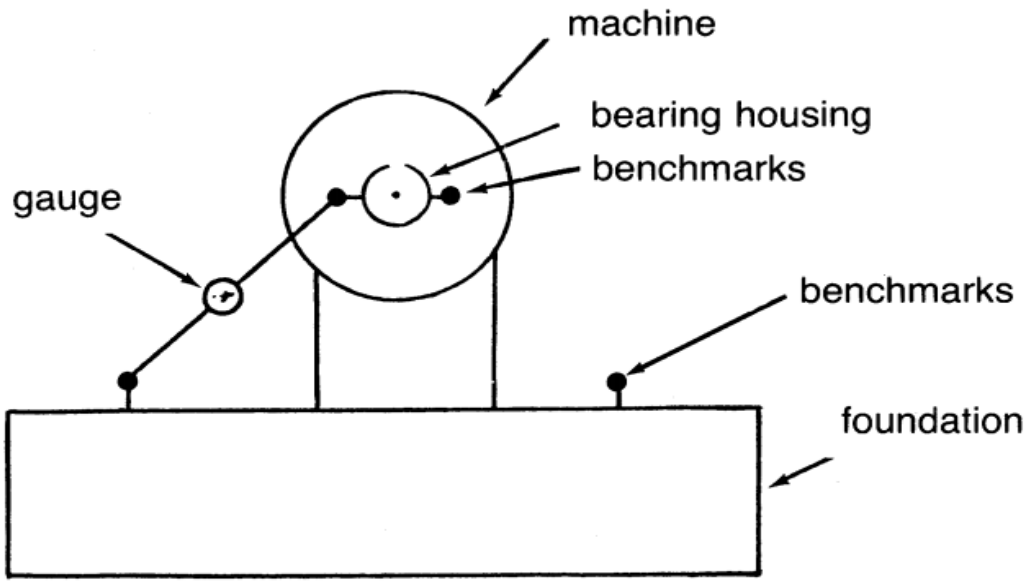
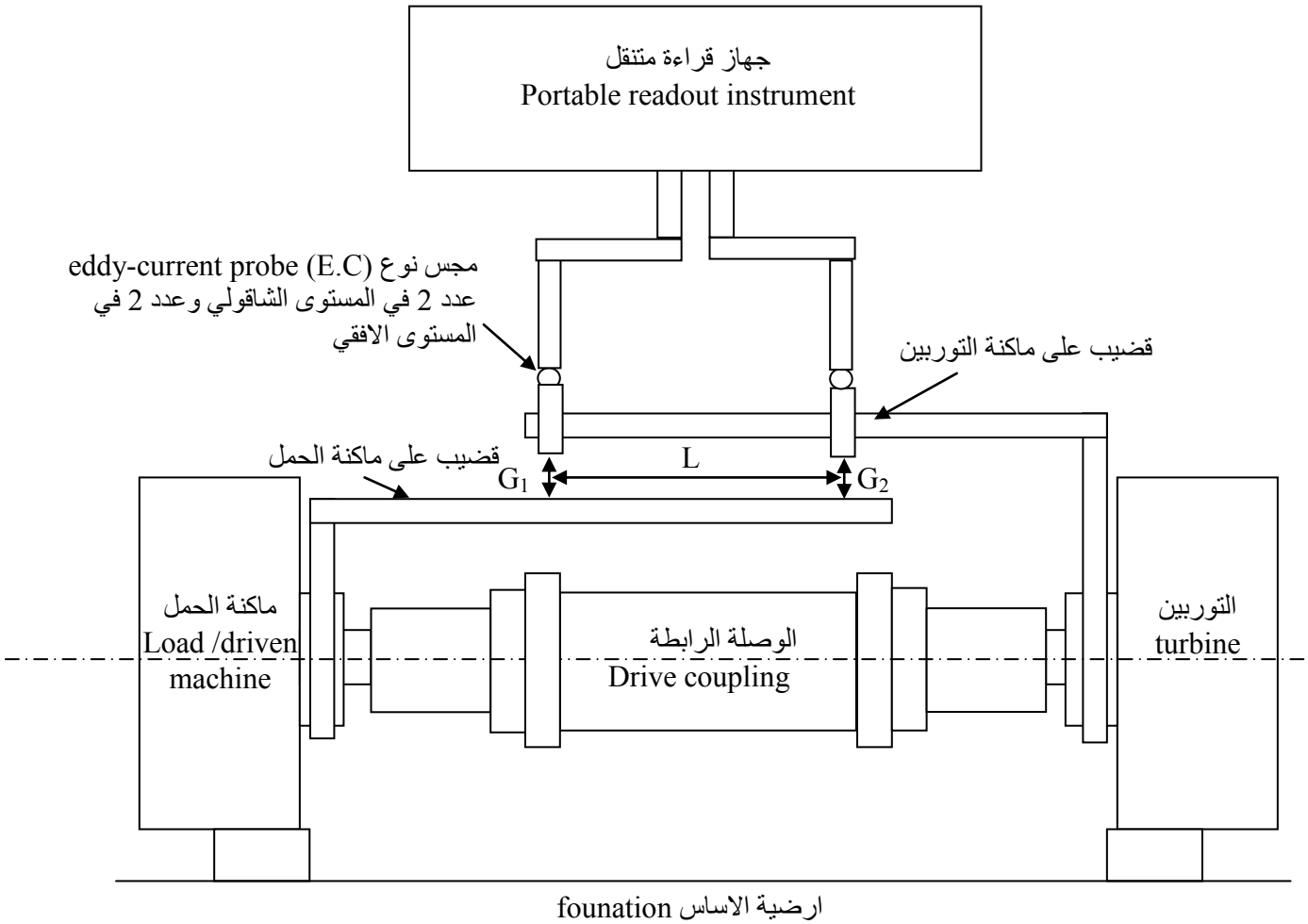


