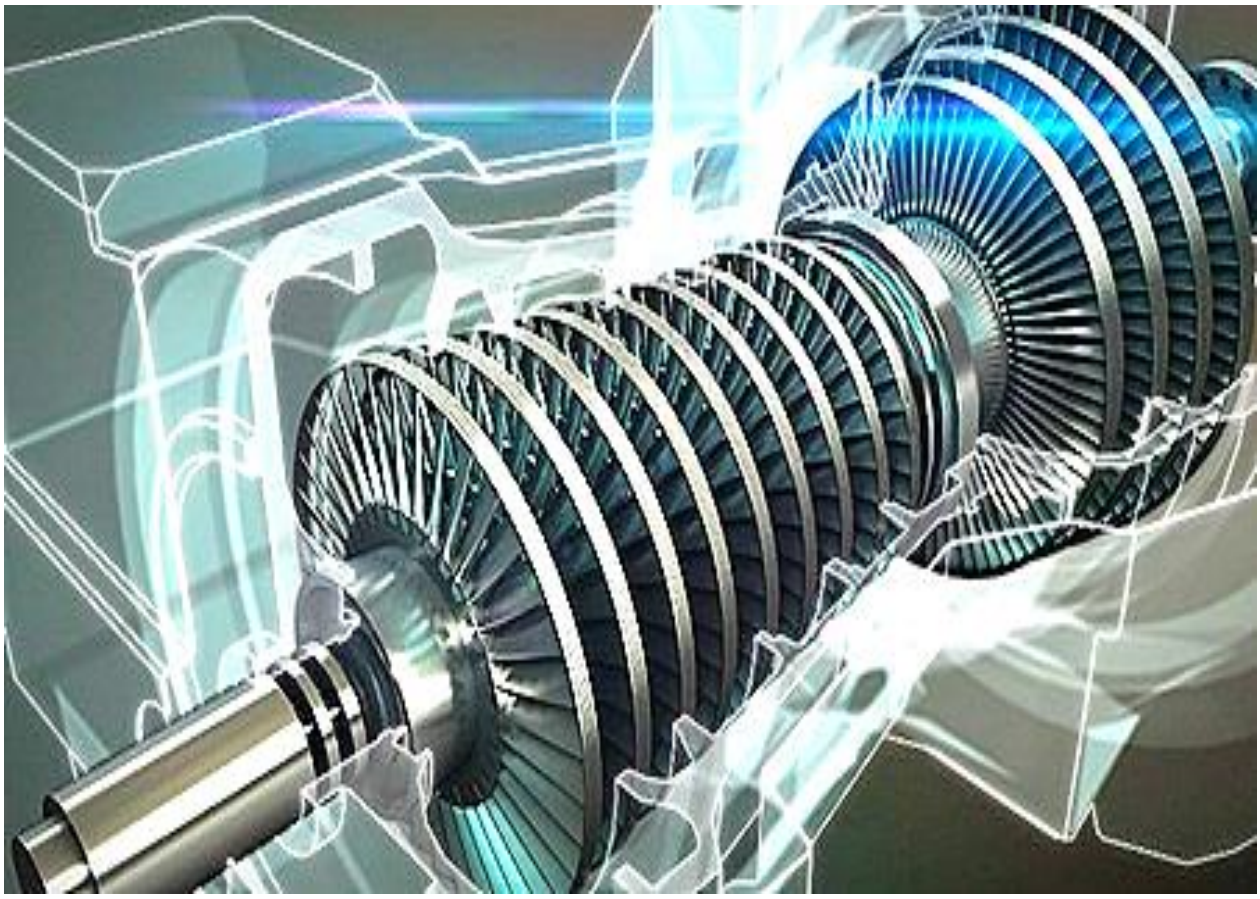
التوربينات البخارية



Steam Turbines

ترجمة وإعداد
المهندس عدنان بهجت جليل

التوربينات البخارية Steam Turbines

تعريف Definition

التوربين البخاري هو المحرك الأساسي Prime mover الذي يتم فيه تحويل الطاقة الكامنة Potential energy للبخار Steam إلى طاقة حركية Kinetic energy ، ثم يتحول بدوره إلى طاقة ميكانيكية Mechanical energy لتدوير عمود التوربين Turbine shaft .

تصنيف التوربينات البخارية Classification of steam turbines

١- حسب عمل أو فعل البخار According to the action of steam :

- **التوربين الدفعي Impulse turbine :** فيه يخرج البخار من خلال فوهات ثابتة Fixed nozzle بسرعة عالية جدا لتصطدم أو تضرب الريش Blades المثبتة على محيط المحور الدوار Rotor . والتي تغير إتجاه تدفق البخار دون تغيير ضغطه Pressure . القوة الناتجة عن التغيير في قوة الدفع (الزخم) Momentum ستسبب دوران عمود التوربين . مثال : توربينات دي لافال De-Laval و كورتيس Curtis و راتو Rateau وهي أنواع من التوربينات المختلفة في طريقة تركيب مراحل الريش .

ملاحظة توضيحية : توربين دي لافال De-Laval نسبة إلى المهندس السويدي غوستاف دي لافال Gustaf de Laval (١٨٤٥- ١٩١٣) مخترع التوربين الدفعي . وتوربين كورتيس Curtis نسبة إلى جارلس غوردون كورتيس C.G. Curtis (١٨٦٠- ١٩٥٣) مخترع أمريكي أبتكر التوربين البخاري المسماة بأسمه والذي يُستخدم على نطاق واسع في محطات توليد الطاقة الكهربائية وفي الدفع البحري ، كما يرجع الفضل إليه في إختراع أول توربين غازي أمريكي . وتوربين راتو Rateau نسبة إلى المهندس الفرنسي أوغست كميل إدموند راتو Auguste Rateau (١٨٦٣- ١٩٣٠) المتخصص في التوربينات .

- **توربين رد الفعل Reaction turbine :** فيه يتمدد البخار في الريش الثابتة والمتحركة Fixed and Moving blades بإستمرار مع مرور البخار عبرها . ويحدث إنخفاض بالضغط Pressure drop بالتتابع خلال كل من الريش المتحركة والثابتة .
- **التوربين المركب (دفعي ورد فعلي) Combination of impulse and reaction turbine**

٢- حسب عدد مراحل الضغط According to the number of pressure stages :

- **توربينات أحادية المرحلة Single stage turbines :** تستخدم هذه التوربينات في الغالب لإدارة ضواغط وناقخات الطرد المركزي Centrifugal compressors & Blowers وغيرها من الآلات والماكينات Machinery المماثلة .
- **توربينات دفعية ورد فعلية متعددة المراحل Multistage Impulse and Reaction turbines :** يتم تصنيعها على نطاق واسع بسعات قدرة Power capacities مختلفة .

٣- حسب نمط تدفق البخار According to the type of steam flow :

- **التوربينات المحورية Axial turbines :** في هذه التوربينات ، يتدفق البخار في إتجاه موازي للمحور الدوار في التوربين .
- **التوربينات الشعاعية Radial turbines :** في هذه التوربينات ، يتدفق البخار في إتجاه عمودي على محور التوربين ، تكون واحدة أو أكثر من مراحل الضغط المنخفض محورية .

٤- حسب عدد أعمدة الدوران According to the number of shafts :

- **توربينات أحادية العمود Single shaft turbines .**
- **توربينات متعددة الأعمدة Multi-shaft turbines .**

٥- حسب طريقة التحكم أو السيطرة According to the method of governing :

- **توربينات ذات التحكم بصمام خانق Turbines with throttle governing :** في هذه التوربينات ، يدخل البخار النقي عبر واحد أو أكثر (حسب تنامي القدرة) من صمامات الخنق Throttle valves التي تعمل في وقت واحد .
- **توربينات ذات التحكم بالفوهة أو المنفث Turbines with nozzle governing :** في هذه التوربينات ، يدخل البخار النقي من خلال واحد أو أكثر من المنظمات أو الحواكم Regulators التي تُفتح على التوالي
- **توربينات ذات تحكم جانبي أو إلتفافي Turbines with by-pass governing :** في هذه التوربينات ، إلى جانب المرحلة الأولى يتم تغذية البخار مباشرة إلى واحدة أو أثنتين أو حتى ثلاثة من المراحل الوسطية Intermediate stages في التوربين .

٦- حسب عملية إنخفاض الحرارة According to the heat drop process :

- **توربينات التكثيف مع المولدات Condensing turbines with generators :** في هذه التوربينات ، يتم توجيه البخار بضغط أقل من الضغط الجوي Atmospheric pressure إلى المكثف Condenser . كما يتم إستخراج البخار من المراحل الوسطية لتسخين مياه التغذية Feed water . يتم فقدان الحرارة الكامنة Latent heat بالكامل من بخار العادم Exhaust steam خلال عملية التكثيف في هذه التوربينات .
- **توربينات التكثيف مع واحدة أو أكثر من عمليات الإستخراج في المرحلة الوسيطة Condensing turbines with one or more intermediate stage extractions** : في هذه التوربينات ، يتم إستخراج البخار من المراحل الوسطية لأغراض التسخين والتدفئة الصناعية Industrial heating .
- **توربينات الضغط الراجع أو الإرتدادي Back pressure turbines :** في هذه التوربينات ، يتم إستخدام بخار العادم للأغراض الصناعية أو التسخين . يمكن أيضا إستخدام التوربينات ذات الفراغ المتدهور (الأقل جودة) Deteriorated vacuum حيثما يمكن إستخدام بخار العادم لأغراض التدفئة والمعالجة .
- **توربينات الضغط العالي بدون تكثيف Topping turbines :** في هذه التوربينات ، يتم إستخدام بخار العادم في توربينات تكثيف الضغط المتوسط والمنخفض Medium and low pressure condensing turbines . تعمل هذه التوربينات في ظروف تشغيل أولية عالية لضغط ودرجة حرارة البخار Steam pressure and temperature ، وتستخدم في الغالب أثناء تمديد أو توسيع قدرات محطات الطاقة Power station ، بهدف الحصول على كفاءات Efficiencies أفضل .

ملاحظة توضيحية : High pressure, non-condensing turbine = Topping turbine

٧- حسب ظروف البخار في مدخل التوربين :

According to the steam conditions at inlet to turbine

- **توربينات الضغط المنخفض Low pressure turbines :** تستخدم هذه التوربينات البخار عند ضغط من (١،٢ إلى ٢ بار Bar) .
- **توربينات الضغط المتوسط Medium pressure turbines :** تستخدم هذه التوربينات البخار حتى ضغط (٤٠ بار) .
- **توربينات الضغط العالي High pressure turbines :** تستخدم هذه التوربينات البخار عند ضغط أعلى من (٤٠ بار) .
- **توربينات الضغط العالي جدا Very high pressure turbines :** تستخدم هذه التوربينات البخار عند ضغط (١٧٠ بار) وأعلى ودرجات حرارة (٥٥٠ درجة مئوية C°) وأعلى .
- **توربينات الضغط فوق الحرج Supercritical pressure turbines :** تستخدم هذه التوربينات البخار عند ضغط (٢٢٥ بار) وأكثر .

٨- حسب إستخدامها في الصناعة According to their usage in industry :

- **توربينات ثابتة ذات سرعة دوران ثابتة :**

Stationary turbines with constant speed of rotation

تستخدم هذه التوربينات في المقام الأول لإدارة مولدات التيار المتناوب Alternators .

- **توربينات ثابتة ذات سرعة دوران متغيرة :**

Stationary turbines with variable speed of rotation

هذه التوربينات مخصصة لإدارة النافخات التوربينية Turbo-blowers ومراوح تدوير الهواء Air circulators والمضخات Pumps وغيرها .

- **التوربينات غير الثابتة ذات السرعة المتغيرة** Non-stationary turbines with variable speed :

تستخدم هذه التوربينات عادة في البواخر(وسائط النقل البخارية) Steamers والسفن Ships وقاطرات السكك الحديدية Railway locomotives .

مزايا التوربينات البخارية على المحركات البخارية

Advantages of steam turbines over steam engines

١- الكفاءة الحرارية Thermal efficiency أعلى بكثير .

٢- نظراً لعدم وجود أجزاء ترددية Reciprocating parts ، فمن الممكن تحقيق توازن Balancing مثالي وبالتالي لا تكون هناك حاجة إلى و أساس ثقيل Heavy foundation .

٣- يمكن تحقيق مدى سرعات أعلى و أكبر .

٤- تكون عملية التزييت Lubrication سهلة جدا حيث لا توجد أجزاء إحتكاكية Rubbing parts .

٥- يتم توليد القدرة بمعدل منتظم Uniform rate ، وبالتالي لا حاجة إلى دولاب الموازنة أو دولاب تنظيم السرعة Flywheel .

٦- معدل استهلاك البخار Steam consumption rate يكون أقل .

٧- أكثر إحكاما وتماسكا Compact وتتطلب إنتباه أقل أثناء التشغيل Operation .

٨- أكثر ملاءمة لمحطات القدرة Power plants الكبيرة .

٩- تكلفة صيانة Maintenance cost أقل ، لبساطة بنيتها Construction وتشغيلها بدرجة كبيرة بسبب عدم وجود أجزاء مثل المكبس Piston ، ذراع المكبس Piston rod ، رأس متقاطع (صليبي) Cross head ، ذراع التوصيل Connecting rod .

١٠- يمكن تحميل أحمال زائدة كبيرة Overloads على حساب إنخفاض طفيف في الكفاءة الكلية Overall efficiency .

