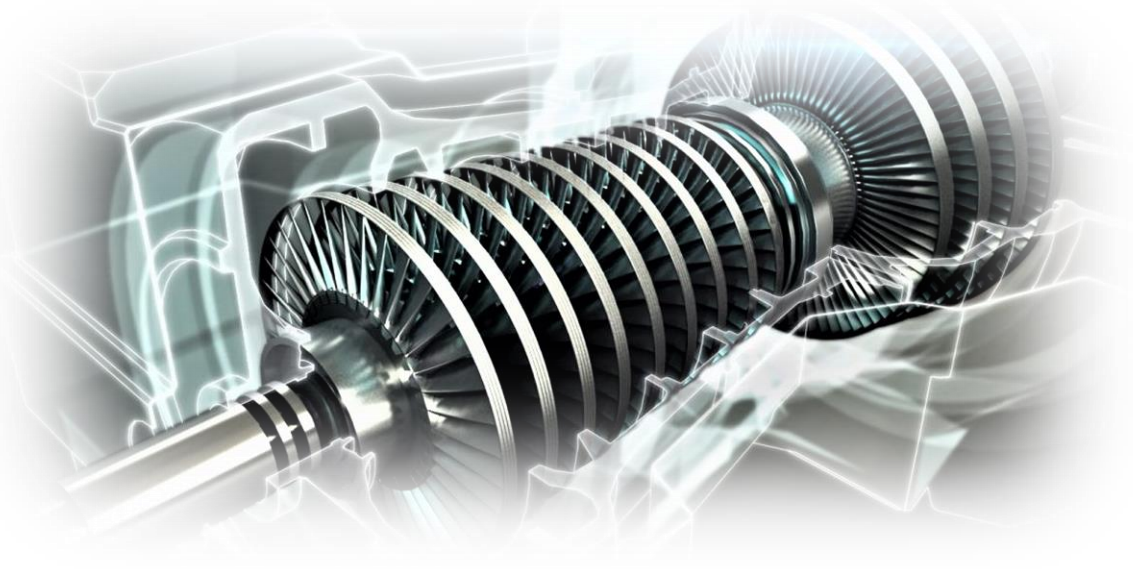


# تصميم التوربينات البخارية



## *Design of Steam Turbines*

إعداد وترجمة  
المهندس عدنان بهجت جليل

٢٠١٨

الحمد لله رب العالمين ، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين ، سيدنا محمد وعلى آله وأصحابه أجمعين .  
من المعلوم أن الغرب في اللحظة الحضارية الآنية - يستنبت - العلم بلغاته ويخترع المخترعات ، ويخرج للعالم يوميا بمئات المصطلحات والألفاظ الجديدة حتى أنه لا يزال الكثير من المصطلحات والتسميات العلمية نلفظها باللغة الأنكليزية لعدم معرفتنا بما يكافئ أو يعادل معناها باللغة العربية أو من المحتمل عدم وجود أية ترجمة لها أصلا، وهذا ما ألاحظه وأعيشه من خلال عملي في مجال توليد الطاقة الكهربائية . وأمام هذا الوضع ، تجد اللغة العربية نفسها مضطرة إلى مواكبة هذا التطور العلمي ، وهذه المبتكرات اللغوية مصطلحيا إذ إنها مطالبة أكثر من أي وقت مضى باللاحق بالركب الحضاري الغربي ، وبمسايرة زخمه المصطلحي في شتى الميادين المعرفية والعلمية .

من خلال تجوالي في مواقع الأنترنت العلمية ، وجدت كتابا باللغة الإنكليزية حول هندسة التوربينات البخارية ورحت أتصفحه بداية ، ثم غرقت في صفحاته ، ولم أتركه لأيام ، وبعدها وبعد تفكير وتدقيق ، رأيت أن أبدأ في إعداد ترجمة عربية للكتاب لما يحتويه من معلومات مفيدة جدا للعاملين من أخواني المهندسين في مجال إنتاج الطاقة الكهربائية بالمحطات البخارية التي تعمل على مبدأ دورة رانكين ولأثراء المكتبة العلمية العربية بمثل هذه الترجمات والتي تنفر إلى الكثير من المصادر والمراجع العلمية المهمة في مجال الهندسة النظرية و التطبيقية ، وفعلا بدأت الترجمة التي استغرقت أكثر من سبعة أشهر نظرا لإنشغالي بأعمال وظيفتي كرئيس قسم التخطيط والمتابعة في محطة كهرباء الدبس الغازية إذ كنت أعكف على ترجمة الكتاب خلال أوقات الفراغ والإجازات والعطل الرسمية .

إن الترجمة العلمية والتقنية من اللغة الأنكليزية الى اللغة العربية وتعريب المصطلحات العلمية ليس بالأمر السهل فهي عملية وضع لغة علمية تتطلب الكثير من الدقة والوضوح ، خالية من كل لبس أو خفاء ، بعيدة كل البعد عن الإحتمالية . وبالاعتماد على مصادر ومراجع ومعاجم مختلفة تم ذكرها في نهاية الكتاب وكذلك مواقع الكترونية مثل مترجم غوغل وموقع معاني على شبكة الأنترنت ، فقد حاولت في هذه الترجمة قدر الإمكان إختيار أنسب المعاني للمصطلحات العلمية والنحوية التي تدل على المفهوم المراد دلالة واضحة دقيقة محددة ، وتحدد كل أبعاده وإحتمالاته مع إدراج ملاحظات توضيحية وشرح إغنائي لكل مصطلح علمي آخر ذكر في أصل الموضوع ، وأرجوا أن أكون قد وفقت في ذلك .

وأخيرا انا لا أجزم بتمام صحة الكلمات والمصطلحات العربية المعادلة للكلمات والمصطلحات الأنكليزية المذكورة في هذا الكتاب ، فقد تكون هنالك كلمات عربية معادلة ومناسبة أكثر ، لذا وبكل إحترام وتقدير أطلب من جميع الأساتذة والمختصين والمهندسين من أصحاب الخبرة وكل من يقرأ هذا الكتاب من أصحاب الخبرة أن لا يبخلوا في إبداء مقترحاتهم وملاحظاتهم التصحيحية والإغنائية وإرسالها على العنوان الإلكتروني التالي خدمة للصالح العام : [Koprio1@gmail.com](mailto:Koprio1@gmail.com) أو [agakoprio@hotmail.com](mailto:agakoprio@hotmail.com) . والله ولي التوفيق ...

المهندس عدنان بهجت جليل  
آلتون كوبري - كركوك - العراق  
٢٤ كانون الأول ٢٠١٨

## Topics of the book موضوعات الكتاب

- تصنيف التوربينات البخارية Classification of steam turbines .
- مبادئ العمل Working principles .
- أنواع تراكيب التوربينات البخارية (الضغط وزيادة السرعة)
- Compounding of steam turbines ( Pressure and velocity compounding)
- الخسائر في التوربينات البخارية Losses in steam turbines .
- المبادئ التوجيهية لتصميم التوربينات البخارية Design guidelines of steam turbines .
- القوى والشغل المنجز وكفاءة التوربين البخاري
- Forces, work done and efficiency of steam turbine .
- أمثلة عددية Numerical examples .
- التوربينات البخارية فوق الحرجة Supercritical steam turbines .
- الإتجاهات المستقبلية في تصميم التوربين البخاري Future trends in steam turbine design .
- ملاحظات توضيحية Explanatory notes .

## تمهيد Introduction

### البخار Steam

البخار يُستخدم كمادة عاملة أو تشغيلية Working substance في تشغيل التوربين البخاري .

هل البخار غاز مثالي Perfect gas ؟

يمتلك البخار خصائص مثل تلك التي في الغازات : الضغط Pressure ، الحجم Volume ، درجة الحرارة Temperature ، الطاقة الداخلية Internal energy ، المحتوى الحراري Enthalpy والإنتروبي Entropy . ولكن حجم و ضغط ودرجة حرارته كبخار لا ترتبط بأي علاقة بسيطة مثل التعبير عن المعادلة المميزة أو معادلة الخواص Characteristic equation للغاز المثالي .

الحرارة المحسوسة Sensible heat : هي الحرارة الممتصة بواسطة الماء عند بلوغه نقطة الغليان Boiling point .

الحرارة الكامنة Latent heat هي الحرارة الممتصة لتحويل الماء المغلي Boiling water إلى بخار .

البخار الرطب Wet steam هو البخار الذي يحتوي على كمية من الرطوبة Moisture .

البخار الجاف Dry steam هو البخار الذي لا يحتوي على رطوبة .

البخار المحمص Superheated steam هو البخار الجاف ، عند تسخينه عند ضغط ثابت Constant pressure ، يحقق زيادة درجة الحرارة إلى فوق درجة حرارة التشبع Temperature of saturation . خواص البخار تعتمد على ضغوطها .

### خواص البخار Steam properties

Enthalpy (kJ/kg)	H = المحتوى الحراري ( كيلو جول \ كيلو غرام )
Internal energy (kJ/kg)	U = الطاقة الداخلية ( كيلو جول \ كغم )
Entropy (kJ / kg-K)	S = الإنتروبي ( كيلوجول \ كغم - كلفن )
Specific volume (m <sup>3</sup> / kg)	v = الحجم النوعي ( متر مكعب \ كغم )
Density (kg/m <sup>3</sup> )	ρ = الكثافة ( كغم / متر مكعب )
Isobaric heat capacity ( kJ / kg-K)	C <sub>p</sub> = السعة الحرارية عند ضغط ثابت ( كيلوجول \ كغم - كلفن )

#### ملاحظات توضيحية :

١- الأنتروبي Entropy : هو مقياس مباشر لخاصية عدم الانتظام (درجة الفوضى ، العشوائية) بين الجسيمات المكونة للنظام (أيونات ، ذرات أو جزيئات) . وحدة القياس كيلو جول / كيلو غرام درجة حرارة كلفن °KJ/Kg K والرمز S .

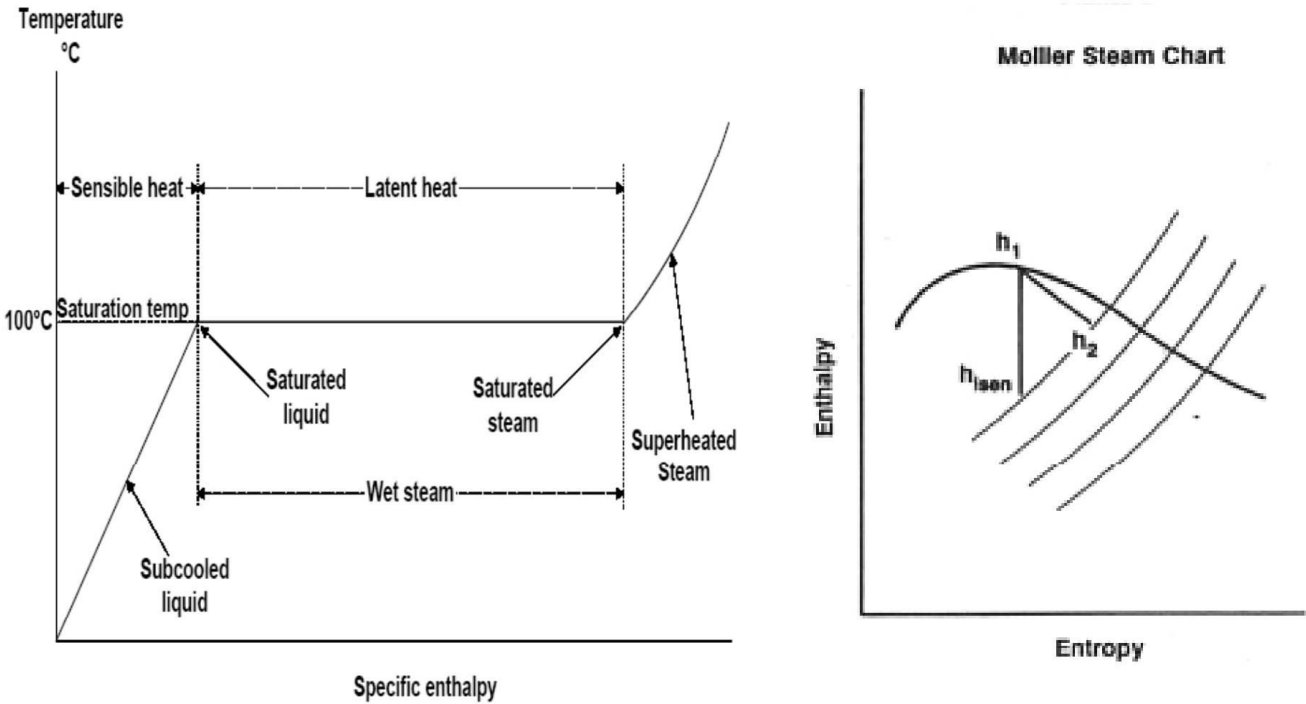
تعريف أدق للأنتروبي : خاصية تيرموديناميكية تصف إلى أي مدى تصل درجة الفوضى وعدم انتظام جسيمات النظام ، وتشتت الطاقة المصاحبة لهذه الجسيمات . وهذه الخاصية ترتبط بالحرارة المضافة أو المزالة خلال إجراء معين وكلما كان الانتظام قليلاً في النظام ( العشوائية أكبر ) كلما كانت قيمة الأنتروبي كبيرة ، وكلما كان النظام أكثر انتظاماً ( أقل عشوائية ) كلما كانت قيمة الأنتروبي صغيرة .

٢- الطاقة الداخلية Internal Energy : هي الطاقة الكلية للجزيئات ( طاقتها الحركية وطاقاتها الكامنة ) . فكما نعلم أن جزيئات المادة في حالة حركة مستمرة ، وتمتلك طاقة حركية بسبب هذه الحركة ، كما أنها تحتزن طاقة كامنة بسبب القوى المتبادلة بينها . وحدة القياس كيلو جول KJ ورمزه U .

٣- الإنثالبي Enthalpy : هي المحتوى الحراري للمادة أو هي الطاقة المخزونة نتيجة الضغط ودرجة حرارة للمادة في حالة السريان وهي خاصية للمادة تساوي مجموع الطاقة الداخلية للمادة وطاقة الضغط . وحدة القياس كيلو جول / كيلو غرام KJ/Kg ورمزه H .