Fig alignment system with dial indicator.

طريقة داينالين Dvnalign Method :



في هذه الطريقة نستخدم اربعة مجسات من نوع (Eddy Current Probes) . اثنان منها تثبت على قضيب (Bar) يثبت على صندوق محمل التوربين من جهة الوصلة الرابطة في المستوى الشاقولي كما في الرسم . ويقيس هذان المجسان المسافة بينهما وبين قضيب آخر مثبت على صندوق محامل ماكنة الحمل (G1, G2) . ويتصل هذان المجسان بجهاز قراءة متنقل يحسب من قراءة G1, G2 ومعرفة المسافة بين المجسان (L) مقدار التغير في الحيد والحيد الزاوي بين حالة الماكنة في وضع التوقف ووضع الماكنة في حالة التشغيل . ولمعرفة مقدار الحيد والحيد الزاوي (Offset & Angula Misalig) يجب معرفة مقدارهما في وضع الماكنة وهي متوقفة بواسطة طريقة أخرى مثل طريقة المؤشرين أو طريقة المؤشر المعاكس المشروحة آنفاً . وذلك للتوصل لمعرفة هذين المقدارين والماكنة في حالة التشغيل .

الطريقة البصرية Optical Method :

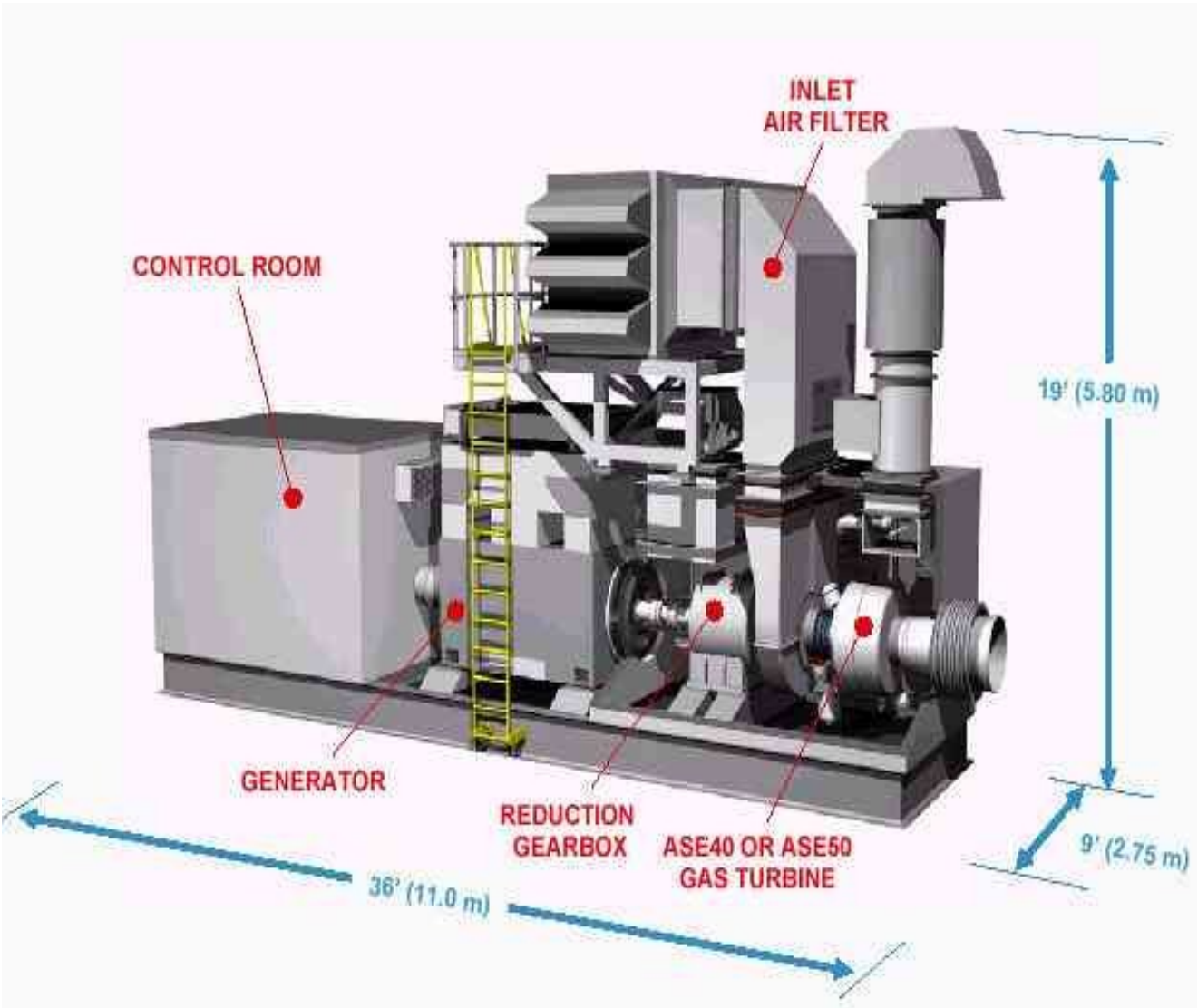
يستخدم في هذه الطريقة جهاز قياس مستوى دقيق (Accurate Level) مع عدة شواخص Sighting Scales . وتثبت هذه الشواخص على النقاط المراد قياس ارتفاعها مثلاً على نهاية المحور الدوار للتوربين ونهاية المحور الدوار لماكنة الحمل أو على صندوق المحامل وعلى قاعدة التوربين ، وعند تحديد ارتفاعات هذه النقاط بدقة لحد (0.0015) والمسافات بين هذه النقاط يمكن تحديد الحيد (Offset) والحيد الزاوي (Angular Misalign) في حالة توقف الماكنة وفي حالة اشتغالها . ومن المقارنة بين القياسات في هاتين الحالتين يمكن معرفة مقدار التغير في الحيد والحيد الزاوي بينهما .