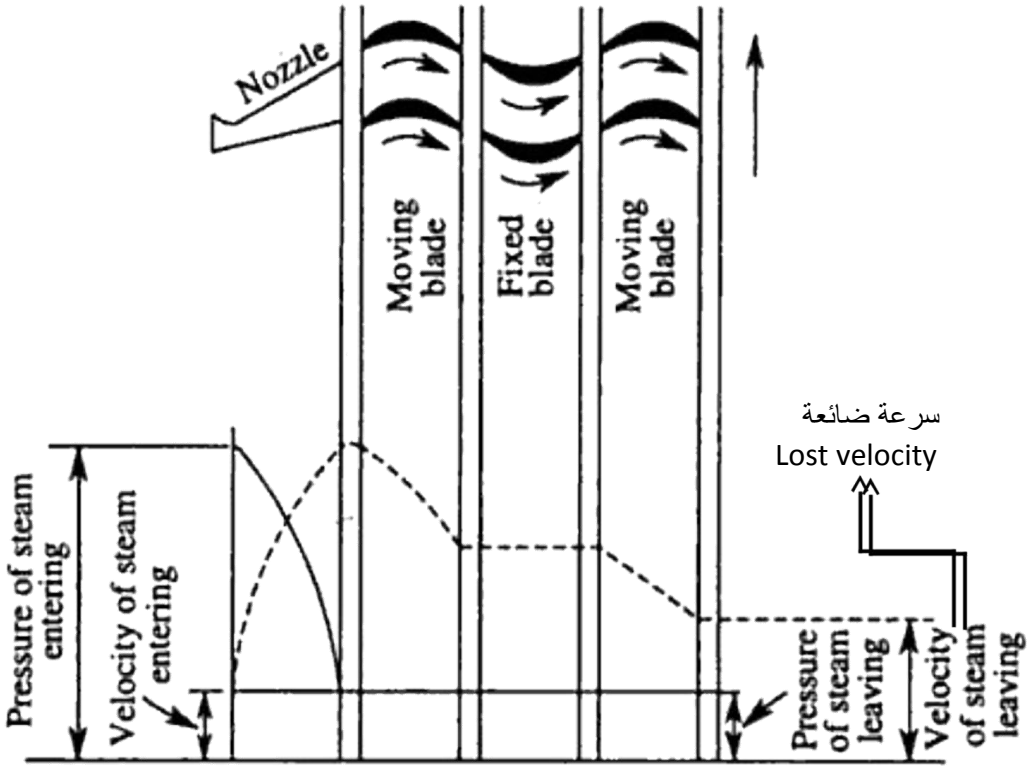
طرق تقليل سرعة المحور الدوار Methods of reducing rotor speed

(التركيب المضاعف للتوربينات Compounding of turbines)

إذا سمح للسرعة العالية للبخار بالتدفق خلال صف واحد من الريش المتحركة Moving blades ، فإنه ينتج سرعة دورانية تبلغ حوالي (٣٠٠٠٠ دورة في الدقيقة rpm) وهي عالية جدًا للإستخدام العملي . لذلك من الضروري إدخال بعض التحسينات Improvements للإستخدام العملي وأيضا لتحقيق أداء عالي High performance . وهذا ممكن أن يتم من خلال الإستفادة من أكثر من مجموعة من الفوهات Nozzles والريش المتحركة ، في سلسلة موصولة بإحكام إلى العمود الدوار بحيث يتم إمتصاص ضغط البخار أو سرعة التدفق (النفث) Jet velocity من قبل التوربين على مراحل . وهذا ما يسمى بالتركيب المضاعف للتوربينات

يمكن تقليل سرعة الدوران Rotational speed العالية للتوربين بالطرق التالية من التركيب :
١- تركيب السرعة Velocity compounding .
٢- تركيب الضغط Pressure compounding .
٣- تركيب السرعة و الضغط Pressure-Velocity compounding .

تركيب السرعة Velocity compounding :



الشكل (١) تركيب السرعة Velocity compounding

يتكون هذا التركيب من مجموعة من الفوهات وبعض الصفوف من الريش المتحركة التي يتم تثبيتها على العمود الدوار و صفوف من الريش الثابتة Fixed blades المرتبطة بالغلاف .
كما هو موضح في الشكل (١) ، يتم فصل صفين من الريش المتحركة بواسطة صف واحد من الريش الثابتة .
أولا يدخل البخار بسرعة عالية الصف الأول من الريش المتحركة ، حيث يتم امتصاص جزء من السرعة .
ثم يدخل حلقة من الريش الثابتة حيث يتم تغيير إتجاه البخار لتتناسب مع الحلقة الثانية من الريش المتحركة . لا يوجد تغير في السرعة عند مرور البخار فوق الريش الثابتة .
ثم يمر البخار إلى الصف الثاني من الريش المتحركة حيث يتم تقليل السرعة بشكل أكبر. وهكذا يحدث إنخفاض بالسرعة في كل مرة يمر فيها البخار فوق صف الريش المتحركة . وهكذا يترك البخار التوربين بسرعة منخفضة .
يظهر التباين في ضغط وسرعة البخار أثناء مروره على الريش المتحركة والثابتة في الشكل (١) . يتضح من الشكل أن إنخفاض الضغط يحدث فقط في الفوهة ولا يوجد مزيد من الإنخفاض في الضغط أثناء مروره على الريش المتحركة .

يتم إستخدام طريقة تركيب السرعة في توربين كورتيس Curtis turbine بعد أن تم اقتراحه لأول مرة من قبل كورتيس C.G. Curtis .

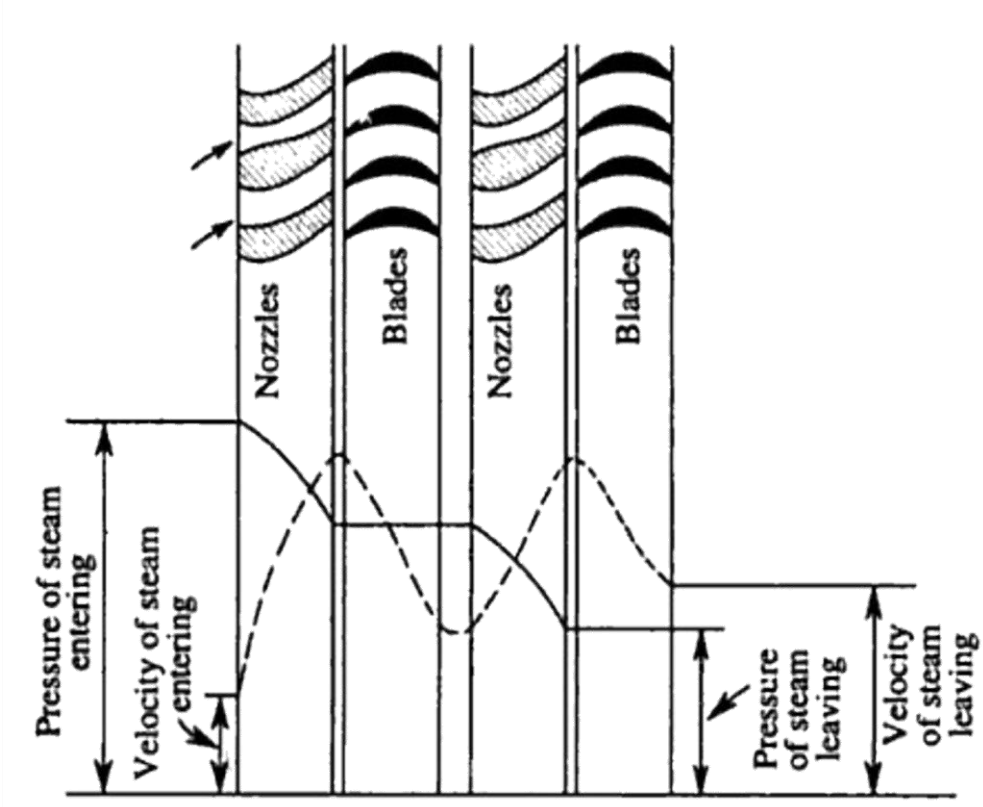
المزايا Advantages :

١- يكون التركيب بعدد قليل من المراحل وبالتالي يكون بتكلفة أولية Initial cost قليلة .
٢- يحتاج التركيب إلى حيز أو مساحة قليلة Less space .
٣- المنظومة ذات موثوقية Reliable وسهولة في التشغيل .
٤- يكون هبوط الضغط في الفوهة كبير ، لذا لا تحتاج التوربينات نفسها إلى العمل في وسط أو محيط ذو ضغط عالي ، ولا يكون غلاف أوغطاء التوربين Turbine housing قوي للغاية .

المساوىء Disadvantages :

١- مزيد من خسائر الإحتكاك Friction losses بسبب السرعة العالية جدا في الفوهات .
٢- كفاءة أقل لأن نسبة سرعة الريشة Blade velocity إلى سرعة البخار Steam velocity ليست مثالية Optimum .
٣- القدرة المتنامية في الصفوف اللاحقة ليست سوى جزء صغير من الصف الأول .
٤- لا تزال جميع المراحل تتطلب بعض المساحة والمواد Material والتكلفة .

تركيب الضغط Pressure compounding :



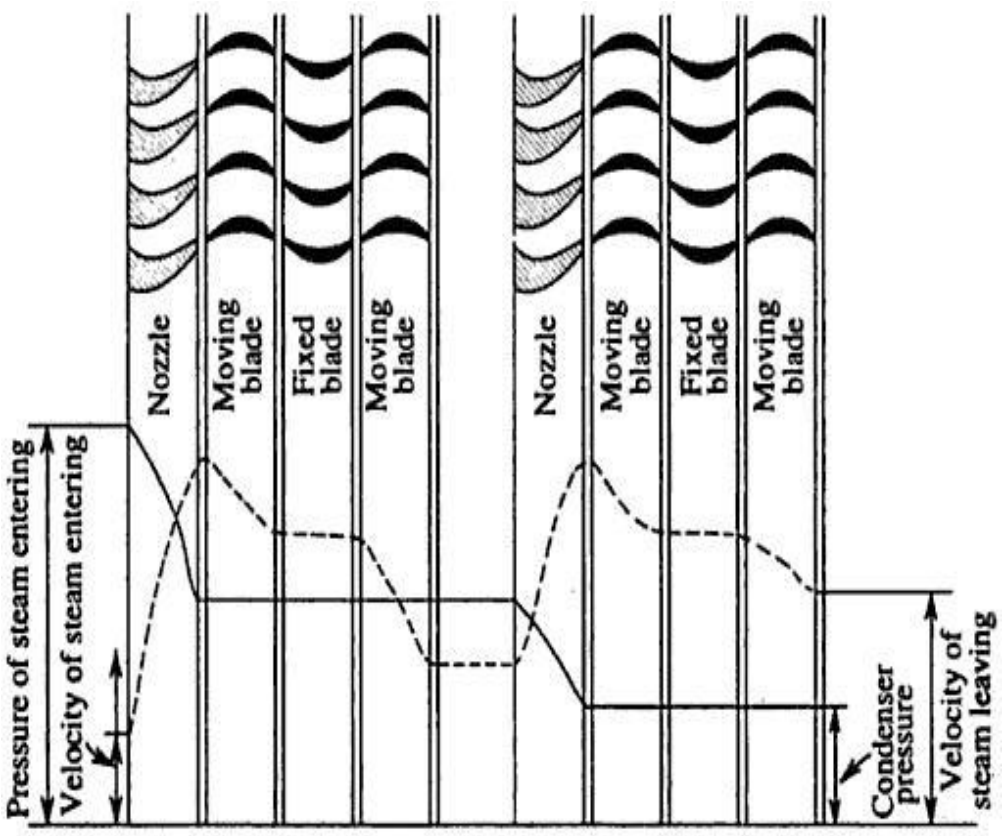
الشكل (٢) تركيب الضغط Pressure compounding

يتكون من عدد من الفوهات الثابتة Fixed nozzles التي يتم دمجها بين حلقات الريش المتحركة . هذه الريش تكون متصلة بأحكام إلى عمود الإدارة . في هذا التركيب يتم خفض الضغط في عدد من المراحل . كل مرحلة تتكون من مجموعة من الفوهات وحلقة من الريش المتحركة .
يمر البخار من المرجل Boiler خلال أول مجموعة من الفوهات حيث يتمدد Expand بشكل جزئي . ويتم إمتصاص كل سرعته تقريبا عندما يمر فوق المجموعة الأولى من الريش المتحركة . ثم يتم تمريره أيضا إلى المجموعة الثانية من الفوهات الثابتة حيث يتم تمدده جزئيا مرة أخرى ومن خلال المجموعة الثانية من الريش المتحركة حيث يتم إمتصاص سرعة البخار تقريبا . وهكذا تتكرر هذه العملية حتى يترك البخار التوربين عند ضغط المكثف Condenser pressure .
من خلال تقليل الضغط على مراحل ، يتم تقليل سرعة البخار الذي يدخل إلى الريش المتحركة إلى حد كبير. ومن ثم يتم تقليل سرعة المحور الدوار . طريقة التركيب هذه تستخدم في توربينات راتو وزولي Rateau & Zoelly turbines .

ملاحظة توضيحية : هاينريش زولي Heinrich Zoelly (١٨٦٢-١٩٣٧) مهندس مكسيكي – سويسري ، قام بتطوير التوربينات البخارية والقاطرات التي تحركها التوربينات .

تركيب السرعة و الضغط Pressure-Velocity compounding :

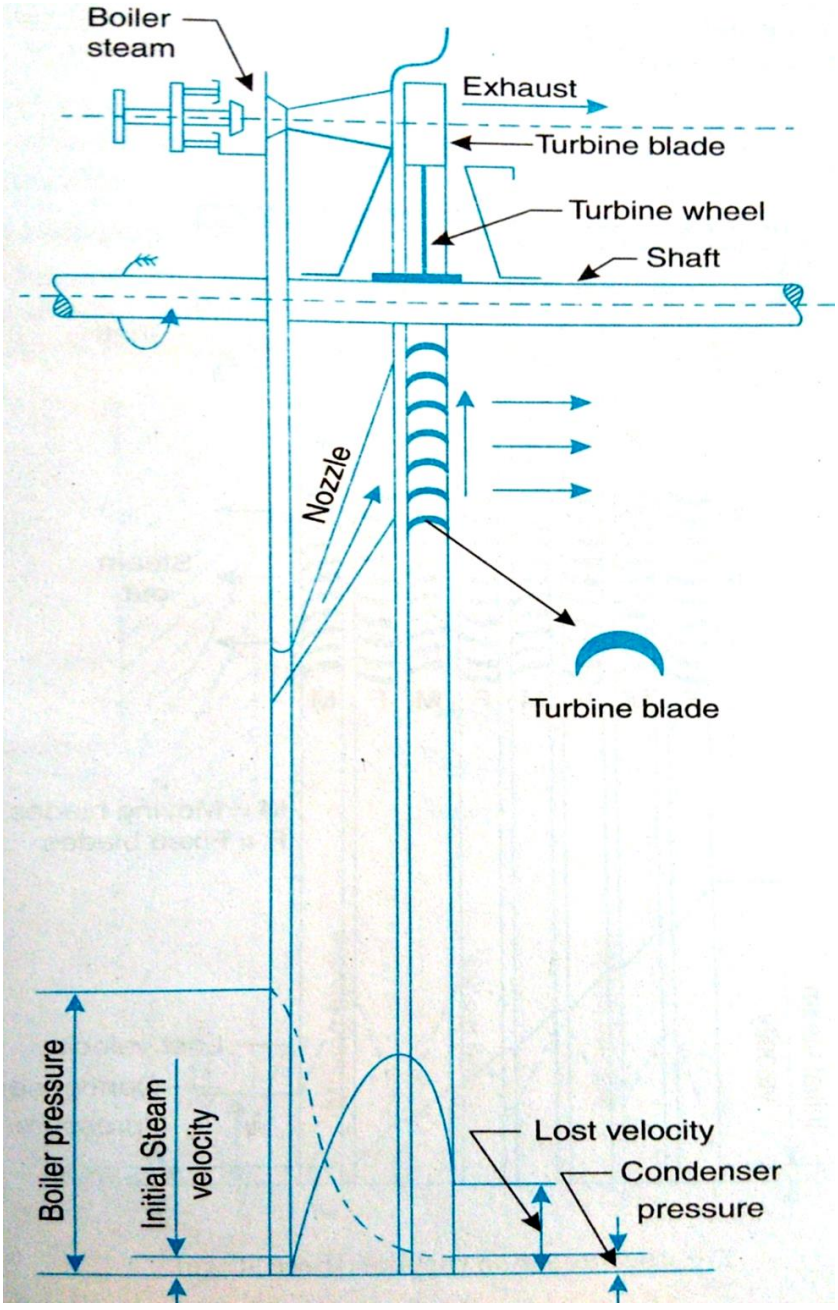
١- في هذه الطريقة من التركيب ، يتم إستخدام كل من تركيب الضغط والسرعة .
٢- يتم إجراء الإنخفاض أو الهبوط Drop الكامل في ضغط البخار على مرحلتين ، كما تتضاعف السرعة المكتسبة التي يتم الحصول عليها في كل مرحلة .
٣- يتم تثبيت حلقة الفوهات في بداية كل مرحلة ويبقى الضغط ثابتا خلال كل مرحلة .
٤- يتم إستخدام طريقة التركيب هذه في توربين كورتيس و في أكثر التوربينات .