٤- الغاز المثالي Ideal Gas : هو غاز افتراضي لتسهيل التعامل مع الكثير من المتغيرات في المواضيع التي تتناولها الديناميكا الحرارية . والفرضيات أو الشروط الثلاثة التالية هي التي تجعل الغاز الحقيقي إذا وجد في هذه الظروف يتصرف كغاز مثالي :

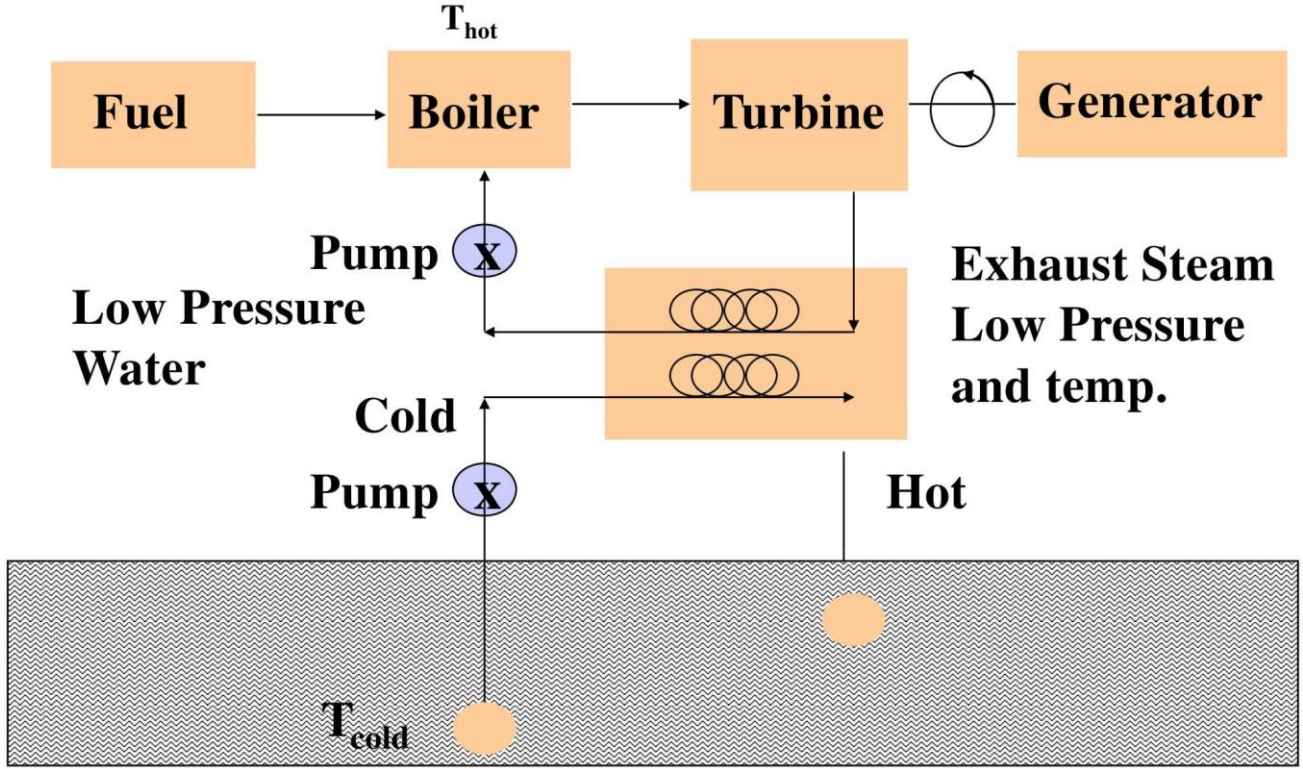
- حجم جزيئات الغاز مهملة بالنسبة للوعاء الذي يحتويه أي تحت ضغط منخفض أو مساوي للضغط الجوي وعند درجة حرارة الغرفة ( ١ بار bar و ٢٥ درجة مئوية C° ) .
- التصادمات بين جزيئات الغاز تصادمات مرنة. هذا يفترض ان الجزيئات لا تفقد أي من طاقتها عندما تتصادم مع بعضها البعض
- حركة جزيئات الغاز حركة عشوائية دون مؤثرات خارجية .
- ٥- كلفن هو درجة الحرارة المطلقة ورمزه K = درجة الحرارة المنوية (C°) + ٢٧٣
- ٦- Isobaric هي عملية متساوية الضغط أي تتم تحت ضغط ثابت .
- ٧- السعة الحرارية Heat capacity هي قيمة تبين مدى قابلية جسم ما لتخزين الطاقة الحرارية Heat energy .
- ٨- الحجم النوعي Specific volume يعرف بأنه معكوس الكثافة  $\rho$  ، وهو الحجم الذي يشغله ١ كيلوغرام من المادة أو الغاز ورمزه  $v$  .
- ٩- الكثافة Density تعبر عن علاقة وحدة الحجم بوحدة الكتلة لمادة أو جسم ما ، فكلما ازدادت الكثافة ازدادت الكتلة لوحدة الأحجام ، وعلى هذا فهي كتلة وحدة الحجم من المادة ورمزه  $\rho$  .



ملاحظة توضيحية حول المخطط أعلاه : مخطط مولير Mollier diagram نسبة إلى ريتشارد مولير Richard Mollier (١٨٦٣ - ١٩٣٥) أستاذ ألماني في الفيزياء التطبيقية والميكانيكا ، وهو رائد في البحوث التجريبية في الديناميك الحرارية Thermodynamics ، خاصة للماء والبخار والهواء الرطب Moist air . تستخدم مخططات مولير ( مخطط الإنتالبي - الإنتروبي ) (Enthalpy - Entropy Charts) بشكل روتيني من قبل المهندسين في أعمال التصميم المرتبطة بمحطات الطاقة Power plants (الأحفوري Fossil والنووي Nuclear) ، والضواغط Compressors ، وتوربينات البخار ، وأنظمة التبريد Air conditioning Refrigeration systems ، ومعدات تكييف الهواء Air conditioning equipments لتصور دورات العمل لمنظومات الديناميك الحرارية .

يوضح مخطط مولير Mollier diagram والمعروف أيضا بمخطط الإنتالبي - الإنتروبي ( H - S ) Enthalpy – Entropy chart ، الحرارة الكلية مقابل الإنتروبي ، الذي يصف المحتوى الحراري (الإنثالبي) لنظام ديناميكي حراري Thermodynamic system . يغطي المخطط النموذجي نطاق ضغط يتراوح بين ( ٠,٠١ - ١٠٠٠ بار bar) ودرجات حرارة تصل إلى ( ٨٠٠ درجة مئوية Degrees Celsius) . تم إنشاء المخطط في عام ١٩٠٤ ، عندما رسم ريتشارد مولير الحرارة الكلية H مقابل الإنتروبي S . ولغرض تكريمه تم تسمية المخطط بمخطط مولير أي رسم تخطيطي حراري باستخدام المحتوى الحراري كأحد محاوره . المخطط يظهر الإنتالبي بصيغة الطاقة الداخلية والضغط والحجم مستخدما العلاقة  $H=U+pV$  أو بصيغة الإنتالبي النوعي Specific enthalpy والإنتروبية النوعية Specific entropy والحجم النوعي  $h = u + pv$  .

## عملية توليد الطاقة بالبخر Steam Power Plant Process



تعمل التوربينات البخارية على تحويل جزء من طاقة البخر الذي يكون بدرجة حرارة عالية وضغط عالي إلى طاقة ميكانيكية Mechanical power ثم إلى طاقة كهربائية Electrical power على التوالي .

المكونات الرئيسية للتوربينات البخارية هي :

مضخة تغذية الماء Feed water pump .

المرجل Boiler .

مراحل التوربين ، وتشمل الفوهة / الجزء الثابت وصفوف ريش الجزء الدوار

Turbine stages, comprising nozzle/stator and rotor blade rows

مكثف Condenser .

يتمدد البخر القادم من المرجل في فوهة Nozzle ، مما يؤدي إلى إنبعاث تيار عالي السرعة من البخر (نفث

Jet) . هذا التيار السريع من البخر يصطدم بالريش المتحركة Moving blades ، مثبتة على عمود Shaft .

يخضع لتغيير في إتجاه الحركة Motion مما يؤدي إلى زيادة التغيير في الزخم Momentum وبالتالي

إنتاج قوة Force .

يتم الحصول على القدرة أو القوة المحركة Motive power في التوربينات البخارية عن طريق معدل التغيير

في زخم تيار البخر عالي السرعة الذي يصطدم بالريشة المنحنية Curved blade التي تدور بحرية .

يحدث تحويل الطاقة في الريش من خلال مبدأ الدفع Impulse أو رد الفعل Reaction أو الدفع - رد الفعل

Impulse reaction .

التوربينات البخارية متوفرة بعدد قليل (كمحرك رئيسي Prime mover) في قدرات تصل ( ١٥٠٠ ميكاواط

.( MW

## التوربينات البخارية والغازية والمائية (الهيدروليكية) Steam, Gas and Hydraulic Turbines

تختلف مادة العمل أو التشغيل لأنواع مختلفة من التوربينات .  
التوربينات البخارية هي آلات أو ماكينات تدفق محورية Axial flow machines (نادرا ما تستخدم التوربينات البخارية الشعاعية أو النصف قطرية Radial steam turbines) في حين تستخدم التوربينات الغازية والتوربينات الهيدروليكية كل من النوع المحوري والنوع الشعاعي حسب التطبيقات العملية .  
إن ضغط وسط العمل Working medium المستخدم في التوربينات البخارية مرتفع جدا ، في حين أن درجة حرارة وسط العمل المستخدم هو التوربين الغازي مرتفع نسبيا .  
وفي التوربينات الهيدروليكية يكون ضغط ودرجة حرارة وسط العمل أقل مما في التوربينات البخارية .  
تتوفر التوربينات البخارية كوحدات منفردة بسعة ( ١٣٠٠ ميكاواط ) في حين أن أكبر وحدة من التوربينات الغازية تكون بسعة ( ٥٣٠ ميكاواط ) و ( ٨١٥ ميكاواط ) .

### مزايا وعيوب التوربين البخاري Merits and Demerits of Steam Turbine

#### المزايا Merits :

- ١- القدرة على إستخدام بخار بضغط عالي و درجة حرارة عالية .
- ٢- كفاءة عالية للمكون High component efficiency .
- ٣- سرعة دوران عالية High rotational speed .
- ٤- نسبة (سعة أو قدرة \ وزن) عالية High (capacity or power/weight) ratio .
- ٥- تشغيل سلس ومستقر وخالي من الإهتزاز تقريبا Smooth, nearly vibration-free operation .
- ٦- لا تزييت داخلي No internal lubrication .
- ٧- بخار العادم خالي من الزيت Oil free exhaust steam .
- ٨- يمكن بناؤها أو إنشاءها في وحدات صغيرة أو كبيرة جدا (تصل إلى ١٢٠٠ ميكاواط) .

#### العيوب Demerits :

- ١- بالنسبة إلى تطبيقات السرعة البطيئة ، يجب توفير تروس (مسننات) تخفيض السرعة Reduction gears .
- ٢- لا يمكن جعل التوربين البخاري قابل للإنعكاس Reversible .
- ٣- كفاءة التوربينات البخارية الصغيرة البسيطة تكون متدنية .

#### ملاحظات توضيحية :

- ١- عمليا ، عملية تساوي الإنتروبية Isentropic process في التوربين البخاري غير ممكنة ، لأننا لا نستطيع تحقيق قابلية الإنعكاس Reversible . فالإنتروبية ليست ثابتة على الإطلاق في التوربينات البخارية ، رغم سعي المهندسون لتحقيق شروط متغيرة (عملية أدياباتية عكوسة Reversible Adiabatic Process) عن طريق عزل التوربين ، وتقليل أنواع الخسائر المختلفة داخل التوربين البخاري . لذلك ، في الواقع ، بالتوربين البخاري ، العملية ليست تماما مثالية ، فإننا نحدد كفاءة التوربين ، أي مقدار الشغل Work الذي يتم إنتاجه في الحالة الفعلية مقارنة بالشغل الذي يتم