طريقة اشعة الليزر :

وهذه الطريقة مشابهة للطرق البصرية المذكورة آنفاً ولكنها ادق واحدث وتستخدم اشعة الليزر كخط للنظر (Line of sight) . ويمكن تحديد موضع هذا الخط بدقة على شاشة قياس مدرجة فلا حاجة للجوء إلى استعمال الشواخص .

طريقة تحليل الاهتزازات :

وهذه الطريقة لاتعطي مقدار الحيد والحيد الزاوي كبقية الطرق لكنها تستخدم كدليل على وجود عدم تطابق المحاور (Misalignment) بين التوربين وماكنة الحمل ، فلدى تحليل الاهتزازات بأحدى الوسائل والاجهزة المخصصة لذلك يمكن التعرف على الاهتزازات الناتجة عن الـ (.Misalign) . وتتميز هذه الاهتزازات أن ذبذبتها على الاغلب تكون ½ سرعة الماكنة ولكنها قد تكون 1 , 2 , 3 , 4 مرات سرعة الماكنة . اما مقدار الاهتزاز فيكون كبيراً في المستوى الشاقولي والافقي ويكون مقدار في المستوى الموازي للمحور (Axial Position) بحدود % 70-150 من مقدار الاهتزاز في المستوى الشاقولي (Vertical) أو المستوى الافقي (Horizontal) .



المصادر:

- **Steam Turbines / Design, Applications, and Rerating / Second Edition** / Copyright © 2009 The McGraw-Hill Companies By Heinz P. Bloch & Murari P. Singh/ the United States Copyright
- **Steam turbines for modern fossil-fuel power plants**/Alexander S. Leyzerovich©2008 by The Fairmont Press/ Printed in the United States of America
- **Gas turbine Lectures by Dr. Eng. Sameh Shaaban** 10-May-2007 – helowan university – Egypt
- **Elements of propulsion gas turbines and rockets** / by jack D. mattingly, professor emeritus department of mechanical engineering,Washington Copyright © 2006
- **Gas Turbine Handbook Principles and Practices** /3rd Edition/by Tony Giampaolo, MSME, PE /Copyright ©2006 by The Fairmont Press
- **Power generation handbook** / selection, applications, operation, and maintenance / By Philip kiameh /Copyright © 2004 The McGraw-Hill Companies
- **Gas Turbine Performance/ Second Edition**/by Philip P. Walsh BSc, FRAeS, CEng Head of Performance and Engine Systems Rolls-Royce plc/ Copyright © 2004 Blackwell Science Ltd
- **Fundamentals of gas turbine operation** (version 2.0 for windows)/ developed by systtran, Inc. Houston, texas /2002
- ***Thermodynamics: An Engineering Approach,*** *5th edition* by Yunus A.
- **Fundamentals of engineering thermodynamics,** SI version / Michael J. Moran, Howard N. Shapiro. -- 5th ed
- **دليل عمل المهندسين والفنين /التوربينات الغازية والبخارية**
  تأليف زكي حسن هادي –رئيس مهندسين- وزارة النفط / 1999
- **أساسيات الديناميكا الحرارية الكلاسيكية، الطبعة الثانية**
  جوردن.ج.فان وايلن،ترجمة الدكتور محسن سالم رضوان.