الشكل (٣) تركيب السرعة و الضغط Pressure-Velocity compounding

مبدأ التوربين الدفعي البسيط Simple impulse turbine principle

يتكون التوربين الدفعي البسيط أساسا من فوهة Nozzle أو مجموعة من الفوهات ، ومحور دوّار Rotor مثبت على عمود Shaft ، ومجموعة واحدة من الريش المتحركة المرتبطة بالمحورالدوار وغلاف Casing . يطلق على هذه التوربينات أسم التوربينات الدفعية البسيطة نظرا لأن تمدد البخار Steam expansion يحدث في مجموعة واحدة من الفوهات . ويسمى التوربين الدفعي البسيط أيضا توربين De-Laval ، نسبة إلى مخترعها .



الشكل (٤) مبدأ التوربين الدفعي البسيط Simple impulse turbine principle

أساسيات التوربين الدفعي Basics of impulse turbine

في التوربين الدفعي ، يخرج البخار من خلال فوهة ثابتة بسرعة عالية جدا ، ويضرب الريش المثبتة على الحدود الخارجية للمحور الدوّار . التي تقوم بتغيير إتجاه تدفق البخار دون تغيير ضغطه . القوة الناتجة عن التغيير في قوة الدفع (الزخم) Momentum ستسبب دوران Rotation عمود التوربين
أمثلة : توربينات دي لافال وكورتيس وراتو ، كما مر ذكرها .
يتكون التوربين الدفعي أساسا من جزء دوّار Rotor مُثبت على عمود Shaft حر الدوران بإسناد مجموعة من المحامل Bearings . تحمل الحافة الخارجية للجزء الدوار مجموعة من الريش المنحنية ، ويتم وضع التركيب أو التجميع Assembly بأكمله في صندوق أو علبة محكمة الإغلاق Airtight case .
تقوم الفوهات بتوجيه البخار مباشرة ضد الريش وتدوير المحور(الجزء الدوار) . تُستمد الطاقة اللازمة لدوران التوربين الدفعي من الطاقة الحركية Kinetic energy للبخار الذي يتدفق من خلال الفوهات .
إن مصطلح الدفع Impulse يعني أن القوة التي تدير التوربين تأتي من تأثير دفع أو تصادم البخار على الريش يمكن إستخدام لعبة الدولاب Toy Pinwheel (وهي لعبة دولاب الهواء الذي يدور بتأثير الرياح) لدراسة بعض المبادئ الأساسية للتوربينات . فعند الضرب أو النفخ على حافة الدولاب ، سيدور بسرعة . وكلما كانت الضربة أو النفخة أقوى ، كلما دار الدولاب أسرع .
يعمل التوربين البخاري على نفس المبدأ ، إلا أنه يستخدم الطاقة الحركية من البخار الخارج من فوهة البخار بدلا من الهواء .
توجد فوهات البخار عند مدخل التوربين Turbine inlet . وعندما يمر البخار عبر فوهة البخار ، يتم تحويل الطاقة الكامنة Potential energy إلى طاقة حركية . يتم توجيه هذا البخار نحو ريش التوربين ويدور المحور الدوار . ويتم تقليل سرعة البخار عند المرور خلال الريش ، وقد تم نقل بعض من طاقتها الحركية إلى الريش لتدوير المحور الدوار .
يمكن إستخدام التوربينات االدفعية لتشغيل و توجيه نافخات السحب القسري Forced draft blowers والمضخات Pumps وتوربينات الدفع الرئيسية Main propulsion turbines .

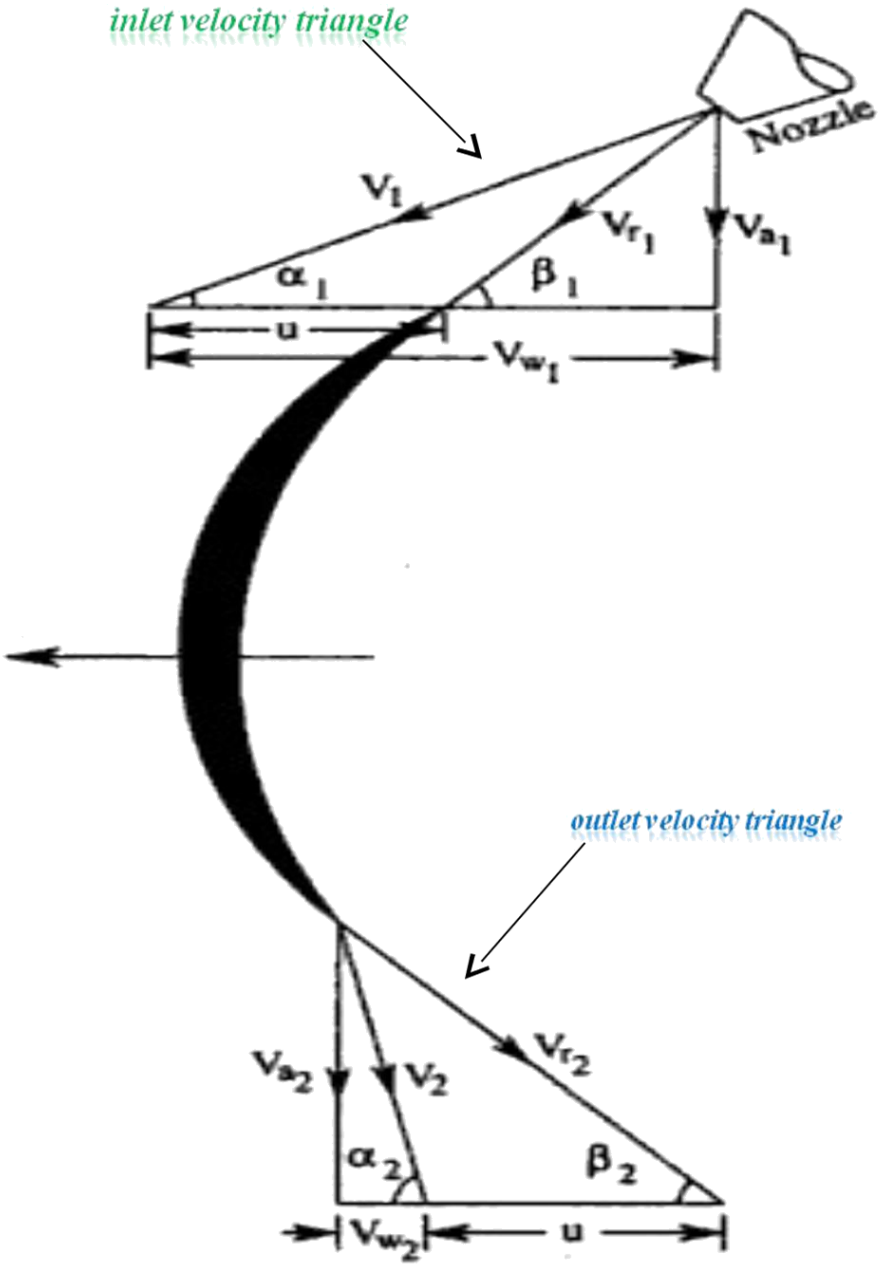
تركيب وعمل التوربين الدفعي Construction and working of impulse turbine

يُظهر الجزء العلوي من الشكل (٤) مقطعا طوليا للنصف العلوي من التوربين . الجزء الأوسط يبين الشكل الفعلي للفوهة و تركيب الريشة Blading . ويوضح الجزء السفلي تغير السرعة المطلقة Absolute velocity والضغط المطلق Absolute pressure أثناء تدفق البخار خلال عبوره الفوهات والريش .
يحدث تمدد البخار من ضغطه الأولي (ضغط المرجل Boiler pressure) إلى الضغط النهائي (ضغط المكثف Condenser pressure) في مجموعة واحدة من الفوهات . وبسبب الهبوط العالي بالضغط في الفوهات ، ستزداد سرعة البخار في الفوهات . يترك البخار الفوهة بسرعة عالية جدا ويضرب ريش التوربين المركبة على دولاب بهذه السرعة العالية . و عادة يُعرف فقدان الطاقة نتيجة لسرعة الخروج العالية هذه بأنه خسارة مُرحّلة Carry over loss أو خسارة المغادرة Leaving loss أو خسارة العادم Exhaust loss أو خسارة سرعة المغادرة Leaving-velocity loss .
يبقى ضغط البخار ثابتا عندما يتحرك خلال الريش ولكن سرعته تقل . قد تصل سرعة الخروج (المغادرة أو الضائعة) إلى (٣,٣ ٪) من سرعة مخرج الفوهة .
أيضا بما أن كل الطاقة الحركية سيتم إمتصاصه بواسطة حلقة واحدة من الريش المتحركة فقط ، فإن سرعة الدولاب Wheel تكون مرتفعة للغاية تتراوح (من ٢٥٠٠٠ إلى ٣٠٠٠٠ دورة في الدقيقة RPM) .
ومع ذلك ، يمكن تقليل هذه السرعة أي (سرعة الدولاب أو سرعة المحور الدوار) من خلال إعتماد طريقة تركيب التوربينات Compounding of turbines .

مساوىء التوربين الدفعي Disadvantages of impulse turbine

١- بما أنه يجب إستيعاب أو إمتصاص كل الطاقة الحركية للبخار عالي السرعة في حلقة واحدة فقط من الريش المتحركة ، فإن سرعة التوربين عالية جدا ، أي ما يصل إلى (٣٠٠٠٠ دورة في الدقيقة) لأغراض عملية .
٢- سرعة البخار عند الخروج عالية بما فيه الكفاية مما يعني أن هناك خسارة كبيرة في الطاقة الحركية .

مخطط السرعة \ مثلث السرعة Velocity diagram (Velocity triangle)



الشكل (٥) مخطط السرعة \ مثلث السرعة Velocity diagram (velocity triangle)

توضيح مثلث السرعة الشكل (٥) :

V_1 = Absolute velocity of steam at inlet in m/s السرعة المطلقة للبخار عند المدخل متر\ثانية .

α_1 = Nozzle inlet angle زاوية مدخل الفوهة .

u = Blade velocity in m/s سرعة الريشة .

V_{r1} = Relative velocity of steam at inlet in m/s السرعة النسبية للبخار عند المدخل متر \ ثانية .

V_{w1} = Tangential velocity of steam at inlet in m/s السرعة المماسية للبخار عند المدخل متر\ثانية

V_{a1} = Axial velocity of steam at inlet in m/s السرعة المحورية للبخار عند المدخل متر\ثانية .

β_1 = Blade inlet angle زاوية مدخل الريشة .

β_2 = Blade outlet angle زاوية مخرج الريشة .

V_{r2} = Relative velocity of steam at outlet in m/s السرعة النسبية للبخار عند المخرج متر\ثانية .

V_{w2} = Tangential velocity of steam at outlet in m/s السرعة المماسية للبخار عند المخرج متر\ثانية

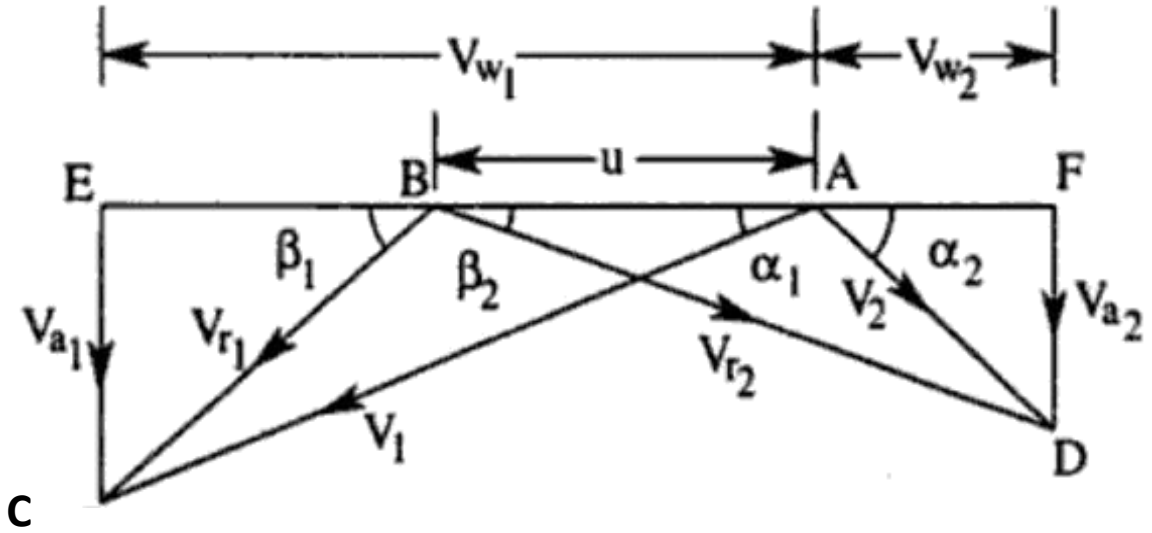
V_{a2} = Axial velocity of steam at outlet in m/s السرعة المحورية للبخار عند المخرج متر\ثانية .

V_{r2} / V_{r1} = Blade velocity coefficient معامل سرعة الريشة .

V_2 = Absolute velocity of steam at outlet in m/s السرعة المطلقة للبخار عند المخرج متر\ثانية .

α_2 = Angle made by absolute velocity V_2 with the tangent of the wheel at outlet زاوية ناتجة من إلتقاء السرعة المطلقة V_2 مع مماس الدولاب عند المخرج

ملاحظة : مثلث السرعة Velocity triangle هو مثلث يمثل مركبات السرعة المتنوعة لمائع التشغيل في الآلة التوربينية. يُمكن أن تُرسم مثلثات السرعة عند مدخل ومخرج الآلة التوربينية . يتم التعامل مع مركبات السرعة في المثلث بإعتبارها كميات متجهة ، ويتكون مثلث السرعة عادة من السرعة المماسية والسرعة المطلقة والسرعة النسبية للمائع ، ليتكون بذلك أضلاع المثلث الثلاثة .