- إنتاجه إذا كانت العملية متساوية الإنتروبية أي (مثالية عكوسة لا يتم تبادل و فقدان حرارة ومادة إلى المحيط الخارجي) .  
فالفخائر لا مفر منها ، يتم دائما ربطها بالعملية ولا تسمح لنا مطلقا بالوصول إلى كفاءة ١٠٠٪ .
- ٢- عملية كظومة (أديباتية(adiabatic): وهي العمليات التي تتم في النظام المعزول Isolated System حراريا عن الوسط المحيط به . أي نمنع خلال تلك العملية أي تبادل للحرارة بين النظام System والوسط المحيط Surroundings أي (  $Q = 0$  ) هذه الحالة غير موجودة فعلا ولكن عندما يحدث الاجراء سريعا لا يوجد وقت كافٍ للتبادل الحراري بين الغاز والمحيط عبر حدود النظام وكمثال على ذلك هو عملية الانضغاط Compression والتمدد Expansion في محرك الاحتراق الداخلي التي يمكن اعتبارها تقريبا عملية اديباتية ، ففي خلال الفترة الزمنية القصيرة التي تتم فيها هذه العمليات يمكن إهمال التبادل الحراري بين الغاز والمحيط بسبب سرعة المحرك العالية
- ٣- عملية متساوية الأنتروبية (isentropic): وهي العمليات التي تتم عند أنتروبي ثابت (  $ds = 0$  ) . عملية حرارية مثالية تتم بدون فقدان حرارة ومادة بين النظام والمحيط أي لا إحتكاك Friction في العملية .
- ٤- الإجراء العكوس Reversible Process: هو الإجراء المثالي ideal الذي يمكن عكس اتجاهه بعد حدوثه دون التسبب في إحداث تغيير على حالة النظام و المحيط . أي لا إحتكاك بين النظام والمحيط . تسمى عملية دورية مثالية Ideal cycle يمكن عكسها بدون فقد للطاقة بسبب الإحتكاك دورة عكوسة . وغالبا يبقى الأنتروبي ثابتا خلال تلك العملية ، أي  $ds = 0$  ومثال على تلك العملية عملية الانضغاط والتمدد الأديباتي في دورة كارنو Carnot cycle . تتكون دورة كارنو من عدة عمليات من الانضغاط والتمدد متتالية تحدث جميعها عند ثبات الإنتروبي ، مثال عملي عليها دورة محرك احتراق داخلي مع ملاحظة أن دورة كارنو مثالية ولا تصل إليها كفاءة الدورات العملية .
- ٥- الإجراء اللاعكوس Irreversible Process : هو الإجراء الذي يستحيل عكس اتجاهه بعد حدوثه دون تغيير على حالة النظام و المحيط . ( الإجراء الذي لا يمكن للنظام أن يعود خلاله إلى حالته الابتدائية إلا بفقدان طاقة ) .
- ٦- إن جميع التحولات ( العمليات ) التي تجري في الطبيعة تلقائياً هي في الواقع تحولات لاعكوسة ، إذ إن حدوثها وفق اتجاه ما مفضل على حدوثها في الاتجاه المعاكس ، فاننتقال الحرارة يتم دائماً من الجسم الحار إلى الجسم البارد مهما كانت كمية الطاقة التي يحويها الجسم البارد مقارنة بما يحويه الجسم الحار، وينتشر الغاز من وعاء ذي ضغط عال إلى وعاء ذي ضغط منخفض مهما كان حجم كل من الوعاءين ، ولا يحدث العكس في كلتا الحالتين إلا بأداء شغل . وأبرز التحولات الحقيقية تحويل الطاقة الميكانيكية إلى حرارة كما في حالة الإحتكاك مثلا ، ويتم هذا التحول ببساطة وبكفاءة ١٠٠%، أما العكس أي تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية فالمسألة أصعب ، وتحتاج إلى ترتيبات ومحركات وغير ذلك ، ومع هذا لا يمكن أن تبلغ الكفاءة ١٠٠% . في ديناميك الحرارة ( الترموديناميك Thermodynamic ) توجد إكمانيتان للتفاعل بين النظام والوسط المحيط ، فاما تستبدل حرارة بينهما أو يستبدل شغل . وعند تبادل الحرارة (طاقة) بينهما يتغير أيضا إنتروبي النظام وإنتروبي الوسط المحيط .
- ٧- نسبة القدرة \ الوزن power/weight ratio هي قياس للأداء الفعلي Actual performance لأي محرك أو مصدر طاقة . كما يستخدم أيضا كقياس لأداء السيارة ككل ، حيث يتم تقسيم ناتج قدرة المحرك Power output على وزن أو ( كتلة Mass ) السيارة ، لإعطاء مقياس مستقل عن حجم Size السيارة . غالبا ما يتم اقتباس القدرة إلى الوزن من قبل الشركات المصنعة بقيمة الذروة Peak value ، ولكن قد تختلف القيمة الفعلية في الإستخدام والتغييرات سوف تؤثر على الأداء .

## تطبيقات أو استخدامات التوربينات البخارية Applications of Steam Turbines

- ١- توليد طاقة Power generation .
- ٢- مصانع التكرير (مصفاة) ، البتروكيمياويات Refinery, Petrochemical .
- ٣- الصيدلانيات (المستحضرات الدوائية) Pharmaceuticals .
- ٤- الصناعات الغذائية Food processing .
- ٥- تحويل النفايات إلى طاقة Waste-to-energy .
- ٦- مصانع اللباب (عجينة الورق) والورق Pulp & Paper mills .
- ٧- معالجة النفط \ الغاز Petroleum/Gas processing .

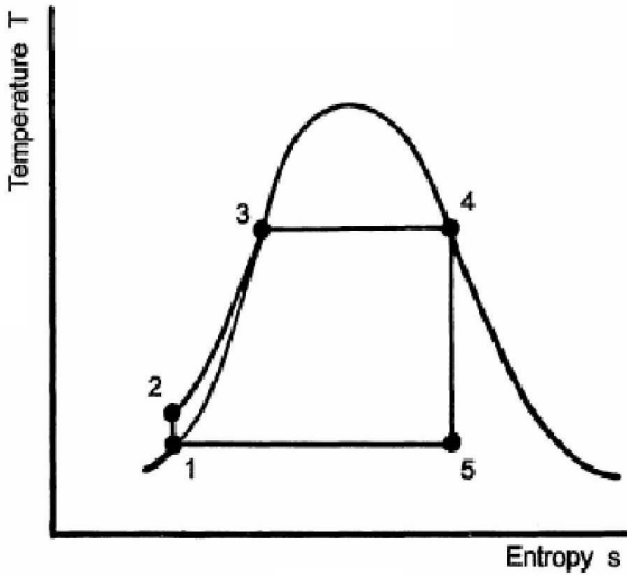


## إختيار التوربين Turbine Selection

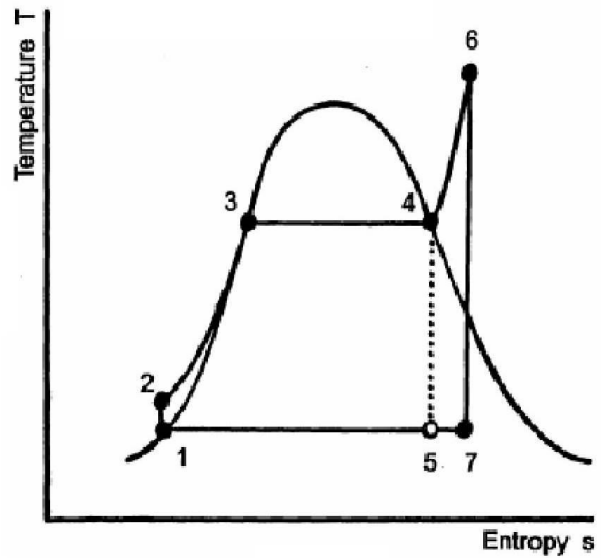
يتم إختيار التوربين في جميع مجالات التطبيق أو الإستخدم بناء على القدرة التنافسية للتوربين والذي هي مزيج من عدة عوامل :

- 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 .

## دورة رانكن Rankine Cycle



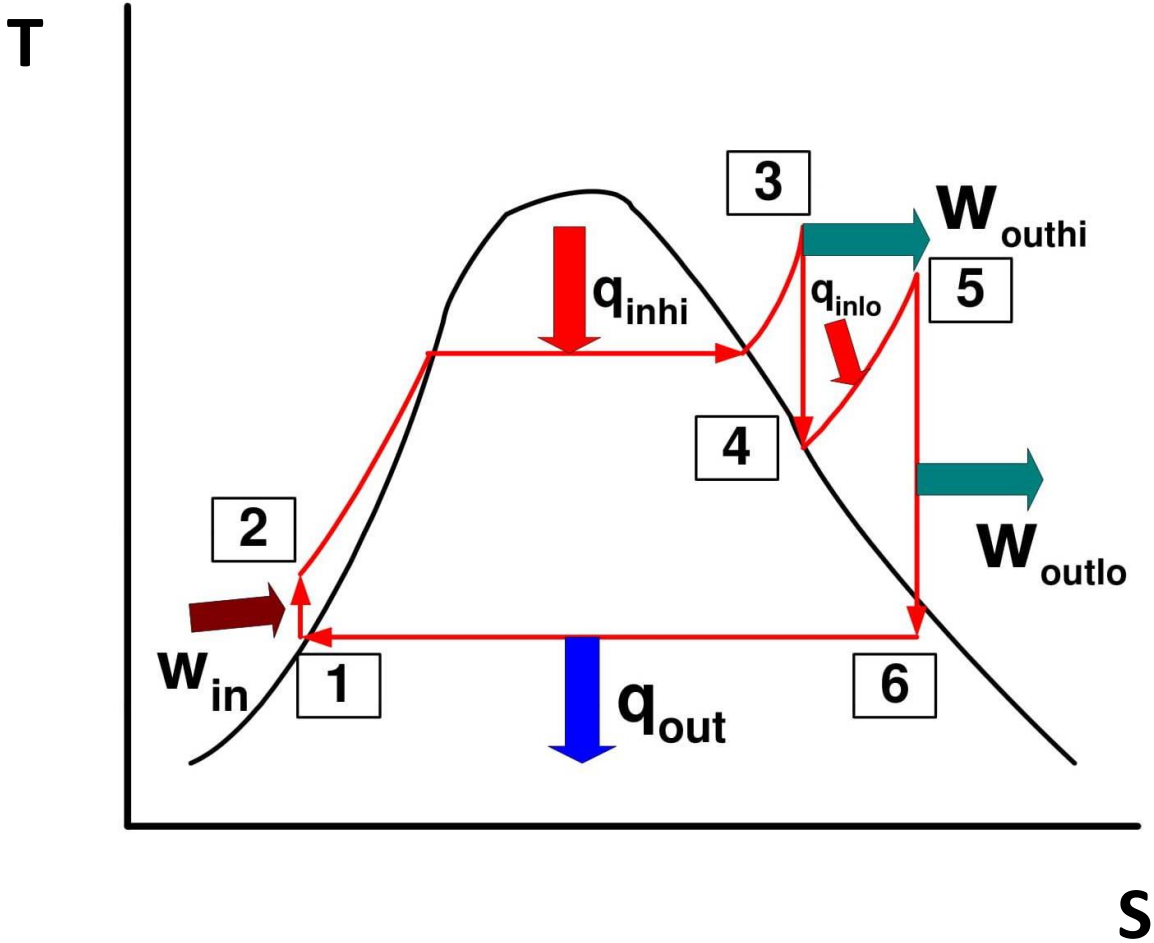
دورة رانكن المشبعة Saturated Rankine cycle  
(بخار مشبع Saturated steam)



دورة رانكن المحمصة Superheated Rankine cycle  
(بخار محمص فائق التسخين Superheated steam)

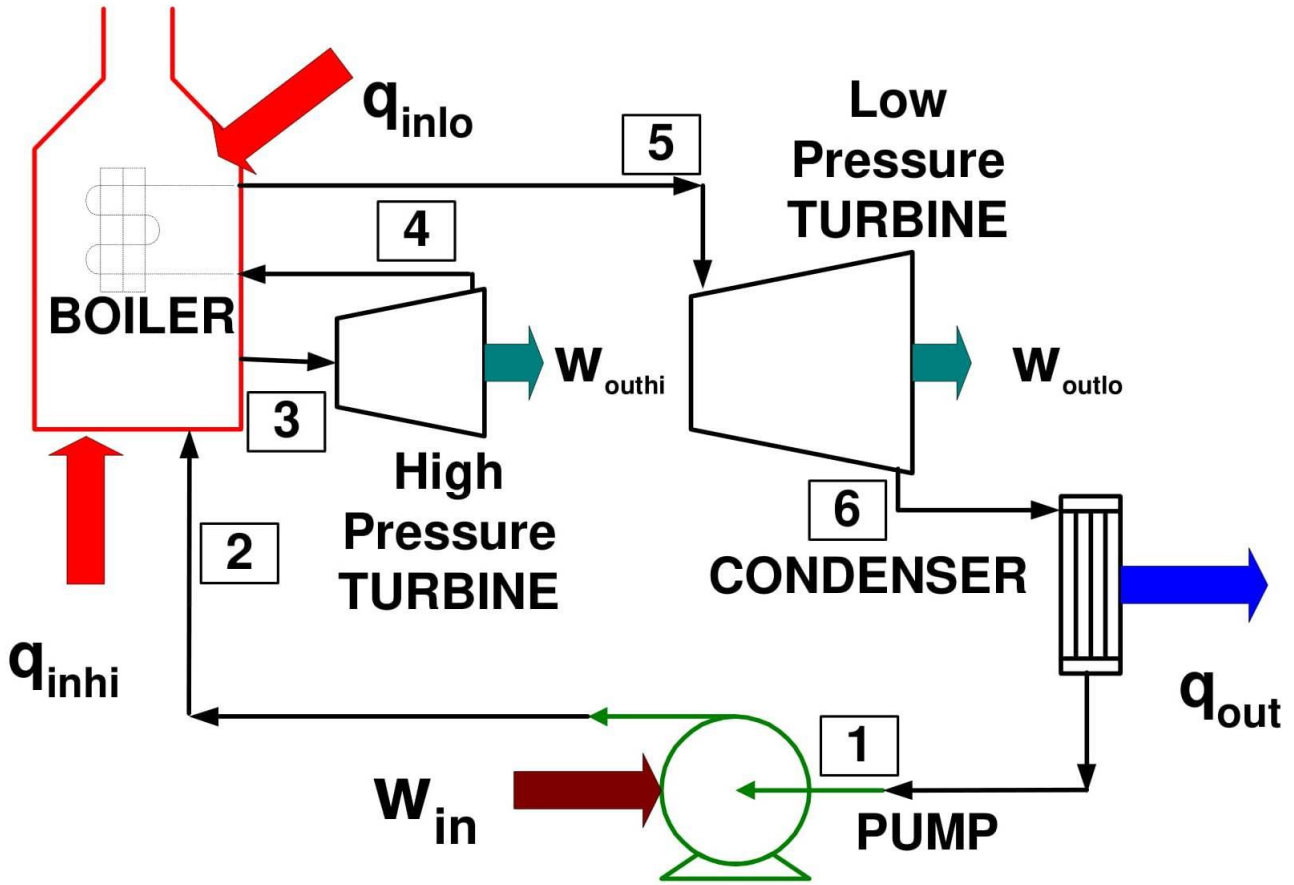
دورة رانكن هي نموذج يُستخدم للتنبؤ بأداء Performance أنظمة التوربينات البخارية . كما تم إستخدامه لدراسة أداء المحركات البخارية الترددية Reciprocating steam engines . دورة رانكن هي دورة ديناميكية حرارية مثالية Idealized thermodynamic cycle لمحرك حراري يعمل على تحويل الحرارة إلى شغل ميكانيكي Mechanical work أثناء تغيير الطور أو حالة مادة التشغيل . إنها دورة مثالية يتم فيها إهمال خسائر الإحتكاك في كل مكون من المكونات الأربعة للدورة والتي هي (مضخة الماء المغذي Feed water pump و المرجل Boiler و مراحل التوربين Turbine stages و المكثف Condenser) . يتم توفير الحرارة خارجيا إلى دورة مغلقة Closed loop ، والتي عادة ما تستخدم الماء كمائع تشغيل Working fluid . سُميت هذه الدورة بدورة رانكن نسبة إلى المهندس والفيزيائي الأسكتلندي وليام رانكن William Rankine مطور الدورة الكاملة للمحرك البخاري ومن المساهمين في تأسيس علم الترموديناميك .

إعادة التسخين على مخطط درجة الحرارة - الإنتروبي ( $T-S$ )  
 Reheat on T-s diagram (Temperature - Entropy)



لاحظ أن  $T_5 < T_3$  ولكن الكثير من المنظومات تعيد تسخين البخار إلى نفس درجة الحرارة ( $T_3 = T_5$ ) عادة لا تتم عمليات إعادة التسخين للتوربينات الأقل من ٥٠ ميكاواط MW .

شكل تخطيطي لدورة رانكن مع إعادة التسخين Schematic of Rankine Reheat Cycle



تصنيف التوربينات البخارية Steam Turbines Classification

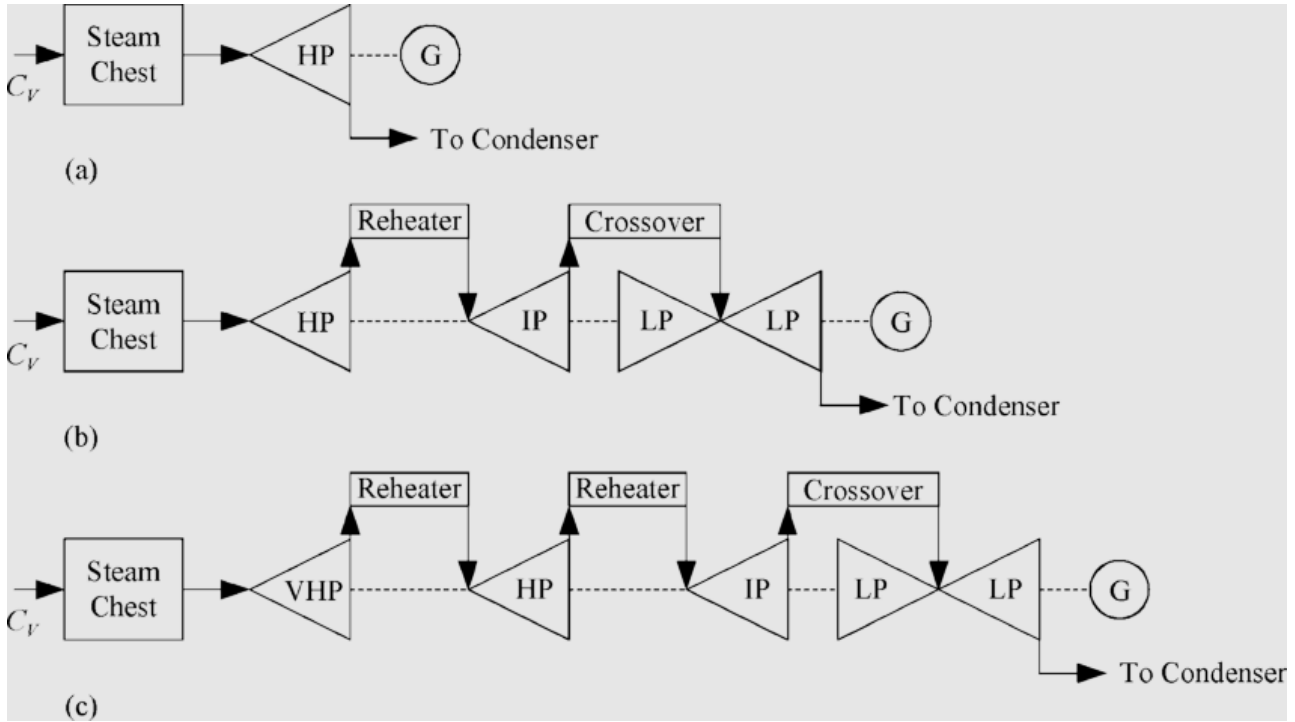
يمكن تصنيف التوربينات البخارية بعدة طرق مختلفة :

- ١- من خلال تفاصيل تصميم المرحلة Details of stage design :
  - دفعي أو رد فعل Impulse or reaction .
- ٢- عن طريق تجهيز البخار وظروف البخار العادم Steam supply and exhaust conditions :
  - التكثيف ، أو عدم التكثيف (الضغط المرتد أو الراجع أو العكسي)
  - Condensing , or Non-condensing (back pressure)
  - الإستخراج أو الإستخلاص التلقائي أو المُنظم ( المُسيطر عليه )
  - Automatic or controlled extraction
  - الضغط المختلط Mixed pressure
  - إعادة التسخين Reheat .
- ٣- عن طريق الغلاف أو ترتيب العمود الدوار Casing or shaft arrangement :
  - غلاف أحادي Single casing أو مركب ترادفي Tandem compound أو مركب عرضي
  - عكسي Cross compound .

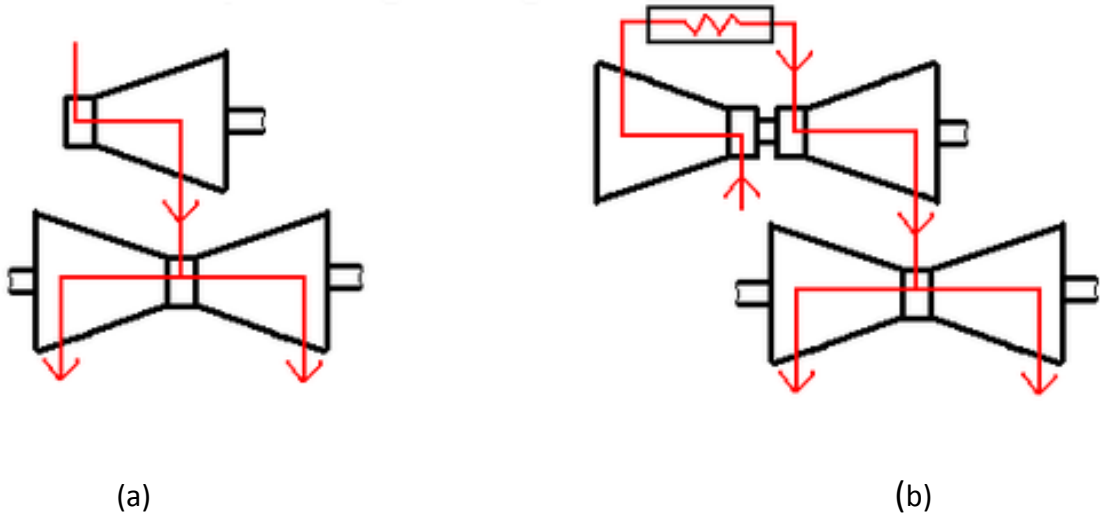
- ٤- حسب عدد مراحل العادم بالتوازي : Number of exhaust stages in parallel  
 - تدفقان Flow أو أربع تدفقات أو ست تدفقات .  
 ٥- عن طريق اتجاه تدفق البخار : Direction of steam flow  
 - التدفق المحوري Axial flow أو التدفق الشعاعي Radial flow أو التدفق المماسي Tangential flow.  
 ٦- أحادية أو متعددة المراحل : Single or multi-stage  
 ٧- عن طريق البخار المجهز ( المغذي ) : Steam supply  
 - محمص أو مشبع Superheat or Saturated .

ملاحظات توضيحية :

- ١- مركب مترادف Tandem compound أو مركب عرضي Cross compound  
 يمكن أن يكون الجزء الدوار Rotor مترادف بحيث يكون المحورين Axles متصلين من نهايتهما أو عرضي بحيث كل توربين يحوى محور منفصل عن الآخر . في المركب العرضي عادة يتصل كل محور بمولد Generator منفصل ويمكن إستخدام مولد واحد فقط بإستخدام صندوق التروس Gearbox .



شكل يوضح ثلاثة تكوينات مركبة مترادفة Tandem compound من التوربينات البخارية (a) بدون إعادة تسخين Without reheat (b) مع إعادة تسخين واحدة Single reheat (c) مع إعادة تسخين مزدوجة Double reheat .

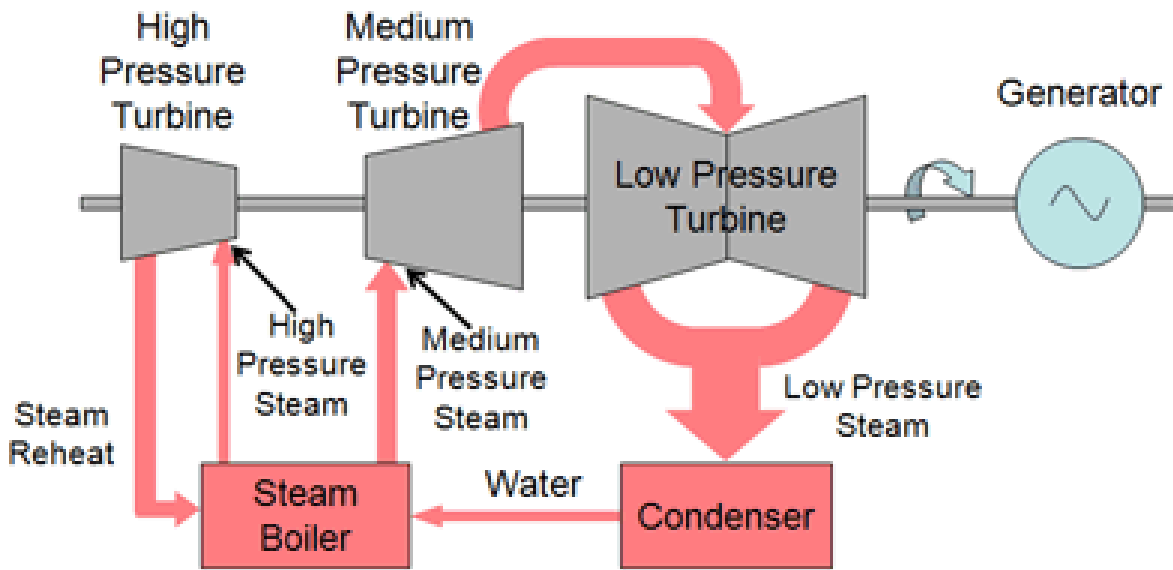


شكل يوضح ترتيب المركب العرضي (a) Cross compound غلافان بتدفق مزدوج (b) Two- casing double flow غلافان بتدفق مزدوج مع إعادة التسخين . Two- casing double flow with reheat



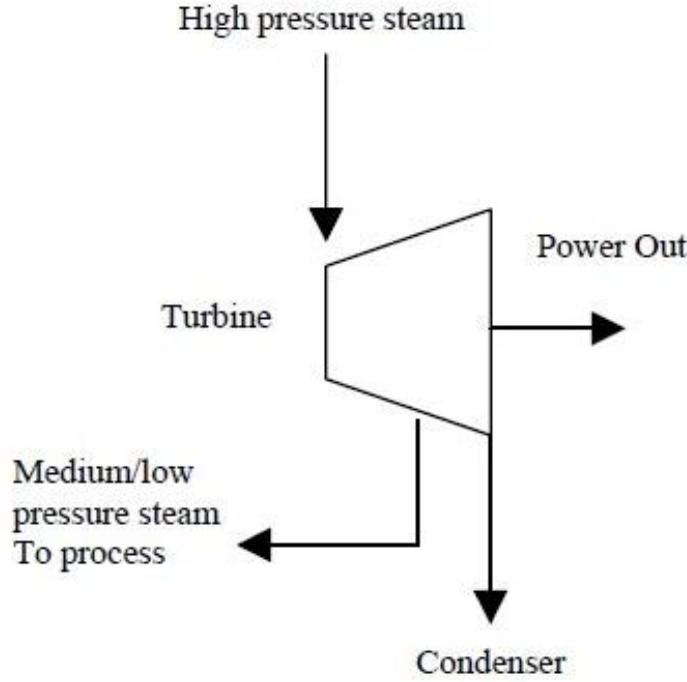
شكل يوضح مسقط أفقي لتوربين بخاري ذو مركب عرضي Top view of Cross compound steam turbine

٢- الضغط المختلط Mixed pressure : يتم تشغيل التوربينات ذات الضغط المختلط بواسطة نوعين مختلفين من البخار (الضغط العالي والضغط المنخفض (High pressure (HP) and low pressure (LP) يمكن تصميمهما أيضا لثلاثة أنواع مختلفة من البخار (الضغط العالي والضغط المتوسط (Intermediate pressure (IP) والضغط المنخفض) لتوليد الطاقة Power generation هذه التوربينات هي الأكثر ملاءمة للتطبيقات التي يتم فيها إسترداد الحرارة المهدرة Waste heat لتوليد الطاقة ، مثل محطات الدورة المركبة لتوربين الغاز (GTCC) Gas Turbine Combined Cycle ومصانع اللباب والورق Pulp and paper factories ، ومصانع الأسمنت Cement plants. هذه التوربينات لا تسمح فقط بالإختيار الإقتصادي والأمثل لظروف الضغط ودرجة الحرارة لمولدات البخار لإسترداد الحرارة Heat Recovery Steam Generator (HRSG) والمراجل ، ولكن يمكن إستخدامها أيضا عند إستخدام بخار مختلف من مرجل موجود ومرجل جديد لإدارة التوربين . إذا لزم الأمر ، يمكن إستخراج بخار العملية Process steam من التوربين ، في حين يتم إستخدام البخار المتبقي لتوليد الطاقة .