الشكل (٦) مثلث السرعة المركبة Combined velocity triangle

الشغل المنجز ، القدرة ، كفاءة الريشة ، كفاءة المرحلة
Work output , power , blade efficiency & stage efficiency

القوة Force في الإتجاه المماسي Tangential direction = معدل تغير الزخم Momentum في الإتجاه المماسي .
= الكتلة \ الثانية Mass per second X التغير في السرعة (نيوتن Newtons)
$= m \ (V_{w1} \pm V_{w2})$ (نيوتن)

القوة في الإتجاه المحوري Axial direction = معدل تغير الزخم في الإتجاه المحوري .
(قوة الدفع المحوري Axial thrust) (نيوتن) $= m (V_{a1} - V_{a2})$

الشغل المنجز Work done من قبل البخار على الريش (نيوتن متر\ثانية N .m/s) $= m(V_{w1} \pm V_{w2})u$

القدرة Power المتنامية بواسطة التوربين (كيلواط KW) $= m (V_{w1} \pm V_{w2}) u / 1000$

كفاءة الريشة Blade efficiency = الشغل المنجز على الريشة (الريش) \ الطاقة Energy المجهزة للريشة (للريش)
$= m (V_{w1} \pm V_{w2}) u / ½ [m(V_1)^2] = 2 u (V_{w1} \pm V_{w2}) / (V_1)^2$

الطاقة المفقودة بسبب الإحتكاك مع الريشة Energy lost due to blade friction
(نيوتن متر\ثانية N.m/s) $= 1/2 * m [(V_{r1})^2 - (V_{r2})^2]$

كفاءة المرحلة Stage efficiency = الشغل المنجز على الريشة (الريش) \ إجمالي الطاقة المجهزة في كل مرحلة
$= m (V_{w1} \pm V_{w2}) u / m(H_1 - H_2) = (V_{w1} \pm V_{w2}) u / H_d$
حيث إن : $H_d = H_1 - H_2$ (إنخفاض الحرارة في حلقة الفوهة Heat drop in the nozzle ring)

الحد الأقصى للشغل والحد الأقصى لكفاءة مخطط أو مثلث السرعة
Maximum work & maximum diagram efficiency

بالرجوع إلى الشكل (٦) نلاحظ من مخطط (مثلث) السرعة المركبة combined velocity triangle ما يلي :
$V_{w1} = V_1 \cos \alpha_1 = V_{r1} \cos \beta_1 + u$ و $V_{w2} = V_2 \cos \alpha_2 = V_{r2} \cos \beta_2 - u$

إذن : $V_{w1} + V_{w2} = V_{r1} \cos \beta_1 + V_{r2} \cos \beta_2 = V_{r1} \cos \beta_1 \left[1 + (V_{r2} \cos \beta_2 / V_{r1} \cos \beta_1) \right]$
$= V_{r1} \cos \beta_1 (1 + K C)$

حيث أن : $k = V_{r2} / V_{r1}$ & $C = \cos \beta_2 / \cos \beta_1$

أو تكون المعادلة كما يلي : $V_{w1} + V_{w2} = (V_1 \cos \alpha_1 - u) (1 + K C)$

معدل الشغل المنجز Rate of doing work لكل كيلو غرام من البخار في الثانية (kg / second) :

$= (V_1 \cos \alpha_1 - u)(1 + K C)\, u$

إذن تكون كفاءة المخطط (η_b) Diagram efficiency : $\eta_b = (V_1 \cos \alpha_1 - u)(1 + K C) / V_1^2$

لتكن نسبة سرعة الربشة (ρ) Blade speed ratio : $\rho = u / V_1$

لذلك تكون كفاءة المخطط كما يلي : $\boldsymbol{\eta_b = 2(\rho \cos \alpha_1 - \rho^2)(1 + K C)}$

حسب المعادلة أعلاه ، من الواضح أن كفاءة مخطط السرعة تعتمد على العوامل التالية :

١- زاوية الفوهة (α_1) Nozzle angle .

٢- نسبة سرعة الريشة (ρ) Blade speed ratio .

٣- زوايا الريشة (β_1 & β_2) Blade angles .

٤- معامل سرعة الريشة (K) Blade velocity coefficient .

إذا تم إفتراض قيمة كل من (α_1 و K و C) ثابتة ، فإن كفاءة مخطط السرعة ستعتمد فقط على قيمة نسبة سرعة الريشة (ρ) .

من أجل تحديد القيمة المثلى للكفاءة القصوى لمخطط السرعة فإن : $\partial \eta_b / \partial \rho = 0$

لذلك فإن ρ ستكون : $\rho = \cos \alpha_1 / 2$

تكون معادلة الكفاءة القصوى لمخطط السرعة $(\eta_b)_{max}$ كما يلي :

$$(\eta_b)_{max} = 2(1 + K C)\left[(\cos \alpha_1 / 2) \cos \alpha_1 - \cos^2 \alpha_1 / 4 \right] = (1 + K C)(\cos^2 \alpha_1 / 2)$$

ملاحظة : إذا كانت الريشة متماثلة ولا وجود للإحتكاك السطحي ، عندئذ يكون : $\beta_1 = \beta_2$ و $K = C = 1$

لذلك فإن الكفاءة القصوى لمخطط السرعة $(\eta_b)_{max}$ ستكون : $\boldsymbol{(\eta_b)_{max} = \cos^2 \alpha_1}$

الشغل المنجز لكل كيلو غرام من البخار في الثانية (kg / second) :

$= (V_1 \cos \alpha_1 - u)(1 + K C)\, u$

لذلك فإن أقصى معدل للشغل المنجز Maximum rate of doing work لكل كيلو غرام من البخار في الثانية (kg / second) $= \boldsymbol{2 u^2}$

ملاحظة توضيحية : الفرق الرئيسي بين السرعة Speed والسرعة Velocity ، على الرغم من أن كليهما يتم حسابهما بإستخدام نفس الوحدات (كم / ساعة ، م / ث ، ميلا في الساعة ، إلخ) ، فإن الاثنين مختلفان في أن المصطلح الأول يتم وصفه بإستخدام القيم العددية Numerical values فقط (أي كمية عددية Scalar quantity) بينما يصف المصطلح الآخر كل من الحجم والإتجاه Magnitude and direction (أي كمية متجهة Vector quantity) .

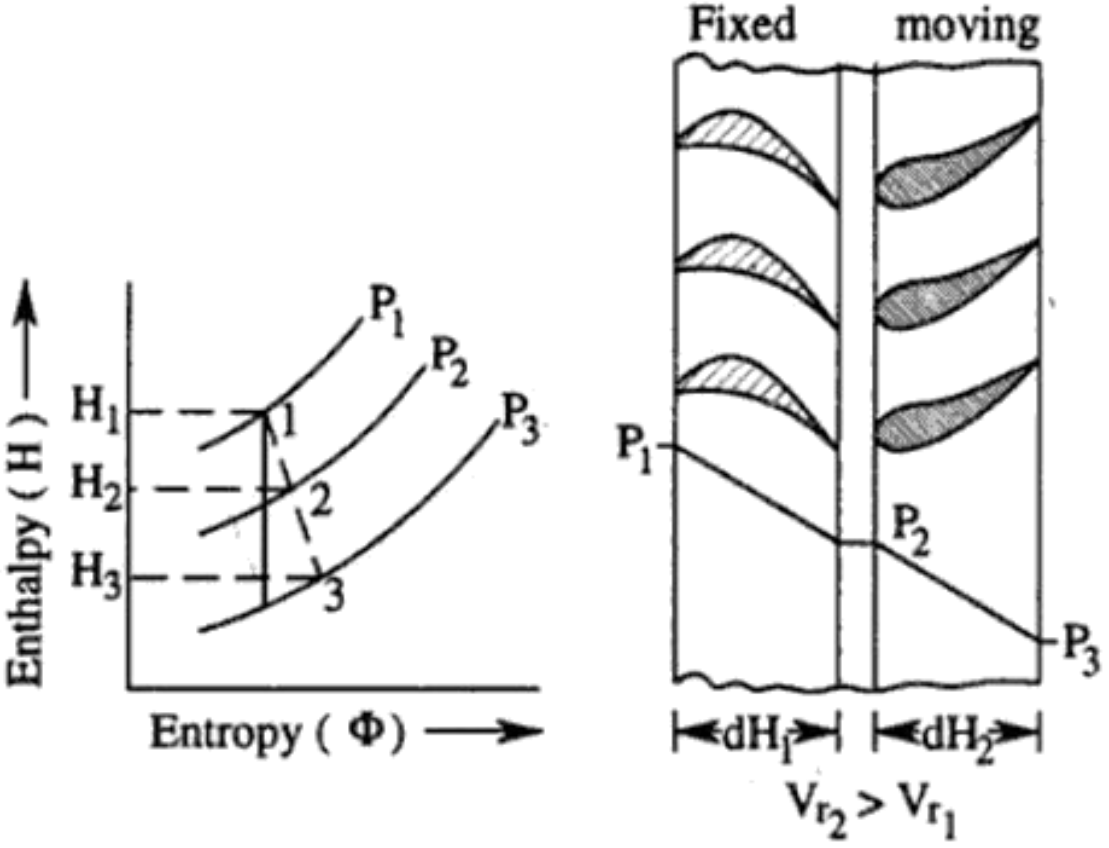
توربين رد الفعل Reaction turbine

التوربين الذي ينخفض فيه ضغط البخار تدريجيا بينما يتمدد عبر الريش المتحركة وكذلك الريش الثابتة يُعرف بتوربين رد الفعل . الذي يتكون من عدد كبير من المراحل ، كل مرحلة تتكون من مجموعة من الريش الثابتة والمتحركة . ويحدث إنخفاض الحرارة طوال الوقت في كل من الريش الثابتة والمتحركة .

لا توجد أي فوهات في توربين رد الفعل . حيث تعمل الريش الثابتة كالفوهات التي تزداد فيها سرعة البخار ويتم توجيهه لدخول حلقة الريش المتحركة .

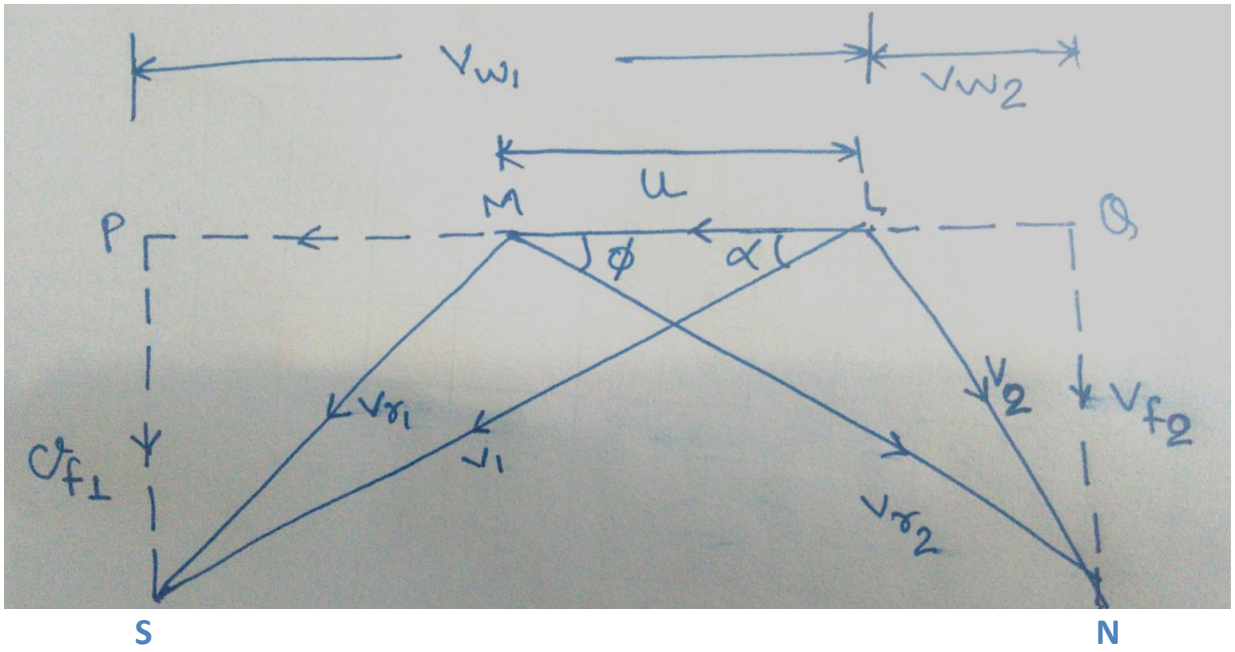
وبما أنه يحدث إنخفاض الضغط في كل من الريش الثابتة والمتحركة ، فإن كل الشفرات تكون على شكل فوهة. يتمدد البخار أثناء التدفق خلال الريش المتحركة وبالتالي يعطي ردة فعل للريش المتحركة . ولهذا يُسمى توربين رد الفعل . ويُسمى أيضا توربين رد الفعل بارسون Parson's reaction turbine .
يتم تثبيت الريش الثابتة على الغلاف Casing بينما يتم تثبيت الريش المتحركة بالجزء الدوار .

ملاحظة توضيحية : توربين رد الفعل بارسون Parson's reaction turbine نسبة إلى مخترع التوربينات البخارية الحديثة في عام ١٨٨٤ من قبل المهندس الإنكليزي الأيرلندي السير تشارلز بارسونز (١٨٥٤- ١٩٣١) .



الشكل (٧) تمدد ثابت الإنتروبي في توربين رد الفعل Isentropic expansion in reaction turbine

ملاحظة توضيحية : عملية متساوية الأنتروبية (isentropic) : وهي العملية التي تتم عند أنتروبي ثابت . عملية حرارية مثالية تتم بدون فقدان حرارة ومادة بين النظام والمحيط أي لا أحتكاك في العملية .