شكل يوضح توربين بخاري متعدد المراحل (الضغط المختلط Mixed pressure) Multi stage steam turbine

٣- يحتوي التوربين البخاري مع الإستخراج أو الإستخلاص - التكتيف Extraction - condensing steam turbine على مخرجين كما هو موضح في الشكل أدناه . المخرج الأول يستخرج البخار بضغط متوسط Intermediate pressure لتغذية عملية التسخين Heating process بينما يستخرج المخرج الثاني البخار المتبقي بضغط منخفض Low-pressure لغرض التكتيف Condensation . يمكن إيقاف إستخراج الحرارة من المخرج الأول لتوليد المزيد من القدرة . وتجعل صمامات التحكم بالبخار Steam control valves في هذا المخرج هذا البخار شديد المرونة Flexible وتسمح بضبط وتنظيم الإنتاج حسب الطلب . يتجه البخار من المخرج الثاني إلى غرفة التكتيف (مبادل حراري Heat exchanger) Condensation chamber حيث يتم خفض درجة حرارة البخار بواسطة ماء التبريد Cooling water . ثم يعود الماء المكثف Condensed water إلى المرجل من أجل إعادة تجديد أو توليد الطاقة الكهربائية ، لذلك ، يُعرف أيضا بأسم التوربين البخاري المُتجدد



شكل يوضح التوربين البخاري مع الإستخراج أو الإستخلاص – التكتيف Extraction - condensing steam turbine

المزايا Advantages :

- يمكن إستخدام هذا النوع من التوربينات البخارية لتوليد كمية كبيرة من الطاقة الكهربائية .
- إنها توربينات مرنة مع القدرة على تنظيم الإنتاج حسب الحاجة المتغيرة .

السلبيات Disadvantages :

- التوربينات مكلفة مع الكثير من المكونات المساعدة Auxiliary components .
- إن طرح الحرارة Heat rejection في عملية التكتيف يقلل من الكفاءة الكلية Overall efficiency للنظام .
- عادة ما يتم إستخدامها على المستوى الصناعي Industrial level وتتطلب تكويننا معقدا .

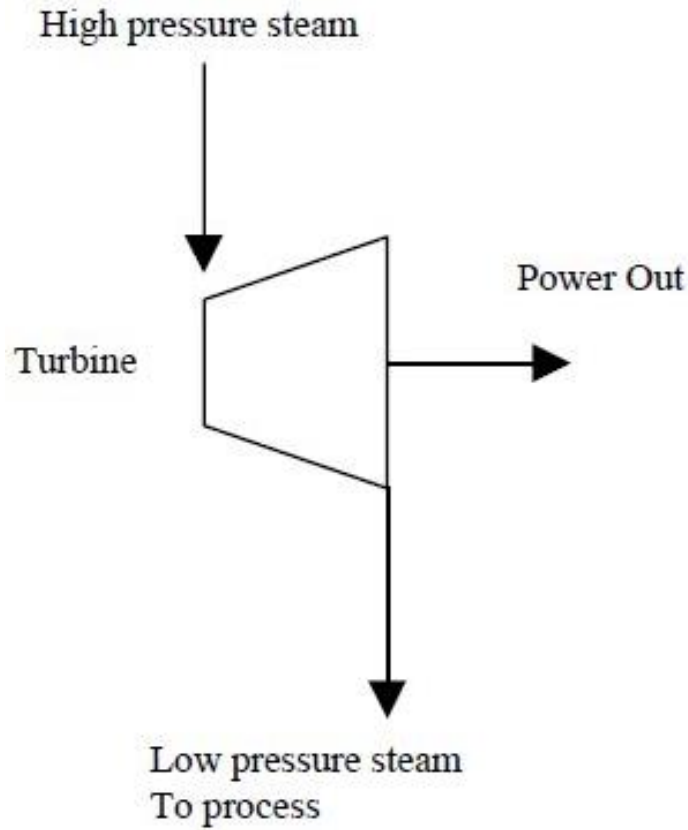
٤- يستخدم التوربين البخاري غير المكثف Non-condensing steam turbine بخار عالي الضغط لتدوير الريش . ثم يترك هذا البخار التوربين عند الضغط الجوي Atmospheric pressure أو الضغط المنخفض . يعتمد ضغط بخار المخرج على الحمل Load ، لذلك ، يعرف هذا التوربين أيضا بالتوربين البخاري ذي الضغط الخلفي أو العكسي back pressure steam turbine . يستخدم هذا البخار منخفض الضغط لأغراض المعالجة والعمليات Process steam ويتطلب إمدادات ثابتة ومستقرة من بخار الضغط المنخفض ولا يستخدم للتكتيف .

المزايا :

- تكوين هذا التوربين البخاري بسيط جدا .
- أنها غير مكلفة نسبيا بالمقارنة مع التوربينات البخارية ذات التكتيف والإستخراج .
- تتطلب مياه تبريد أقل جدا أو ( بدون ) .
- كفاءة أعلى لأنها لا تطرح أو تفقد الحرارة في عملية التكتيف .

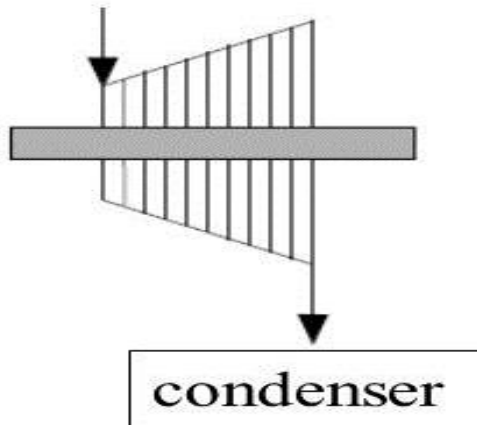
السلبيات :

- أكثر سلبيات هذا النوع من التوربينات البخارية هي أنها غير مرنة للغاية . حيث لا يمكن التحكم في إنتاج هذا التوربين لأنه لا يسمح بتغيير ضغط ودرجة حرارة البخار ، لذلك يعمل بشكل أفضل مع الحمل الثابت Constant load .
- يحدد الحمل الحراري Thermal load لهذا التوربين التدفق الكتلي للبخار Flow of steam mass مما يجعل من الصعب تغيير قيمة الإنتاج Output value . الطرق الأخرى لتنظيم الإنتاج تقلل من كفاءة النظام ككل .



شكل يوضح التوربين البخاري غير المكثف (الضغط العكسي) Non-Condensing (Back-Pressure) Steam Turbine

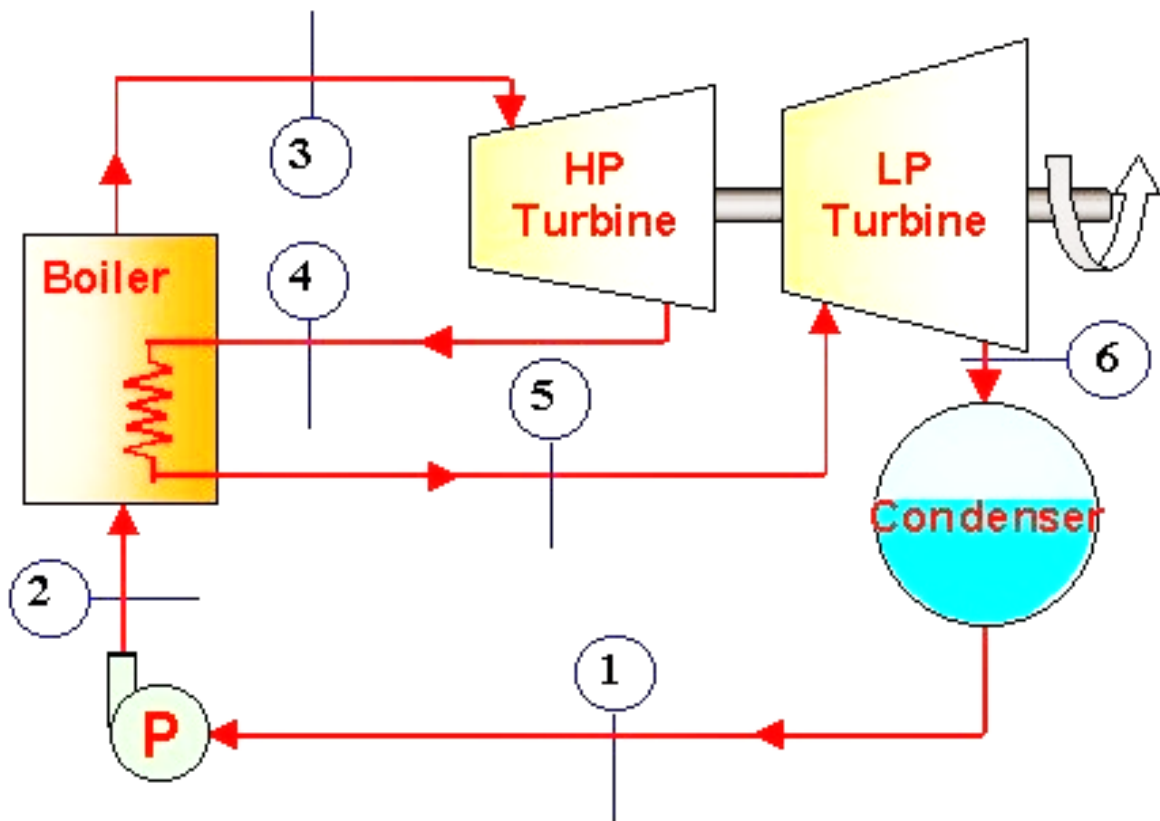
٥- التوربين البخاري ذو التكثيف الكامل Fully condensing type turbine يكون متصل مباشرة بالمكثف كما في الشكل أدناه . ولن يكون هناك أية مصائد بخار Steam trap من مرحلة الضغط العالي HP إلى مرحلة الضغط المنخفض LP . التطبيق المثالي لهذا النوع من التوربينات هو محطة توليد الكهرباء . والغرض الرئيسي هو استخدام البخار لتوليد الطاقة . هنا يعمل التوربين على تحويل الكثير من طاقة البخار القادم إلى طاقة ميكانيكية والذي يخرج من التوربين بدرجة حرارة وضغط منخفض جدا (غالبا ما يكون فراغ Vacuum) الذي يتم إرساله بعد ذلك إلى المكثف ليتم تكثيفه .

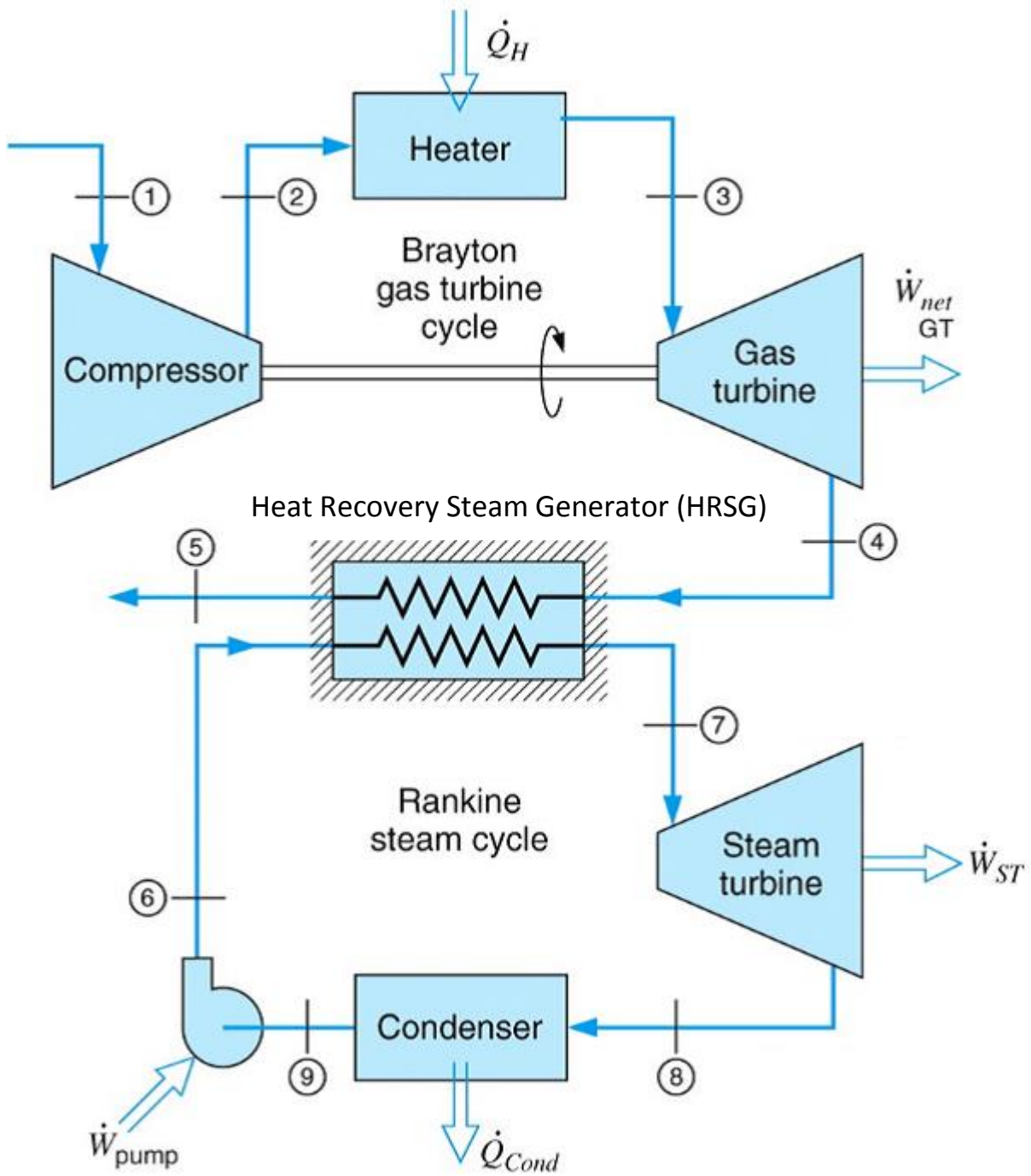




٦- توربين بخاري مع إعادة التسخين **Reheat steam turbine** : في هذا التصميم يمر البخار من خلال جزء من التوربين البخاري ، ثم يعاد إلى المرجل ويتم إعادة تسخينه . بعد إعادة التسخين ، يتم إعادة البخار إلى التوربين البخاري لغرض تمدد Expansion إضافي . هذا يضيف مستوى من التعقيد ، لكنه يزيد من كفاءة المحطة التي تعمل بالوقود الأحفوري Fossil-fueled . لا يتم استخدام إعادة التسخين في تطبيقات الطاقة الحرارية الأرضية Geothermal energy أو الطاقة الشمسية Solar energy . ولقد جربت في التطبيقات النووية وزادت الكفاءة بنسبة ( ٥ % ) ، لكنها صعبة وغير آمنة إلى حد ما .