الشكل (٨) مخطط السرعة لريشة توربين رد الفعل Velocity diagram for reaction turbine blade

الشغل المنجز والقدرة في توربين رد الفعل Work output & power in reaction turbine

الشغل المنجز لكل كغم من البخار في المرحلة (لكل زوج) (نيوتن متر N . m)

The work done per kg of steam in the stage (per pair) = $u(V_{w1} + V_{w2})$

الشغل المنجز لكل كغم من البخار في الثانية في المرحلة (لكل زوج) (نيوتن متر \ ثانية) (N . m / s)

The work done per kg of steam per second in the stage (per pair) = $m\ u(V_{w1} + V_{w2})$

حيث أن : m = كتلة mass من البخار المتدفق خلال الريش (كغم \ ثانية) (kg/s)

Power developed (per pair) = $m\ u(V_{w1} + V_{w2}) / 1000$ (KW كيلواط) القدرة المتنامية (لكل زوج)

الكفاءة Efficiency = η = الشغل المنجز لكل كغم من البخار في المرحلة لكل زوج / إنخفاض المحتوى الحراري (الإنثالبي Enthalpy) في المرحلة لكل زوج

$\eta = u(V_{w1} + V_{w2}) / 1000\ H$

حيث أن : H = إنخفاض المحتوى الحراري Enthalpy في المرحلة لكل زوج (كيلوجول\ كغم) (KJ/Kg)

ملاحظات توضيحية :

١- كل مرحلة Stage من مراحل التوربين تتكون من زوج Pair من الريش الثابتة والمتحركة Fixed and Moving blades

٢- كفاءة المخطط = كفاءة الريشة = عامل الإستخدام Blade efficiency = Diagram efficiency = Utilization factor

درجة رد الفعل في توربين رد الفعل Degree of reaction in reaction turbine

يتم تعريف درجة رد الفعل Degree of reaction على أنها نسبة إنخفاض المحتوى الحراري (الإنثالبي) عبر الريشة المتحركة إلى إنخفاض المحتوى الحراري عبر المرحلة بأكملها في توربين رد الفعل ، حيث أن المرحلة تتكون من (العضو الثابت + االمحور المتحرك). وتعتبر درجة رد الفعل عامل مهم في تصميم التوربينات والضواغط والآلات التوربينية عموما حيث تحدد كفاءة الآلة . ويتم الإشارة إلى درجة رد الفعل بالرمز R .

$$R = \frac{\text{إنخفاض المحتوى الحراري عبر الريش المتحركة Enthalpy drop in the moving blade}}{\text{إنخفاض المحتوى الحراري عبر المرحلة Enthalpy drop in the stage}}$$

$$R = dH_2 \,/\, dH_1 + dH_2$$

حيث أن :

dH_1 = إنخفاض المحتوى الحراري عبر الريشة الثابتة لكل كيلوغرام من البخار .

$$dH_1 = (V_1)^2 - (V_2)^2 \;/\; 2 = H_1 - H_2 \qquad (\text{كيلو جول \ كغم}) \ (\text{KJ / Kg})$$

dH_2 = إنخفاض المحتوى الحراري عبر الريشة المتحركة لكل كيلوغرام من البخار .

$$dH_2 = (V_{r2})^2 - (V_{r1})^2 \;/\; 2 = H_2 - H_3 \qquad (\text{كيلو جول \ كغم}) \ (\text{KJ / Kg})$$

كذلك : $dH_1 + dH_2$ = إنخفاض المحتوى الحراري عبر المرحلة لكل كيلوغرام من البخار .

$$dH_1 + dH_2 = H_1 - H_3$$

= الشعل المنجز من قبل البخار في المرحلة Work done by the steam in the stage

$$= u\,(V_{w1} + V_{w2})$$

إذن يكون درجة رد الفعل :

$$\boldsymbol{R = \frac{(V_{r2})^2 - (V_{r1})^2}{2\,u\,(V_{w1} + V_{w2})}}$$

ملاحظة (١) : في توربين رد الفعل بارسون Parson's reaction turbine ، درجة رد الفعل ($R = 0.5$) ، عندئذ يكون ($\alpha_1 = \beta_2$ و $\alpha_2 = \beta_1$) . فهذا يعني أن الريشة المتحركة والريشة الثابتة لهما نفس الشكل .

ملاحظة (٢) : إذا كان درجة رد الفعل ($R = 0$) ، فإن التوربين يكون توربين دفعي بسيط Simple impulse turbine .

ملاحظة (٣) : إذا كان درجة رد الفعل ($R = 1$) ، فإن التوربين يكون توربين رد فعل صافي Pure reaction turbine .

الشغل المنجز والكفاءة في توربين رد الفعل Work done & efficiency in reaction turbine

كفاءة الريشة وكفاءة المرحلة Blade efficiency & stage efficiency

يتم حساب أقصى كفاءة Maximum efficiency مع الأخذ بنظر الإعتبار الإفتراضات التالية :

١- درجة رد الفعل ($R = 0.5$) ، أي أن ($\alpha_1 = \beta_2$ و $\alpha_2 = \beta_1$) .

٢- الريش الثابتة والمتحركة تكون متماثلة Symmetrical ، أي أن ($V_2 = V_{r1}$ & $V_1 = V_{r2}$) .

الطاقة الحركية Kinetic energy المجهزة للريشة الثابتة لكل (كغم Kg من البخار) :

$$= (V_1)^2 / 2$$

الطاقة الحركية المجهزة للريشة المتحركة لكل كغم من البخار :

$$= (V_{r2})^2 - (V_{r1})^2 / 2$$

إجمالي الطاقة المجهزة للمرحلة لكل كغم من البخار :

$$= [(V_1)^2 / 2] + [(V_{r2})^2 - (V_{r1})^2 / 2]$$

وبما أن الريش متماثلة ($V_2 = V_{r1}$ & $V_1 = V_{r2}$)

ومن خلال مثلث السرعة Velocity triangle : $(V_{r1})^2 = (V_1)^2 + u^2 - (2 * V_1 * u * \cos \alpha_1)$

لذلك ، إجمالي الطاقة المجهزة للمرحلة لكل كغم من البخار :

$$= (V_1)^2 - \frac{(V_1)^2 + u^2 - (2 * V_1 * u * \cos \alpha_1)}{2}$$

العمل المنجز Work done لكل كغم من البخار يكون كما يلي :

$$= u (V_{w1} + V_{w2}) = u (V_1 \cos \alpha_1 + V_{r2} \cos \beta_2 - u)$$

وبما أن ($\alpha_1 = \beta_2$ و $V_1 = V_{r2}$) ، فإن المعادلة ستكون :

$$= u (2 V_1 \cos \alpha_1 - u)$$

كفاءة المخطط Diagram efficiency (η_d) = $\frac{\text{الشغل المنجز لكل كغم من البخار}}{\text{إجمالي الطاقة المجهزة لكل كغم من البخار}}$

$$= \frac{u(2V_1\cos\alpha_1 - u)}{V_1^2 - \frac{V_1^2 + u^2 - 2\cdot V_1\cdot u\cdot\cos\alpha_1}{2}}$$

$$= \frac{2u(2V_1\cos\alpha_1 - u)}{V_1^2 - u^2 + 2\cdot V_1\cdot u\cdot\cos\alpha_1}$$

$$= \frac{2uV_1\left(2\cos\alpha_1 - \frac{u}{V_1}\right)}{V_1^2\left(1 - \frac{u^2}{V_1^2} + 2\cdot\frac{u}{V_1}\cdot\cos\alpha_1\right)}$$

$$= \frac{2\frac{u}{V_1}\left(2\cos\alpha_1 - \frac{u}{V_1}\right)}{\left(1 - \frac{u^2}{V_1^2} + 2\cdot\frac{u}{V_1}\cdot\cos\alpha_1\right)}$$

وحيث أن : ($\rho = u / V_1$) و التي تمثل نسبة سرعة الريشة Blade speed ratio ، ستكون معادلة كفاءة المخطط كما يلي :

$$\eta_d = \frac{2\rho(2\cos\alpha_1 - \rho)}{(1 - \rho^2 + 2\cdot\rho\cdot\cos\alpha_1)}$$

تكون الكفاءة في قيمتها القصوى عندما تكون الصيغة **(1 – ρ^2 + 2 · ρ · cos α_1)** في أدنى قيمة أو تكون النسبة **($d\eta_d / d\rho = 0$)** ، أي :

d (1 – ρ^2 + 2 · ρ · cos α_1) / $d\rho$ = 0

أو :

(– 2 ρ + 2 cos α_1) = 0

أو :

ρ = cos α_1

لذلك تكون الكفاءة في قيمتها القصوى عندما : ρ = cos α_1

إذن تكون المعادلة :

$$(\eta_d)_{max} = \frac{2\cos\alpha_1(2\cos\alpha_1 - \cos\alpha_1)}{(1 - \cos^2\alpha_1 + 2\cdot\cos\alpha_1\cdot\cos\alpha_1)} = \frac{2\cos^2\alpha_1}{(1 + \cos^2\alpha_1)}$$

إذن تكون المعادلة النهائية لأقصى كفاءة للمخطط :

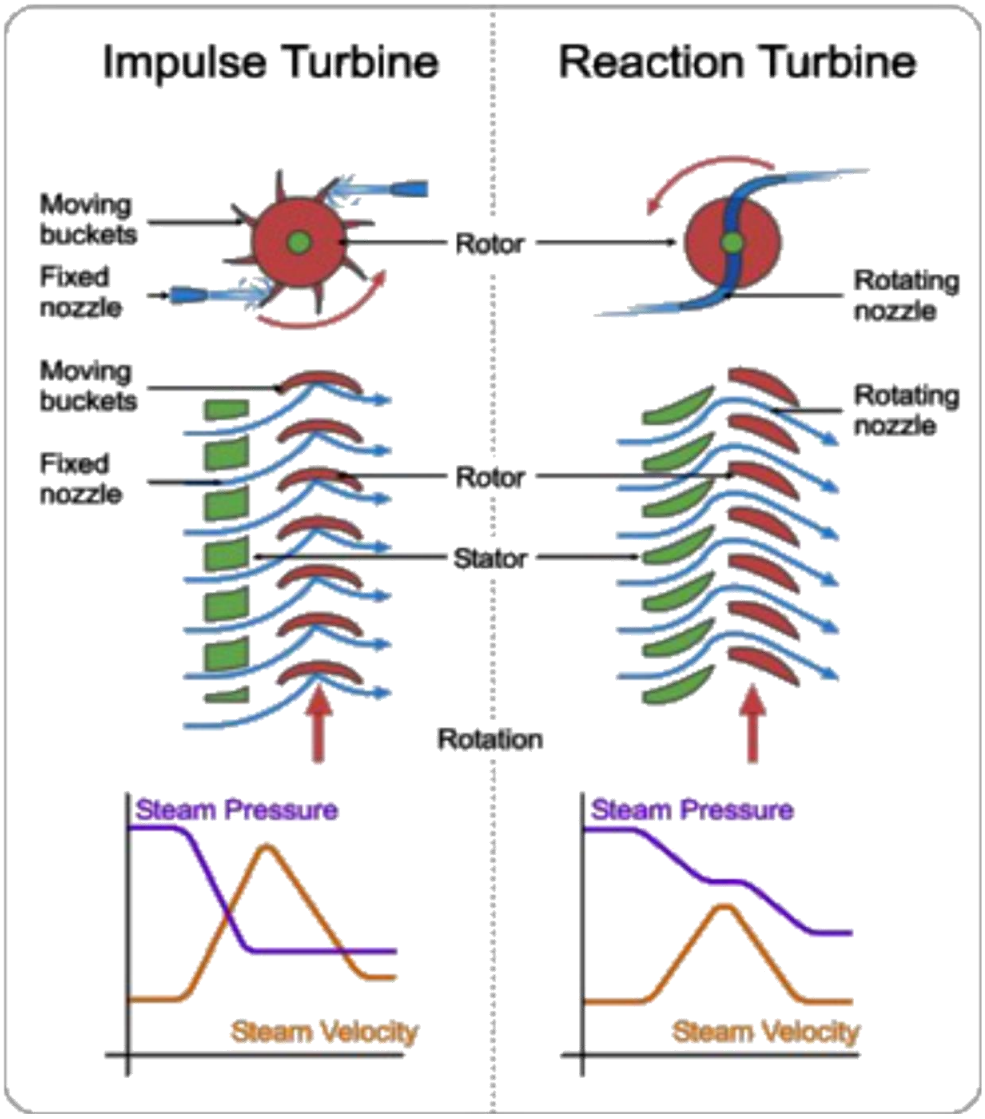
$$(\eta_d)_{max} = \frac{2\cos^2\alpha_1}{(1+\cos^2\alpha_1)}$$

مقارنة بين التوربين الدفعي وتوربين رد الفعل Impulse turbine vs Reaction turbine

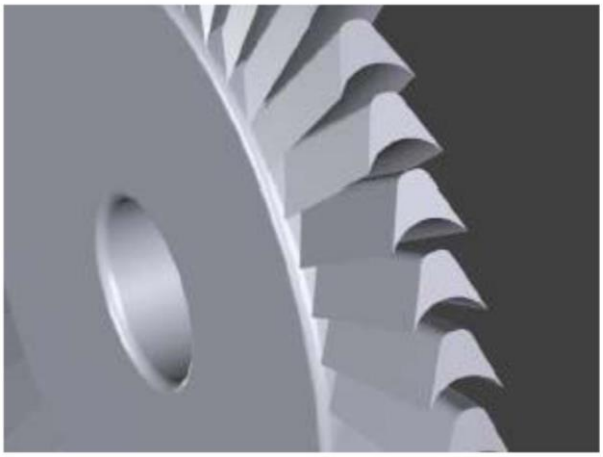
التوربين الدفعي Impulse turbine	توربين رد الفعل Reaction turbine
يتمدد البخار كليا في الفوهة ويبقى ضغطه ثابتا خلال تدفقه عبر ممرات الريشة Blade passages .	يتمدد البخار جزئيا في الفوهة ويحدث المزيد من التمدد في ريش الجزء الدوار .
تبقى السرعة النسبية Relative velocity للبخار المار خلال الريشة ثابتة في غياب الإحتكاك Friction	تزداد السرعة النسبية للبخار المار خلال الريشة بينما يتمدد البخار أثناء المرور خلال الريشة .
ريش متماثلة Symmetrical .	ريش غير متماثلة Asymmetrical
الضغط على طرفي أو نهايتي الريشة المتحركة هو نفسه .	يختلف الضغط على طرفي الريشة المتحركة .
لنفس القدرة المتولدة (المتنامية) ، وكما يكون إنخفاض الضغط أكثر ، فإن عدد المراحل المطلوبة تكون أقل .	لنفس القدرة المتولدة (المتنامية) ، وكما أن إنخفاض الضغط يكون قليل ، فإن عدد المراحل المطلوبة تكون أكثر .
يعتبر منحنى كفاءة الريشة أقل إنسيابية أو إستقرارا . The blade efficiency curve is less flat	يعتبر منحنى كفاءة الريشة أكثر إنسيابية أو إستقرارا .
سرعة البخار عالية جدا ، وبالتالي تكون سرعة التوربين عالية .	سرعة البخار ليست عالية جدا ، وبالتالي فإن سرعة التوربين تكون منخفضة .

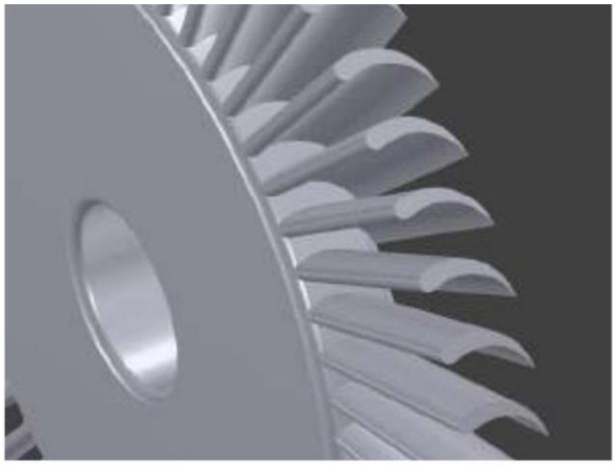
يتم أختيار التوربين في جميع مجالات التطبيق او الإستخدام بناءا على القدرة التنافسية للتوربين والذي هي مزيج من عدة عوامل :

١- الكفاءة Efficiency .
٢- العمر الإفتراضي Life .
٣- كثافة القدرة (نسبة القدرة إلى الوزن) Power density (power to weight ratio) .
٤- تكلفة التشغيل المباشرة Direct operation cost .
٥- تكاليف التصنيع والصيانة Manufacturing and maintenance costs .

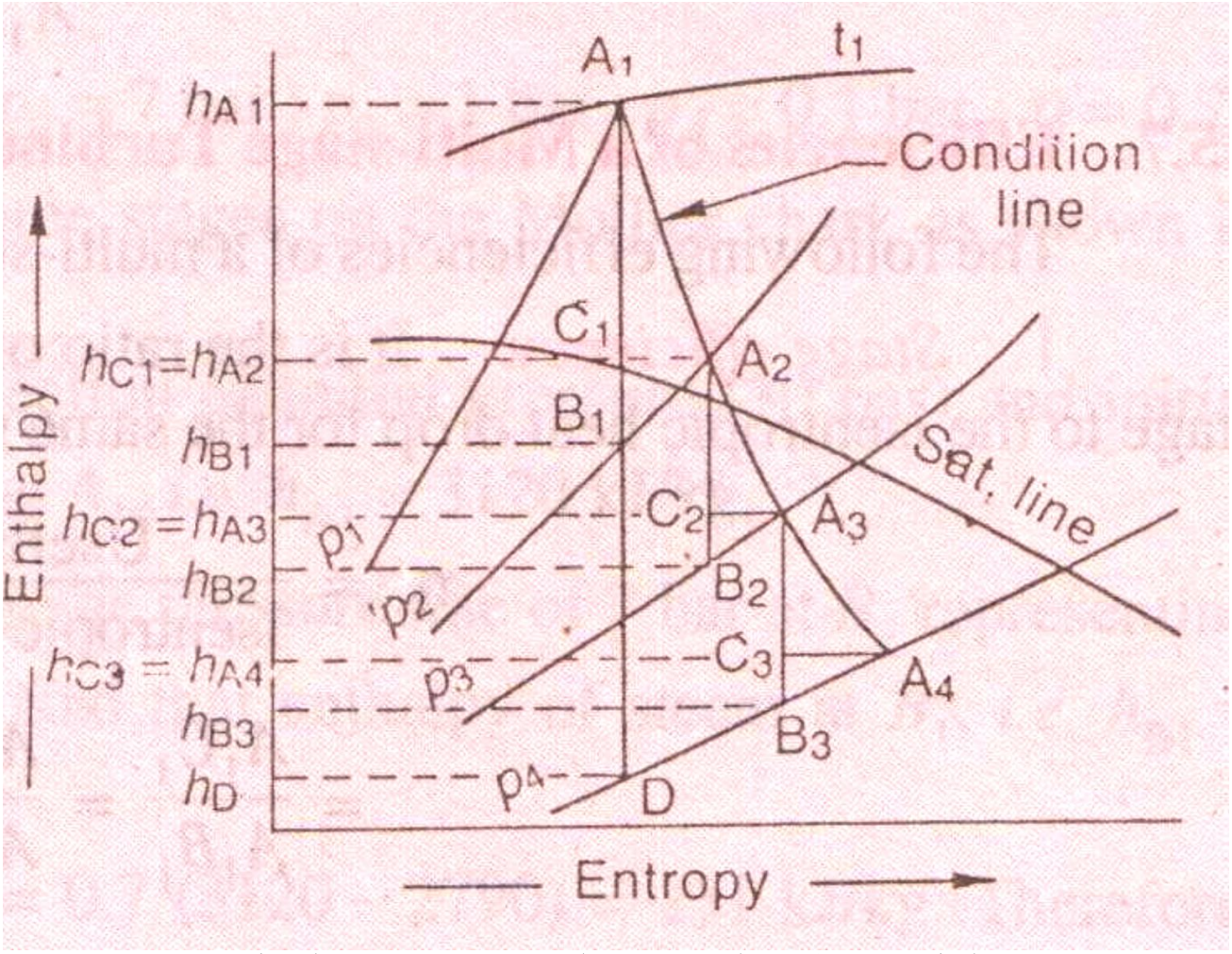


الشكل (٩) مقارنة بين التوربين الدفعي وتوربين رد الفعل Impulse turbine vs Reaction turbine





الكفاءة الإجمالية (الكلية) ومعامل إعادة التسخين Overall efficiency & Reheat factor



الشكل (١٠) مخطط الإنثالبي - الإنتروبي لتمدد توربين بخاري متعدد المراحل

Enthalpy - entropy diagram for multi stage expantion

معامل إعادة التسخين Reheat factor :

يتم تعريفه على أنه نسبة إنخفاض الحرارة التراكمي (التزايدي أو التصاعدي) Cumulative إلى إنخفاض الحرارة الأديباتيكي (ثابت الحرارة أو كظوم Adiabatic) في جميع مراحل التوربين . تعتمد قيمة معامل التسخين على نوع وكفاءة التوربين ، حيث تكون القيمة المتوسطة (1.05) .

$$\text{معامل إعادة التسخين} = \frac{\text{إنخفاض الحرارة التراكمي Cumulative heat drop}}{\text{إنخفاض الحرارة الأديباتيكي Adiabatic heat drop (Isentropic heat drop)}}$$

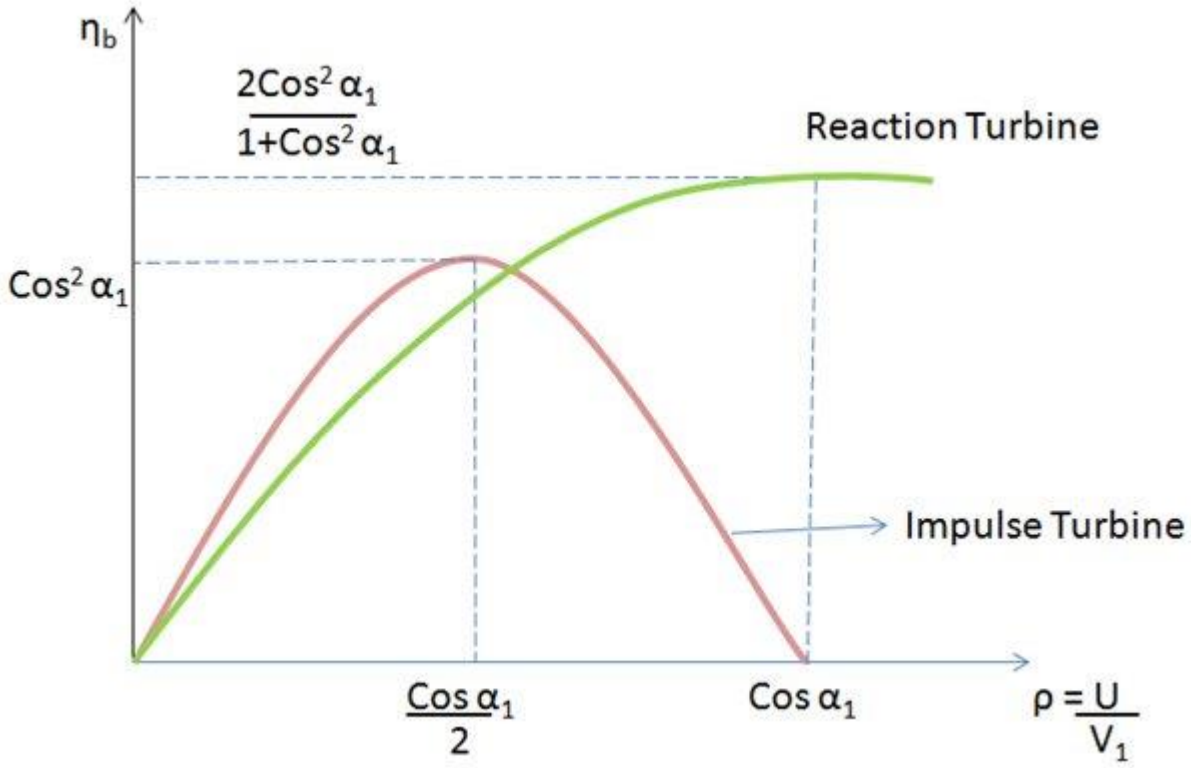
Reheat factor = $A_1B_1 + A_2B_2 + A_3B_3 / A_1D$

الكفاءة الإجمالية (الكلية) Overall efficiency :

يتم تعريفها على أنها نسبة إجمالي إنخفاض الحرارة المستفادة منها Useful heat إلى إجمالي الحرارة المجهزة Heat supplied .

الكفاءة الإجمالية (الكلية) = إجمالي إنخفاض الحرارة المستفادة منها Total useful heat drop / إجمالي الحرارة المجهزة Total heat supplied

Overall efficiency = $A_1C_1 + A_2C_2 + A_3C_3$ / $h_{A1} - h_D$



الشكل (١١) مخطط كفاءة ريشة التوربينات البخارية (الدفعية والرد فعلية)
Blade efficiency of impulse and reaction steam turbine

التحكم والسيطرة على التوربين Governing of turbines

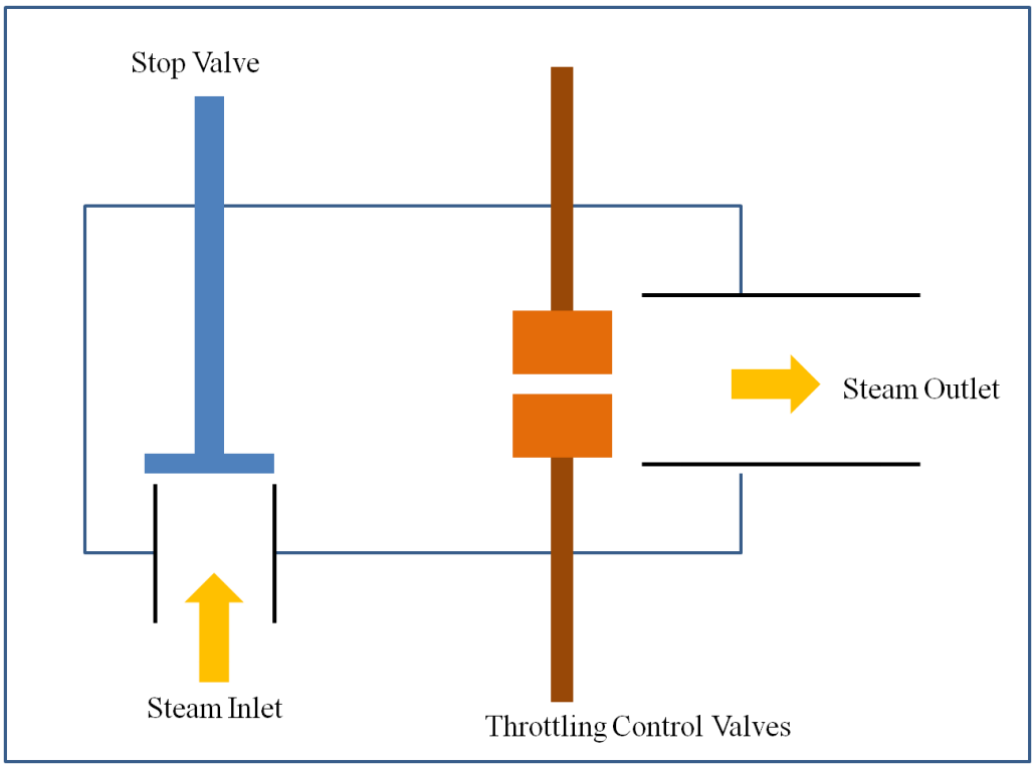
التحكم Governing هو طريقة للحفاظ على سرعة ثابتة Constant speed للتوربين بغض النظر عن تغير الحمل على التوربين .
يتم إستخدام الحاكم Governor لتحقيق هذا الغرض الذي ينظم تجهيز البخار إلى التوربين بحيث يتم الحفاظ قدر الإمكان على سرعة التوربين ثابتة تحت ظروف التحميل المتغبرة Varying load conditions .
التحكم بالتوربين البخاري Steam turbine governing هي طريقة التحكم Controlling في معدل تدفق البخار Flow rate of steam إلى التوربين البخاري وذلك للحفاظ على ثبات سرعة دورانها . إن التغير في الحمل أثناء تشغيل التوربين البخاري يمكن أن يكون له تأثير كبير على أدائها Performance . في الحالة العملية ، يختلف الحمل في كثير من الأحيان عن الحمل المصمم أو الاقتصادي Designed or economic load وبالتالي يوجد هناك دائما إنحراف Deviation كبير عن الأداء المطلوب للتوربين . الهدف الرئيسي في عملية تشغيل التوربين البخاري هو الحفاظ على سرعة دوران ثايتة Constant rotation speed بغض النظر عن الحمل المتغير . ويمكن تحقيق ذلك عن طريق وسائل التحكم في التوربين البخاري . وهناك العديد من أنواع الحواكم أو المُنظِمات Governors . يتم مراقبة معدل تدفق البخار والتحكم فيه عن طريق صمامات التداخل Interposing valves بين المرجل Boiler والتوربين .

الطرق المختلفة للتحكم بالتوربينات البخارية هي :

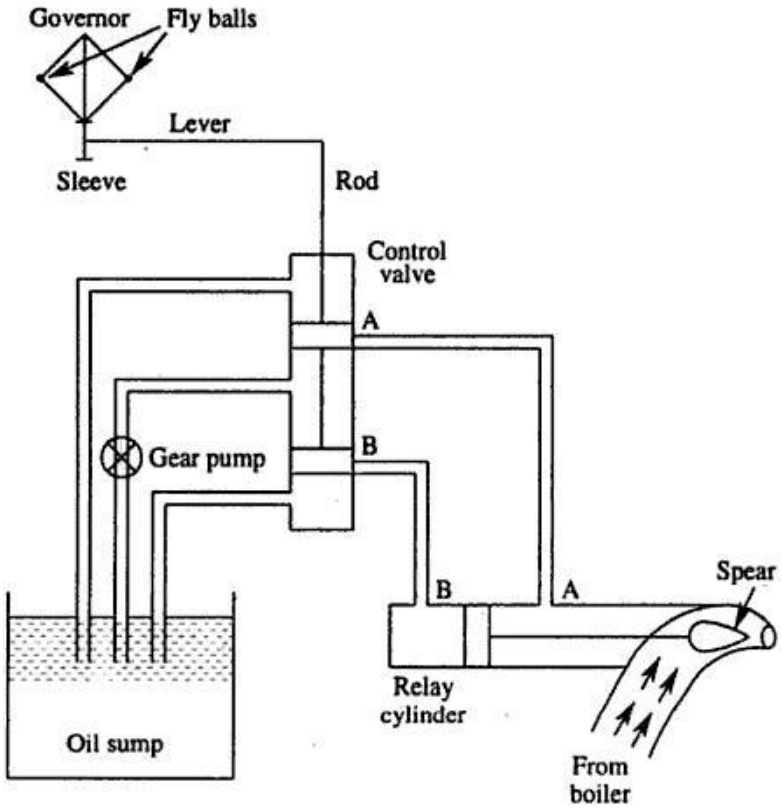
١- التحكم بالصمام الخانق Throttle governing .
٢- التحكم بالفوهة Nozzle governing .
٣- التحكم الإلتفافي (الجانبي أو التحويلي) By-pass governing .
٤- التحكم المركب Combination من طرق التحكم (١) و (٢) أو (٢) و (٣) .