المخطط البياني أدناه يوضح دورة البخار \ الماء Steam/water cycle كاملة لتوربين مع إعادة التسخين . يخرج بخار الضغط العالي (3) من المرجل ، ويمر خلال توربين الضغط العالي . الذي أستخرج (أنتزع) الكثير من الشغل من البخار وخفض ضغطه ودرجة حرارته . يُطلق على البخار الخارج من توربين الضغط العالي (4) أسم بخار إعادة التسخين البارد Cold Reheat Steam . وبعد المرور عبر قسم إعادة تسخين في المرجل (5) ، يُسمى البخار بأسم بخار إعادة التسخين الحار Hot Reheat Steam . يتم توجيه هذا البخار المعاد تسخينه إلى توربين الضغط المنخفض حيث يتم استخراج شغل إضافي . ثم يُستفد البخار المستهلك Spent steam في المكثف (6) . تتكرر العملية باستمرار حيث يتم ضخ البخار المكثف مرة أخرى إلى المرجل لتحويله إلى بخار بضغط عالي .

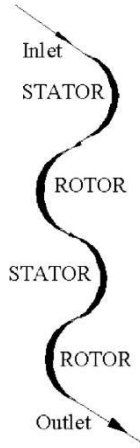




شكل يوضح الدورة المركبة Combined Cycle

## مرحلة التوربين البخاري Steam Turbine Stage

تتكون المرحلة التوربينية من صف ثابت مستقر Stationary stator row وتشمل ( ريش توجيه Guide vanes و حلقة فوهة Nozzle ring ) وصف قرص دوار Rotating rotor row . في ريش التوجيه يتم تمدد البخار ذو الضغط العالي ودرجة الحرارة العالية مما ينتج سرعة تدفق Flow velocity عالية للبخار الذي يتم توجيهه بواسطة ريش التوجيه نحو ريش الجزء الدوار Rotor blades عند زاوية مناسبة . Appropriate angle . في الجزء الدوار يتم تغيير اتجاه التدفق ويتم إمتصاص الطاقة الحركية Kinetic energy لمائع التشغيل (البخار) Working fluid بواسطة عمود الجزء الدوار Rotor shaft الذي ينتج الطاقة الميكانيكية Mechanical energy .



## أنواع التوربينات البخارية Types of Steam Turbines

### ١- التوربين الدفعي Impulse Turbine :

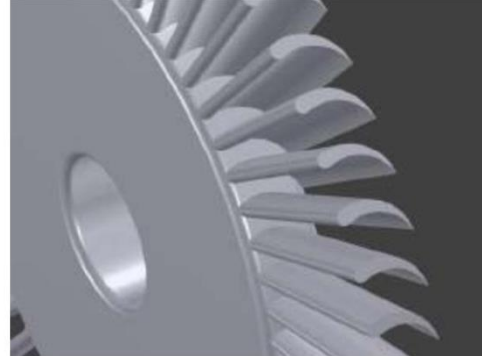
تتم عملية التمدد Expansion الكامل للبخار في ريش الفوهة ثابتة Stationary nozzle blades ويتم تحويل طاقة السرعة Velocity energy إلى شغل ميكانيكي Mechanical work في ريش التوربين Turbine blades .

### ٢- توربين رد الفعل Reaction Turbine :

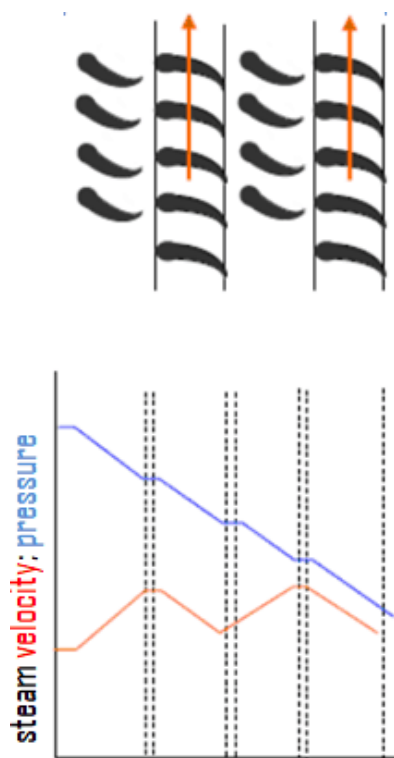
يحدث تمدد البخار جزئيا في ريش الفوهة ثابتة وجزئيا في الجزء الدوار . ومع ذلك ، فإن تحويل الطاقة الحركية إلى شغل ميكانيكي يحدث فقط في ريش الجزء الدوار (يحدث إنخفاض الضغط مع التمدد وتوليد الطاقة الحركية في الريش المتحركة Moving blades ) .



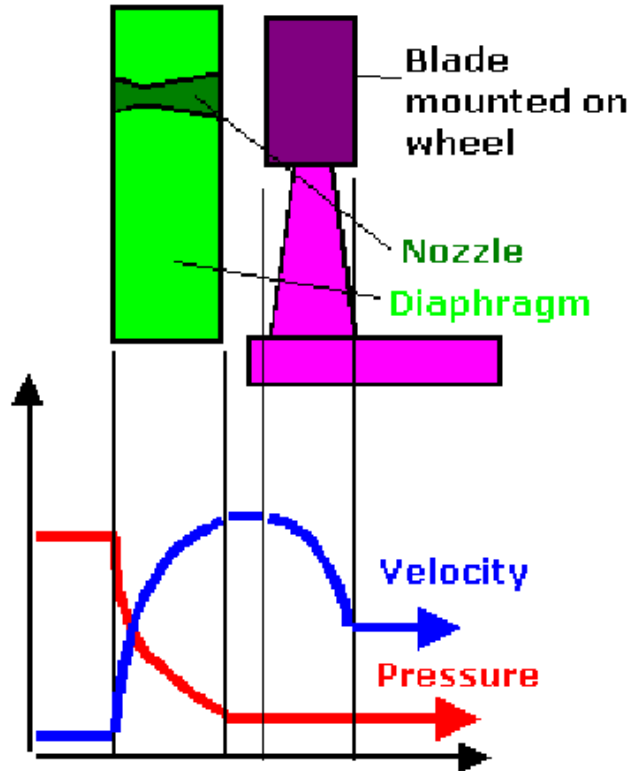
التوربين الدفعي Impulse Turbine



توربين رد الفعل Reaction Turbine



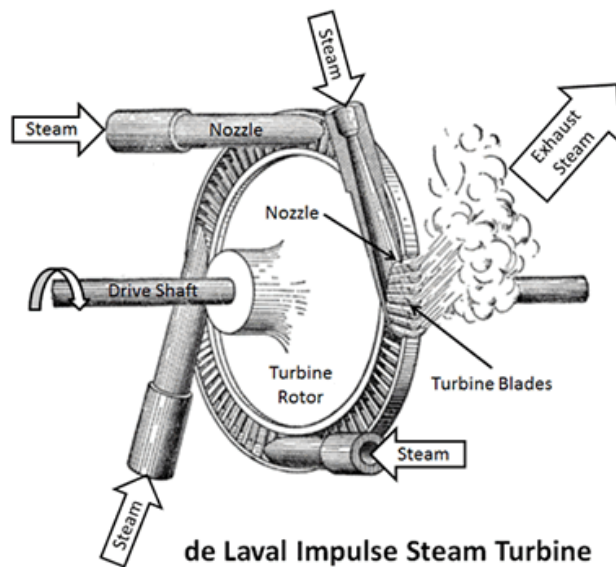
توربين رد الفعل بارسون  
Parsons Reaction Turbine



توربين دي لافال الدفعي De Laval Impulse Turbine

**ملاحظة توضيحية :**

- ١- توربين دي لافال De-Laval نسبة إلى المهندس السويدي غوستاف دي لافال Gustaf de Laval (1845 – 1913) مخترع التوربين الدفعي .
- ٢- 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) .



de Laval Impulse Steam Turbine

## التوربين الدفعي - رد الفعل Impulse Reaction Turbine

التوربينات الحديثة ليست تماما دفعية أو رد فعلية ، بل هي مركبة من الأثنين معا . يتم تحقيق إنخفاض الضغط جزئيا في الفوهات وجزئيا في الريش المتحركة التي تم تصميمها بحيث يتم تمدد البخار فيها.

تنتج السرعة العالية النفاثة High velocity jet من الفوهات دفعة على الريشة المتحركة والنفاث الخارج من سرعة لا تزال أعلى من الريش المتحركة ينتج عنه ردة فعل Reaction .

بدأ التوربين الدفعي بإستخدام رد فعل يصل إلى (٢٠٪) عند جذر Root الريش المتحركة من أجل مواجهة الكفاءة الضعيفة الناتجة من الصفر أو حتى من رد الفعل السلبي Negative reaction .

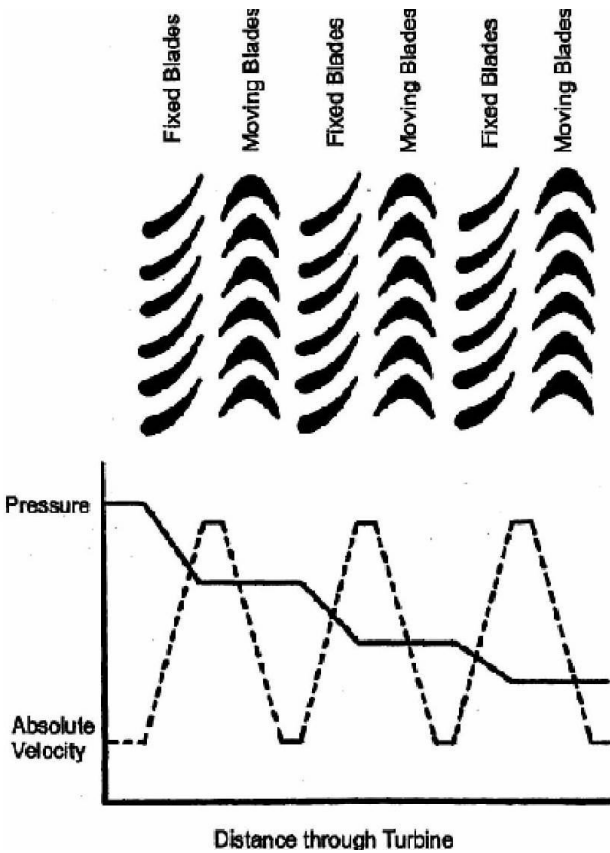
أنخفضت نسبة رد الفعل عند جذور التوربينات الرد فعلية إلى أقل من (٣٠٪ إلى ٤٠٪) مما أدى إلى تقليل عدد المراحل المطلوبة والحفاظ على نسبة رد فعل (٥٠٪) عند نقطة الوسط Mid point . حيث سيكون إنخفاض المحتوى الحراري Enthalpy في الجزء الدوار نصف الإجمالي للمرحلة .

قد يكون الوصف الأكثر دقة للتصميم المركب هو :

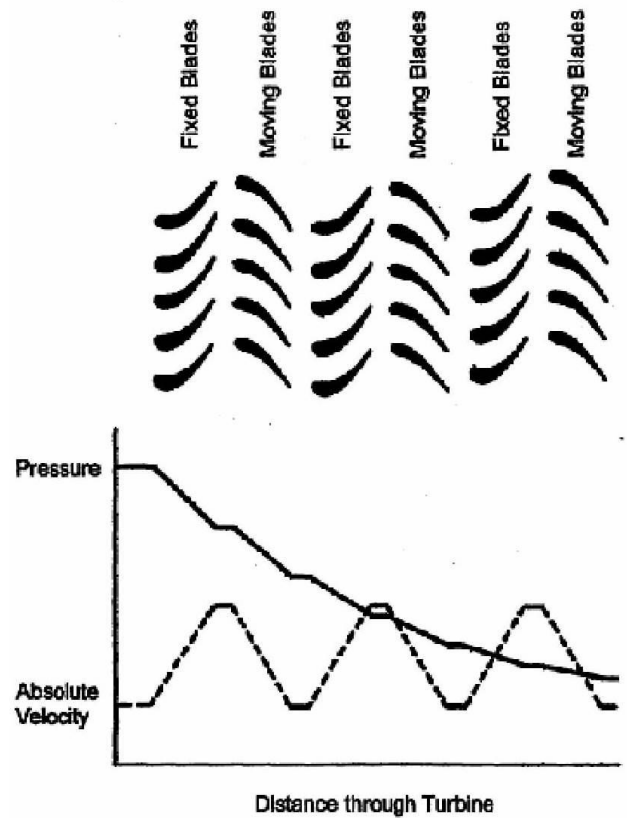
- توربين القرص Disc والحاجز المعدني الرقيق Diaphragm بإستخدام تركيب ريش منخفضة رد الفعل Low reaction blading .

- توربين الجزء الدوار الأسطواني Drum rotor بإستخدام تركيب ريش عالية رد الفعل High reaction blading .