التحكم بالصمام الخانق Throttle governing :
في هذه الطريقة ينخفض ضغط البخار عند مدخل التوربين مما يقلل من توافر الطاقة . حيث يتم تمرير البخار عبر ممر ضيق وبالتالي تقليل ضغطه عبر الصمام المنظم (التحكم) Governing valve . إنخفاض الضغط يؤدي إلى عملية خنق Throttling process حيث يبقى المحتوى الحراري (الإنثالبي Enthalpy) للبخار ثابتا .
فكما يشير الاسم . في التحكم بالصمام الخانق يتم خنق تدفق البخار الداخل إلى التوربين . عندما يكون هناك انخفاض في الحمل عن الحمل الإقتصادي المرغوب ، فإن السرعة ستزداد وللتحكم في ذلك فإن المنظم سيغلق صمام التحكم . هذا سيؤدي إلى تقليل تدفق البخار وبالتالي تقليل سرعة التوربين البخاري .
إن التكلفة الأولية المنخفضة Low initial cost والآلية البسيطة Simple mechanism تجعل من التحكم بالصمام الخانق طريقة أكثر ملائمة للتوربينات البخارية الصغيرة حيث يكون تدفق البخار أقل .

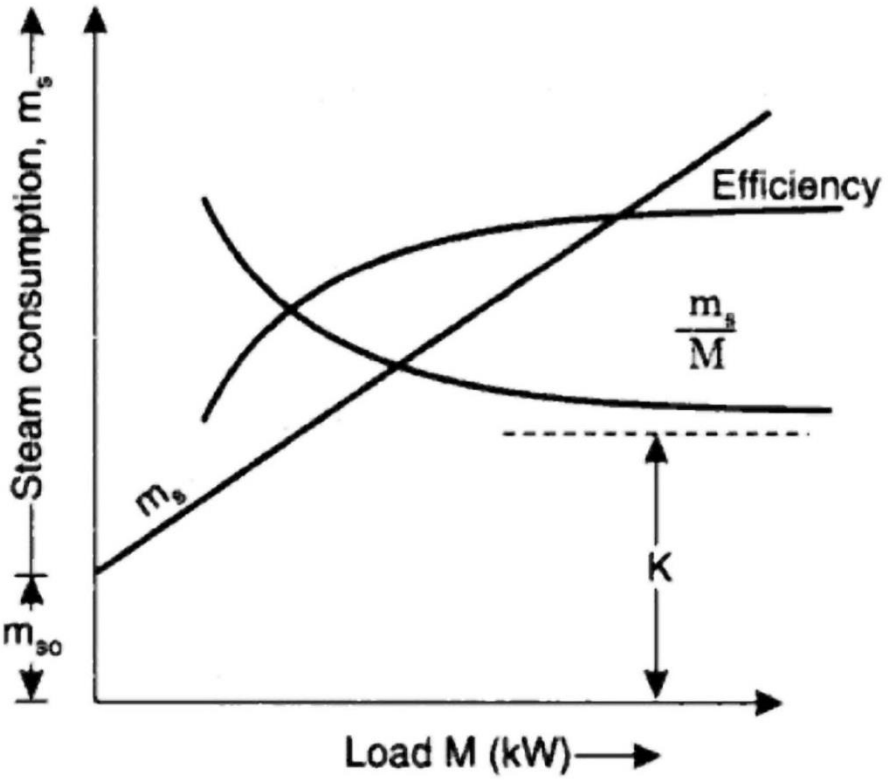
في الشكل التخطيطي (١٢- أ) ، صمام منع أو قطع دخول البخار Inlet stop valve (SV) يسمح بدخول البخار كاملا . يتم التحكم في هذا البخار عن طريق صمام مزدوج Double beat valve وهو عبارة عن صمام سيطرة خنق Throttling Control Valve (CV) يتم تشغيله بواسطة محرك مساعد (سيرفو) Servo motor يسيطر عليه حاكم أو مُنظم بالطرد المركزي Centrifugal governor . إذا أزدادت سرعة التوربين البخاري ، فإن الصمام (CV) سيُغلق لتحديد أو خنق البخار وتقليل الإمداد أو التجهيز إلى الفوهة Nozzle .



الشكل (١٢- أ) التحكم بالصمام الخانق في التوربين البخاري Throttle Governing of steam turbine



الشكل (١٢- ب) التحكم بصمام خانق Throttle governing



الشكل (١٢- ج) العلاقة بين إستهلاك البخار والحمل مُوضح بواسطة خط وليان Willian's line في التحكم بالصمام الخانق throttle governing

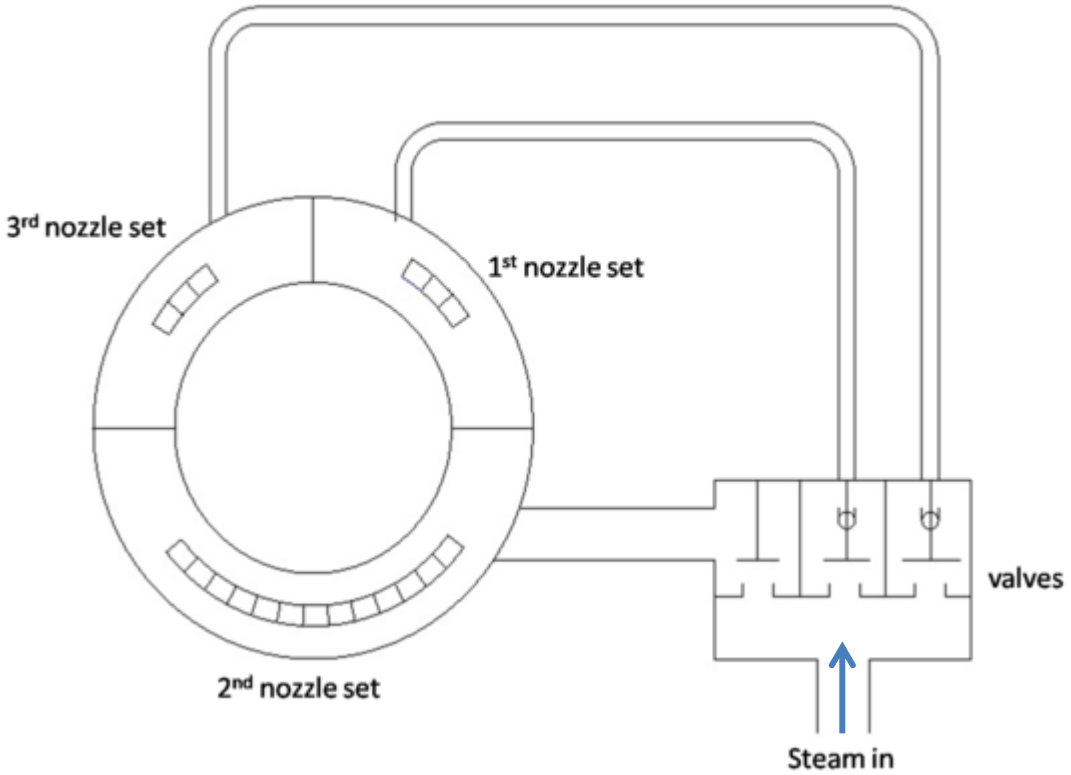
الرسم البياني أعلاه يشير إلى أن كفاءة التوربين تتناقص عند الأحمال المنخفضة في حالة إستخدام نظام التحكم بالصمام الخانق . لذلك فإن هذا النوع من الأنظمة غير فعال للأحمال المنخفضة .

ملاحظة توضيحية : خط وليان Willian's line هو خط (شبه مستقيم Nearly straight) على رسم بياني Graph يوضح إستهلاك البخار Steam consumption (كيلوغرام في الساعة Kilogram per hour) مقابل القدرة المتولدة Power output (كيلو واط أو حصان Kilowatt or Horsepower) لمحرك بخاري Steam engine أو توربين ، في كثير من الأحيان يمتد ليشمل إجمالي الوقود المستهلك Fuel consumed (كغم \ ساعة) للتوربينات الغازية Gas turbines ومحركات الإحتراق الداخلي Internal combustion engines ومحطات الطاقة الكاملة Complete power plants .

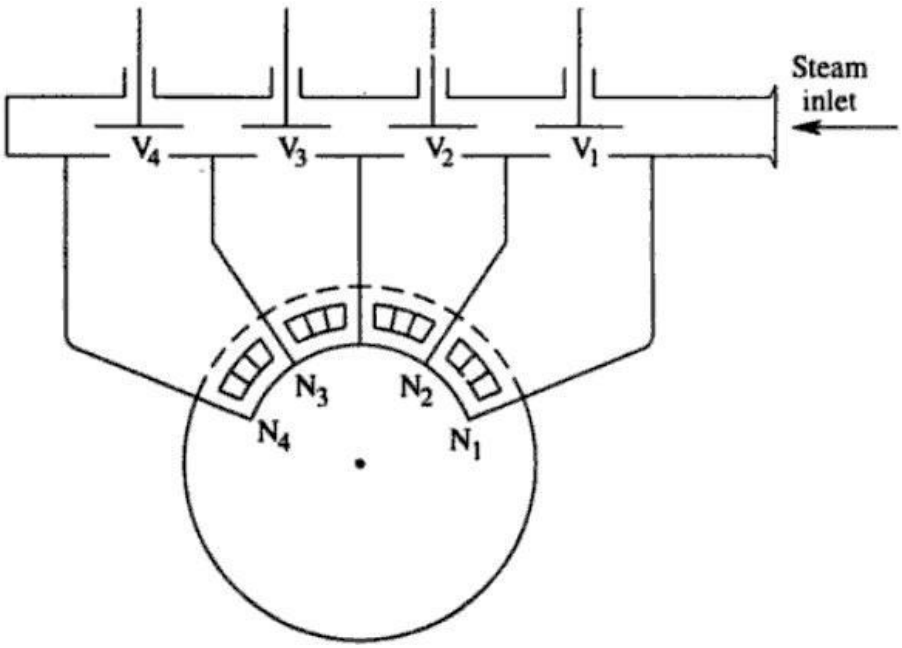
التحكم بالفوهة Nozzle governing :

في هذه الطريقة يتم تنظيم معدل تدفق البخار عن طريق فتح وإغلاق مجموعات من الفوهات Nozzles بدلا من تنظيم ضغطها . في هذه الطريقة ، كل فوهتين أو ثلاث فوهات أو أكثر تُشكل مجموعة ، ويتم التحكم في كل مجموعة بواسطة صمام منفصل . تشغيل أو تحريك الصمام المنفرد يسبب غلق مجموعة الفوهات المقابلة وبالتالي يتحكم في معدل التدفق . تحت ظروف التحميل الكامل Full load ، تكون جميع الصمامات المنظمة للفوهات مفتوحة بالكامل . عندما يتغير الحمل على التوربين أو ينحرف عن القيمة التصميمية ، يتم تنظيم تجهيز البخار من خلال واحدة أو مجموعة من الفوهات أو إغلاقها بالكامل للحفاظ على سرعة التوربين . في التوربين الفعلي Actual turbine ، يتم تطبيق طريقة التحكم بالفوهة فقط على المرحلة الأولى First stage بينما تبقى المراحل التالية غير متأثرة . وحيث أنه لا يتم تطبيق أي تنظيم أو تحكم بالضغط ، فإن ميزة هذه الطريقة تكمن في إستغلال و إستثماركل ضغط ودرجة الحرارة المرجل . وهي مناسبة للتوربينات الدفعية Impulse

turbines والوحدات الأكبر . يوضح الشكل (١٣) آلية التحكم بالفوهة التي يتم تطبيقها على التوربينات البخارية . كما هو موضح في الشكل ، يتم التحكم في ثلاث مجموعات من الفوهات من خلال ثلاثة صمامات منفصلة .



الشكل (١٣) التحكم بالفوهات في التوربين البخاري Nozzle Governing of Steam Turbine



مقارنة بين طريقة التحكم بصمام الخنق وطريقة التحكم بالفوهة

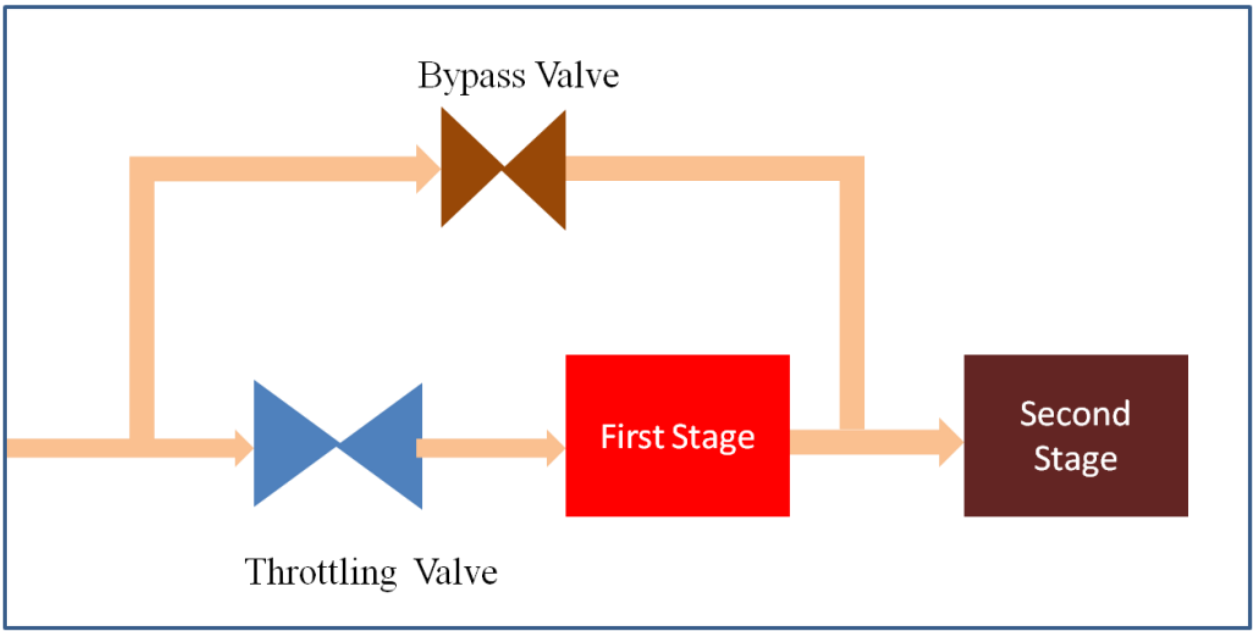
المتغير Parameter	التحكم بصمام الخنق	التحكم بالفوهة
خسائر الخنق Throttling Losses	عالية جدا Very high	لا خسائر خنق (جزئية Partially)
خسائر الدخول Admission Losses	قليلة	عالية
هبوط الحرارة Heat drop	أقل	أكبر
ملائمة Suitability	توربينات صغيرة Small turbines	توربينات متوسطة و أكبر Medium and larger turbines
الإستخدام Use	التوربينات الدفعية والرد فعلية معا impulse and reaction turbines both	التوربين الدفعي وكذلك التوربين الرد فعلي Impulse turbine and also in reaction turbine