## التدفق خلال مرحلة التوربين البخاري Flow Through Steam Turbine Stage



حالات وتركيب ريش التوربين الدفعي  
Impulse turbine blading & conditions



حالات وتركيب ريش توربين رد الفعل  
Reaction turbine blading & conditions

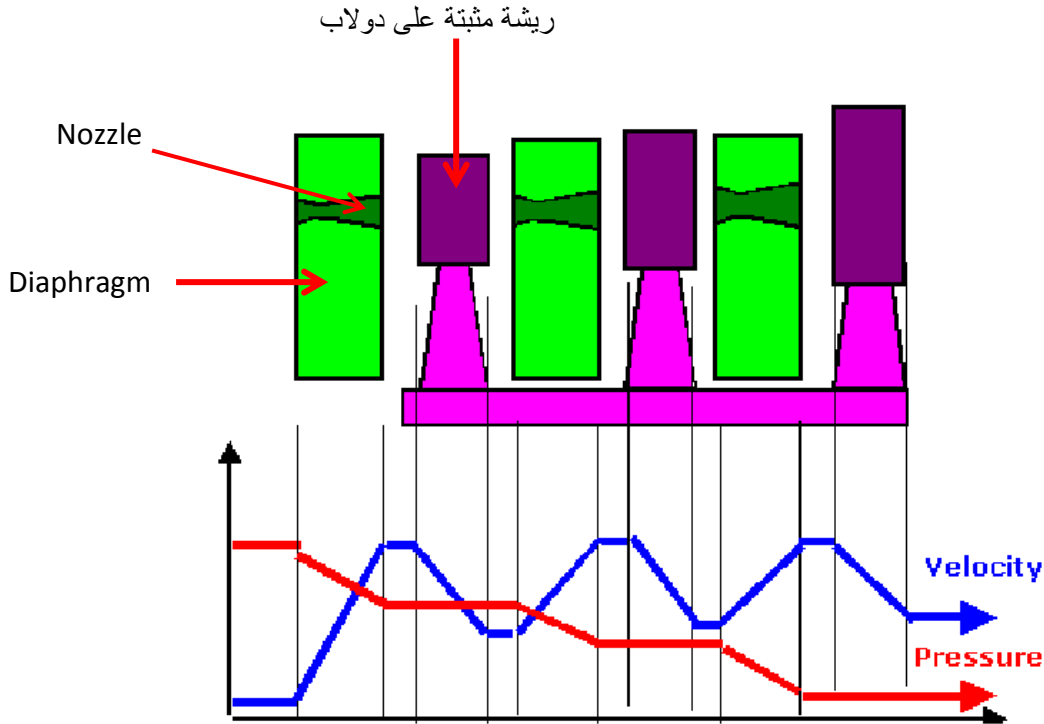
## تركيب التوربينات البخارية Compounding of Steam Turbines

يتم إستخدام التركيب Compounding لتقليل سرعة دوران التوربين الدفعي إلى حدود عملية ، ويتم تحقيقه بإستخدام أكثر من مجموعة من الفوهات Nozzles ، الريش ، الأجزاء الدوارة ، في سلسلة ، مرتبطة بإحكام إلى عمود مشترك ؛ بحيث يتم إمتصاص ضغط البخار أو سرعة النفث من قبل التوربين في مراحل . هنالك ثلاثة أنواع رئيسية من تراكيب التوربينات الدفعية وهي :

- ١- تركيب الضغط Pressure compounded .
- ٢- تركيب السرعة Velocity compounded .
- ٣- توربينات دفعية ذات تركيب الضغط والسرعة Pressure and velocity compounded impulse turbines .

### تركيب الضغط Pressure compounded :

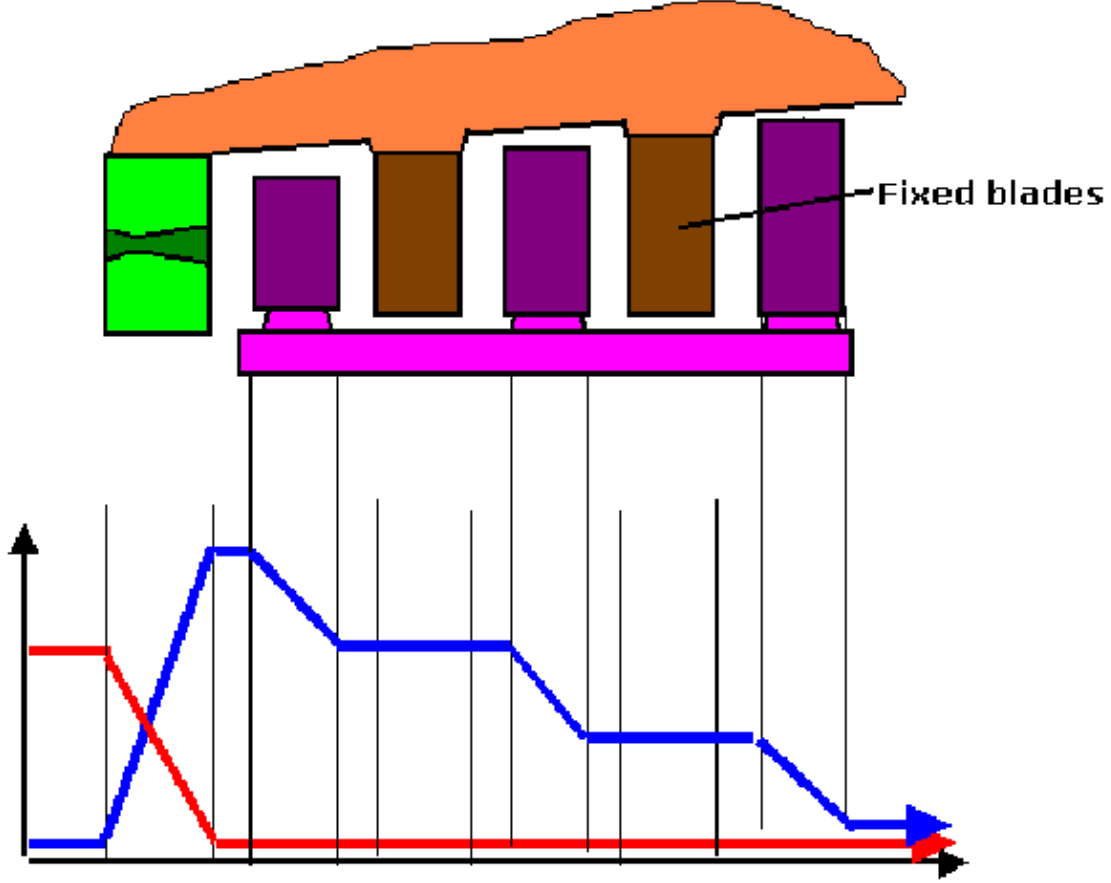
يتضمن تقسيم الإنخفاض الكامل للضغط إلى سلسلة من إنخفاضات أقل للضغط الصغير عبر عدة مراحل من التوربين الدفعي . يتم تركيب الفوهات في حاجز معدني رقيق Diaphragm مغلق ثابت في الغلاف الذي يفصل غرفة دولاب Wheel chamber واحدة عن الأخرى . يتم تثبيت جميع الأجزاء الدوارة على نفس العمود .



شكل يوضح توربين تركيب الضغط (توربين راتو Rateau) Pressure Compounding

## تركيب السرعة Velocity compounded :

يتم تحقيق إنخفاض السرعة من خلال العديد من صفوف الريش المتحركة بدلا من صف واحد من الريش المتحركة . وتتكون من فوهة أو مجموعة من الفوهات و صفوف من الريش المتحركة متصلة بالجزء الدوار أو الدولاب و صفوف من الريش الثابتة Fixed blades المرتبطة بالغلاف Casing .



شكل يوضح توربين تركيب السرعة (توربين كورتيس Curtis) Velocity Compounded

### ملاحظة توضيحية :

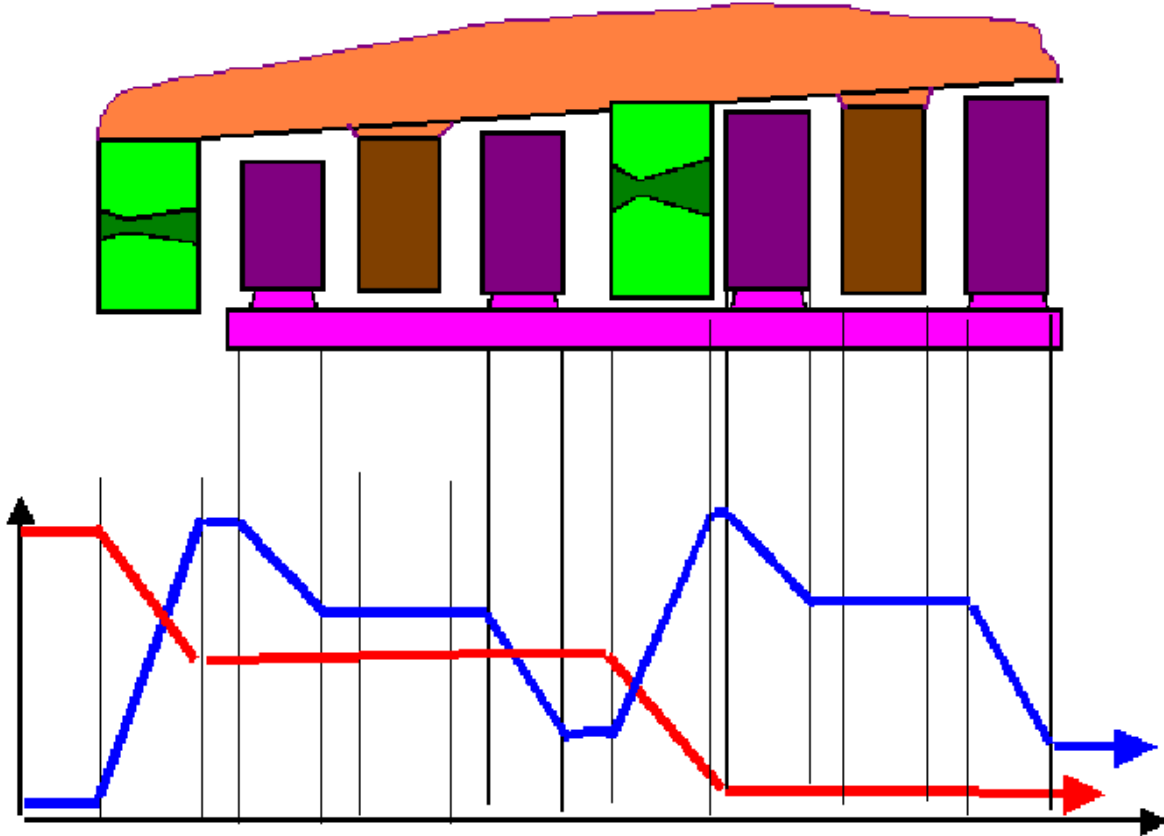
١- توربين راتو Rateau نسبة إلى المهندس الفرنسي أوغست كميل إدموند راتو Auguste Rateau (١٨٦٣ - ١٩٣٠) المتخصص في التوربينات .

٢- توربين كورتيس Curtis نسبة إلى جارلس غوردون كورتيس C.G. Curtis ( ١٨٦٠-١٩٥٣) مخترع أمريكي أبدع 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 .

توربينات دفعية ذات تركيب الضغط والسرعة :

### Pressure and velocity compounded impulse turbines

لهذا النوع من تراكيب التوربين ميزة تسمح بإنتاج جزء دوار مختزل أو قصير Shortened rotor مقارنة بالنوع ذات تركيب السرعة .  
في هذا التصميم يتم الحفاظ على سرعة البخار Steam velocity عند الخروج إلى الفوهات بشكل مناسب وبالتالي تقل سرعة الريشة Blade speed (ومن ثم سرعة الجزء الدوار دورة/دقيقة Rotor rpm) .



شكل يوضح توربين ذو تركيب الضغط والسرعة Pressure-Velocity Compound



مقارنة بين التوربينات الدفعية وتوربينات رد الفعل  
Comparison between Impulse & Reaction Turbines

توربينات رد الفعل Reaction Turbines	التوربينات الدفعية Impulse Turbines
تستخدم توربينات رد الفعل قوة رد الفعل Reaction force الناتجة أثناء تسارع البخار من خلال الفوهات التي يكونها الجزء الدوار .	يحتوي التوربين الدافع على فوهات ثابتة توجه تدفق البخار إلى نفاثات عالية السرعة High speed jets .
تتميز الريش بمظهر سطح إنسيابي Aerofoil profile (ممر متقارب Convergent passage) حيث يحدث إنخفاض بالضغط جزئيا في ريش الجزء الدوار .	المظهر الجانبي للريشة Blade profile متناظر أو متماثل Symmetrical حيث لا يحدث انخفاض بالضغط في ريش الجزء الدوار Rotor blades .
كفاءة في مراحل الضغط المنخفض .	مناسب لإمتصاص السرعة العالية High velocity والضغط العالي بفعالية .
تتطلب خلوصية دقيقة لطرف رأس الريشة بسبب تسربات الضغط Pressure leakages .	يكون ضغط البخار ثابتا عبر الريش ، وبالتالي وجود خلوصية دقيقة لطرف رأس الريشة Fine tip clearances غير ضرورية .
عدم الكفاءة في مراحل الضغط العالي High pressure stages بسبب تسرب الضغط حول أطراف الريشة Blade tips .	لا يتم الحفاظ على الكفاءة Efficiency في مراحل الضغط المنخفض Lower pressure stages (لا يمكن تحقيق سرعة عالية في البخار بمراحل الضغط المنخفض) .
يمكن أن تتسبب الخلوصات الدقيقة لطرف رأس الريشة في حدوث تلف Damage لأطراف الريش .	

ملاحظة توضيحية : خلوص الطرف أو الخلوص الطرفي Clearance هو المسافة الضيقة بين طرف Tip أو حافة الريشة المتحركة و غلاف الجزء الثابت Casing of stationary part .



شكل يوضح مدخل الضاغط لمحرك توربيني مروحي ( إي جيه ٢٠٠ Eurojet EJ200) للمقاتلة الأوروبية المتقدمة من طراز يوروفايتر تايفون Eurofighter Typhoon . يظهر فيه ريش الجزئين الدوار والثابت مع الخلوص الطرفي الدقيق بين العضو الدوار (أول مجموعة من الريش) والغلاف الخارجي

## الخسائر أو المفاقيد في التوربين البخاري Losses in Steam Turbine

١- فقدان المظهر الجانبي Profile loss للريشة : بسبب تكوين الطبقة الحدية أو الحدودية Boundary layer على أسطح الريشة . فقدان المظهر هو ظاهرة طبقة حدودية وبالتالي تخضع للعوامل التي تؤثر على نشوء ونمو الطبقة الحدودية . هذه العوامل هي رقم رينولدز Reynolds number ، وخشونة سطح الريشة Surface roughness ، ورقم ماخ المخرج (الخروج) Exit Mach number وسُمك الطرف أو الحافة الخلفية للريشة Trailing edge.