التحكم الإلتفافي (الجانبي أو التحويلي) By-pass governing :

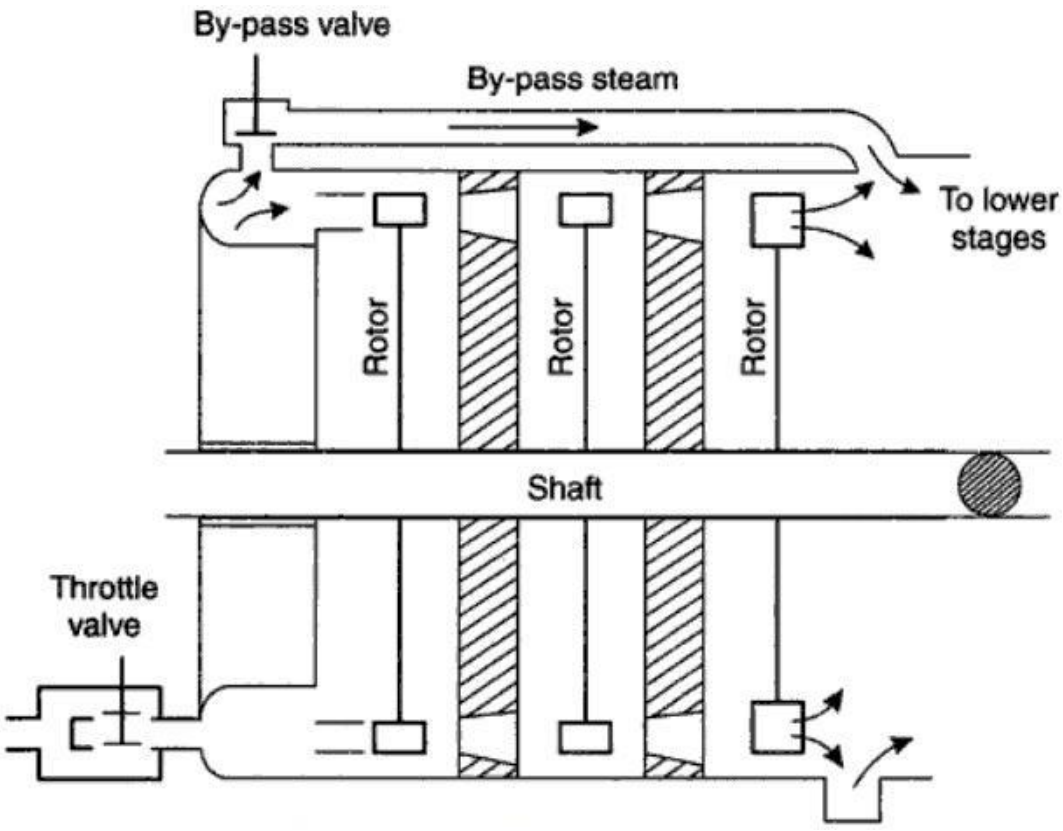
من حين لآخر يتم تحميل التوربين Turbine overloaded لفترات قصيرة . خلال هذه العملية ، يتم فتح صمامات التحويل (الإلتفاف) Bypass valves ويتم إدخال البخار النظيف في المراحل الأخيرة من التوربين . مما يولد المزيد من الطاقة لتلبية الحمل الزائد Increased load . إن الطريقتين السابقتين للتحكم في التوربينات البخارية ، تتحكم في البخار عند مدخل المرحلة الأولى أو مرحلة الضغط العالي High pressure stage من التوربين . وعندما يكون الحمل أكبر من الحمل المطلوب ، لا يمكن للبخار الإضافي أن يمر خلال المرحلة الأولى حيث لا تتوفر فوهات إضافية .

يتم عن طريق التحكم الإلتفافي أو الجانبي تمرير بخار إضافي من خلال صمام إلى المراحل الأخيرة من التوربين مما يؤدي إلى زيادة قدرة التوربين . بمجرد فتح الصمام الإلتفافي ، يكون تحت سيطرة حاكم أو منظم التوربين Turbine governor للتحكم في سرعة التوربين . لأنه إذا لم تتم السيطرة من قبل الحاكم فإنه قد يُسمح لمزيد من البخار بالتدفق إلى المراحل الأخيرة مما يؤدي إلى زيادة سرعة التوربين .

يزيد الإمداد الثاني والثالث من البخار من القدرة الناتجة من التوربين ولكن الكفاءة لا تزال أقل . في توربينات رد الفعل ، وبسبب إنخفاض الضغط المطلوب في ريش التوربين ، فإن التحكم بالفوهات Nozzles control governing غير ممكن ، فيتم إستخدام طريقة التحكم بالصمام الخانق مع التحكم الإلتفافي .



الشكل (١٤ - أ) التحكم الإلتفافي (الجانبي أو التحويلي) في التوربين البخاري By-pass governing of steam Turbine



الشكل (١٤ - ب) التحكم الإلتفافي في التوربين البخاري By-pass governing of steam Turbine

التحكم المركب Combination governing :

في طريقة التحكم المركب يتم إستخدام أي من طريقتي التحكم المذكورة أعلاه . بصورة عامة يتم إستخدام التحكم الإلتفافي و التحكم بالفوهة في نفس الوقت لتتناسب مع حمل التوربين .

التحكم بالحالات الطارئة Emergency governing :

كذلك يتم تزويد كل التوربينات البخارية بمنظمات أو حواكم الطوارئ Emergency governors التي تدخل حيز التنفيذ (بالعمل) في الحاالات التالية :

١- عندما تزداد السرعة الميكانيكية Mechanical speed للعمود عن (١١٠٪) .
٢- إختلال أو إضطراب في موازنة التوربين Balancing of the turbine is disturbed .
٣- فشل نظام التزييت Failure of the lubrication system .
٤- الفراغ Vacuum في المكثف Condenser قليل جدا أو عدم كفاية كمية سائل التبريد المجهزة إلى المكثف .

الخسائر أو المفاقيد في التوربينات البخارية Losses in steam turbines

التوربين البخاري ليس محرك حراري مثالي Perfect heat engine . تميل خسائر الطاقة إلى تقليل كفاءة وإنتاج التوربين Work output . يمكن أن يعزى عدم الكفاءة هذه إلى الأسباب التالية :

١- فقدان السرعة المتبقية Residual velocity loss :
٢- خسائر في صمامات التحكم Losses in regulating valves .
٣- خسارة بسبب إحتكاك البخار في الفوهة Loss due to steam friction in nozzle .
٤- خسارة بسبب التسرب Loss due to leakage .
٥- خسارة بسبب الإحتكاك الميكانيكي Loss due to mechanical friction .
٦- خسارة بسبب رطوبة أو نداوة البخار (جودة البخار) Loss due to wetness of steam .
٧- خسارة الإشعاع Radiation loss .

فقدان السرعة المتبقية Residual velocity loss :

البخار الذي يخرج من المرحلة الأخيرة من التوربين له سرعة مطلقة معينة Certain absolute velocity تمثل كمية من الطاقة الحركية التي لا يمكن نقلها إلى عمود التوربين وبالتالي يتم إهدارها . يمكن تقليل فقدان السرعة المتبقية بواسطة توربينات متعددة المراحل . هذه الخسارة هي حوالي (١٠ إلى ١٢ ٪) في التوربينات ذات المرحلة الواحدة .

وجود الإحتكاك Friction : في الأنظمة الديناميكية الحرارية الحقيقية Real thermodynamic systems أو في المحركات الحرارية الحقيقية Real heat engines ، يعود جزء من عدم الكفاءة الكلية للدورة Overall cycle inefficiency إلى الخسائر الإحتكاكية من المكونات Components الفردية (مثل الفوهات Nozzles أو ريش التوربينات) .

تسرب البخار Steam Leakage : لا يمكن عزل الجزء الدوار وغلاف التوربين Turbine rotor and the casing بشكل مثالي . فهناك بعض من كمية البخار تتسرب من حجرة التوربين دون إنجاز شغل مفيد

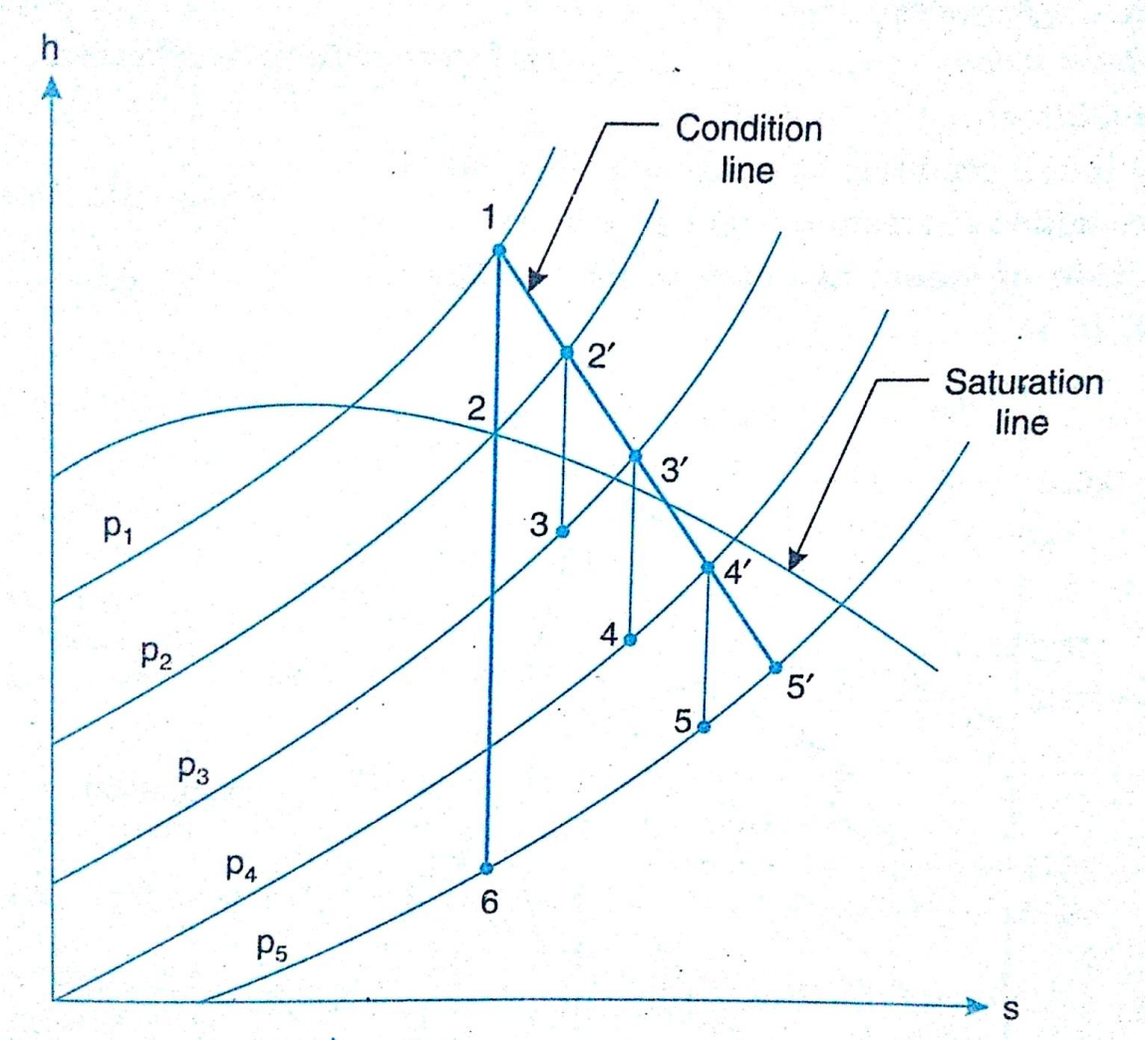
الخسارة بسبب الإحتكاك الميكانيكي في المحامل :
Loss due to mechanical friction in bearings
حيث يتم تثبيت كل محور توربين على محملين .

فقدان الضغط في تنظيم الصمامات وخطوط البخار :
Pressure losses in regulating valves and steam lines
هناك صمامات عزل خط البخار الرئيسية Main Steam line Isolation Valves (MSIVs) ، وصمامات الخنق - التوقف Throttle - stop valves وصمامات التحكم Control valves بين مولدات البخار Steam generators والتوربين الرئيسي Main turbine . مثل إحتكاك الأنابيب ، تكون الخسائر الطفيفة متناسبة تقريبا مع مربع معدل التدفق Square of the flow rate . عادة ما يكون معدل التدفق في خطوط البخار الرئيسية مرتفع جدا . على الرغم من أن الخنق Throttling هو عملية متساوية الإنثالبي Isenthalpic process ، فإن إنخفاض المحتوى الحراري Enthalpy drop المتاح للعمل في التوربين يتم تقليله ، لأن هذا يؤدي إلى زيادة في نوعية أو جودة بخار المخرج Outlet steam quality .

ملاحظة توضيحية : Isenthalpic process أو Isoenthalpic process تعني عملية متساوية الإنثالبي و هي عملية تتم دون أي تغيير في المحتوى الحراري أو الإنثالبي (H) Enthalpy أو المحتوى الحراري النوعي Specific enthalpy ، أي يتم الحفاظ خلال العملية على عدم تبادل حرارة بين النظام والوسط المحيط . العملية تكون شبيهة بالعملية الكظومة (الإديباتية) Adiabatic process .

خسائر بسبب انخفاض جودة البخار Losses due to low quality of steam : يكون البخار المستنزف Exhausted steam عند ضغط دون الضغط الجوي تماما ، ويكون في حالة مكثفة جزئيا ، وعادة ما تكون ذات جودة بنسبة (٩٠٪) تقريبا . يمكن أن يتسبب المحتوى العالي لقطيرات الماء Water droplets في حدوث الإصطدام السريع Rapid impingement وتآكل الريش Erosion الذي يحدث عندما يتم تسليط الماء المكثف Condensed water بضغط على الريش .

خسائر الإشعاع Radiation losses : قد تعمل التوربينات البخارية في حالة مستقرة Steady state بظروف مدخل بخار (ضغط ٦ ميكاباسكال ودرجة حرارة ٢٧٥,٦ درجة مئوية C°) . لأنها آلة أو ماكينة كبيرة وثقيلة ، يجب أن تكون معزولة حراريا Thermally insulated لتجنب أي فقدان للحرارة إلى المناطق المحيطة بها .



الشكل (١٥) تأثير إحتكاك الريشة في التوربينات البخارية Effect of blade friction in steam turbines

References المراجع

1- Steam Turbines , Unit-4, by Ankit saxena . Asst. Professor .

2- Steam Turbines . Session delivered by: Prof. Q.H. Nagpurwala .

3- Wikipedia- the free encyclopedia ويكيبيديا ، الموسوعة الحرة

4- Dictionary of Engineering – Second Edition - McGraw-Hill

٥- معجم المصطلحات العلمية والفنية والهندسية - أحمد شفيق الخطيب - ٢٠٠٥