ملاحظات توضيحية :

- رقم رينولدز Reynolds number ورمزه (Re) هو رقم بلا أبعاد (ليس له وحدة قياس) Dimensionless number يُستخدم في ميكانيك الموائع Fluid mechanics للإشارة إلى ما إذا كان تدفق المائع Fluid flow في الجسم أو في مجرى ثابت Steady أو مضطرب Turbulent . نسب هذا الرقم إلى عالم فيزياء إيرلندي اسمه أوزبورن رينولدز Osborne Reynolds (١٨٤٢ - ١٩١٢) ، والذي كان قد اقترح استعمال أرقام رينولدز في عام ١٨٨٣ .
- رقم ماخ Mach number ورمزه (M أو Ma) وهو عدد أو رقم بلا أبعاد يمثل النسبة بين السرعة المحلية لمائع ما وسرعة الصوت في نفس ذلك المائع ، فنقول أن الطائرة تحلق بسرعة (ماخ-١) إذا كانت سرعتها مساوية لسرعة الصوت ، وأنها تحلق بسرعة (ماخ-٢) إذا كانت سرعتها ضعف سرعة الصوت ، وهكذا . سمي هذا الرقم نسبة إلى الفيزيائي والفيلسوف النمساوي إرنست ماخ Ernst Mach .
- تعرف الطبقة الحدية Boundary layer في ميكانيك الموائع بأنها الطبقة من السائل والتي تكون مجاورة لحدود سطح صلب كجدران الوعاء الحاوي له . ويكون تأثير اللزوجة هام جدا ضمن هذه الطبقة . كما تتأثر الطبقة الحدية بطبيعة الجريان . أن مبدأ العمل الأساسي لتشغيل التوربين هو تأثير الطبقة الحدودية بين المائع وجدران الأقراص الدوارة Rotor discs

٢- خسائر ثانوية Secondary loss : بسبب الإحتكاك Friction على جدار الغلاف وعلى جذر الريشة ورأسها Blade root and tip . إنه تأثير الطبقة الحدودية ويعتمد على نفس الإعتبارات كتلك الخاصة بفقدان المظهر الجانبي .

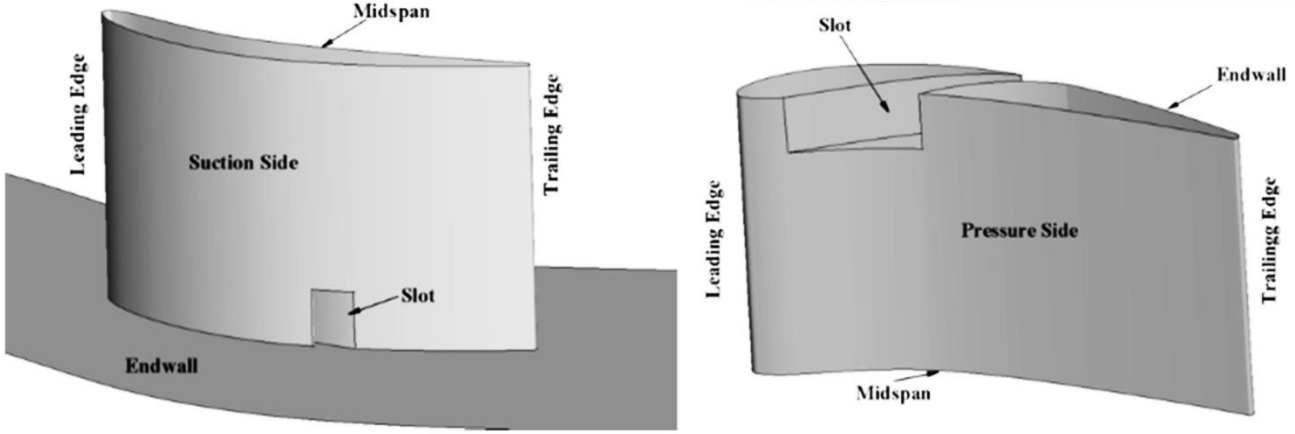
٣- خسائر تسرب الطرف الرأسي Tip leakage loss : ناتجة عن مرور بخار من خلال الخلوصات الطرفية الصغيرة المطلوبة بين الطرف الرأسي للريشة المتحركة Moving blade tip والغلاف أو بين الطرف الرأسي للريشة المتحركة وعمود الدوران Rotating shaft . يعتمد إمتداد أو إتساع التسرب على ما إذا كان التوربين نوع دفعي أو رد فعل . وبسبب إنخفاض الضغط في الريش المتحركة لتوربين رد الفعل ، فإنها تكون أكثر عرضة للتسرب .

٤- خسائر إحتكاك القرص الدوار Disc windage loss : عندما يدور قرص التوربين في الجو البخاري Steam atmosphere ، يكون هناك فقدان بسبب الإحتكاك السطحي Surface friction نتيجة للحركة النسبية Relative motion بين القرص وجزيئات البخار Steam particles . بسبب قوة الطرد المركزي Centrifugal force ، يتدفق البخار إلى الخارج شعاعيا Radially . يمارس سطح القرص المتحرك عملية سحب على البخار ، ويضعه في حركة من الجذر إلى الرأس وينتج دورة Circulation محددة . لذلك يتم فقدان بعض أجزاء الطاقة الحركية والطاقة الحرارية Heat energy للبخار بسبب هذا الإحتكاك .

٥- خسائر سلك الربط المعدني Lacing wire loss : بسبب انسداد الممر البيني الناتج عن وجود أسلاك الربط في الريش الطويلة من مراحل الضغط المنخفض LP Stages . الأسلاك يمكن أن تتضرر من المواد الغريبة ، يمكن أن تكون عرضة للتآكل Corrosion ، كل ما سبق يمكن أن يسبب إختلال التوازن Imbalance في الجزء الدوار . (١)

٦- خسائر الرطوبة Wetness loss : بسبب الرطوبة (قطيرات الماء Water droplets) الموجودة في بخار الضغط المنخفض عند مخرج توربين الضغط المنخفض LP . الخسارة هي مركب من اثنين من التأثيرات . أولا ، إنخفاض الكفاءة بسبب امتصاص الطاقة بواسطة قطيرات الماء وثانيا ، تآكل (تعرية Erosion) الحواف الأمامية Leading edges للريش المتحركة .

٧- خسائر الحلقة Annulus loss : هذه الخسائر تحدث عادة في صف الريش الدوار Rotor blade row . غالبية صفوف ريش التوربين يتم وضعها في أغلفة Casings . هذه الخسارة بسبب الإحتكاك السطحي في الجدران النهائية Endwalls لصفوف ريش التوربين . الشكل أدناه يوضح الجدار النهائي .



Suction side = جانب الشفط

Pressure side = جانب الضغط

Leading edge = الحافة الأمامية للريشة .

Trailing edge = الحافة الخلفية للريشة .

Midspan = منتصف مسافة الإمتداد

Endwall = الجدار النهائي أو الجدار الجانبي Side wall

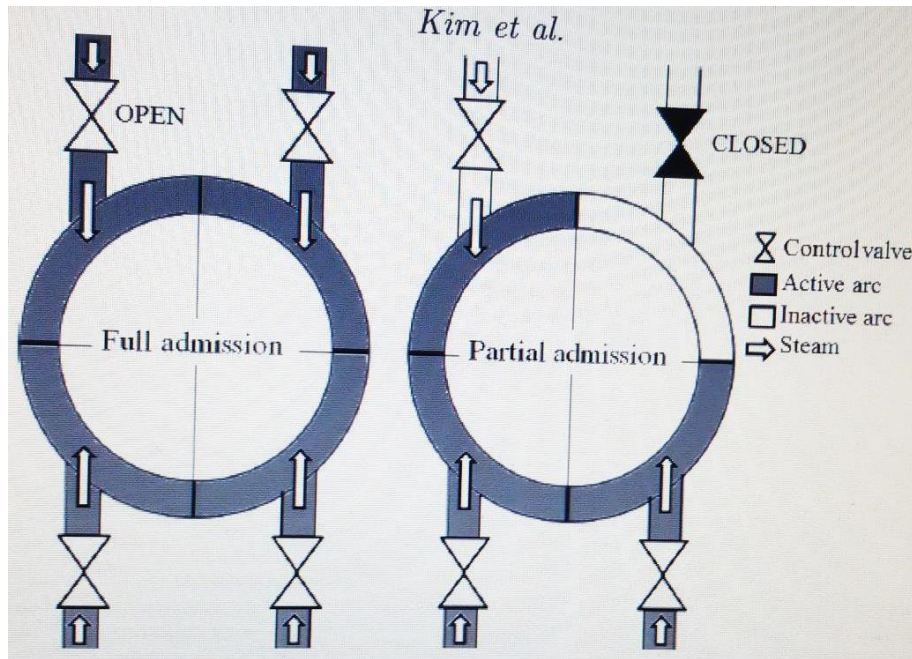
Slot = فتحة أو شق أو أخدود في القرص Disc لإدخال جذر الريشة Blade's root .

٨- خسائر المغادرة Leaving loss : وتسمى أيضا خسائر الترحيل Carryover loss ، أو خسائر العادم Exhaust loss أو خسائر السرعة - المغادرة Leaving-velocity loss (حوالي ٣٪) تحدث في مراحل معينة عندما لا يمكن استعادة الطاقة الحركية للبخار التي تترك الريش الدوارة في المرحلة التالية . بسبب اختلاف في أقطار المرحلة Stage diameters أو لكبر المساحة المحورية Large axial space بين المراحل المتجاورة . عادة ما يحدث هذا في مراحل التحكم Control stages وفي المراحل الأخيرة من المقاطع دون التكتيف Non-condensing sections ، ويرجع ذلك إلى تكوين الدوامات (تيار عكسي Eddies) في الفضاء الحلقي Annular space بين الفوهة والريش المتحركة . إنها الخسارة الأكثر أهمية في التوربين البخاري المتكثف Condensing steam turbine وتزداد عند الأحمال العالية .

٩- خسارة ( السماح بالدخول) أو القبول الجزئي Partial admission loss : بسبب الملء الجزئي Partial filling للبخار ، فإن التدفق بين الريش (في ممرات الريش Blade passages) يتم تسريعه بشكل

كبير مما يتسبب في فقدان القدرة Power . يسبب القبول الجزئي Partial admission خسارة في كفاءة التوربين إذا كان تجهيز البخار إلى التوربين محكوما بعدد الفوهات المستخدمة . وتتمثل الوسائل البديلة للتحكم بالبخار في التحكم بالخانق Throttle-control ، حيث يكون القبول خلال كامل محيط المرحلة الأولى First stage ، ويتحقق التحكم عن طريق تقليل تجهيز البخار الرئيسي . ومن ثم ، فإن القبول الجزئي لا يخضع للتوربينات ذات التحكم بالخانق . يزداد حجم هذه الخسارة مع الشغل المنجز في كل صف Work done per row ، إنخفاض الحرارة ، سرعة الريشة ، عرض الريشة وارتفاعها ، وعدد مرات دخول البخار Number of steam admissions .

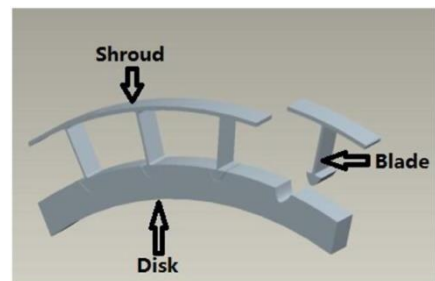
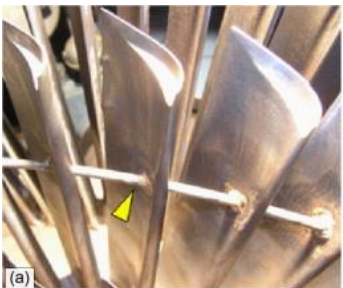
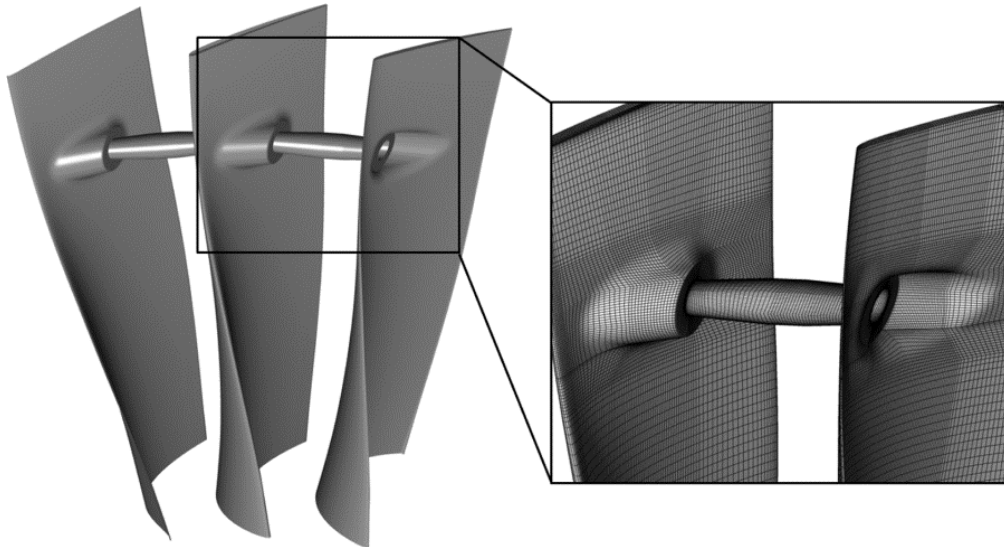
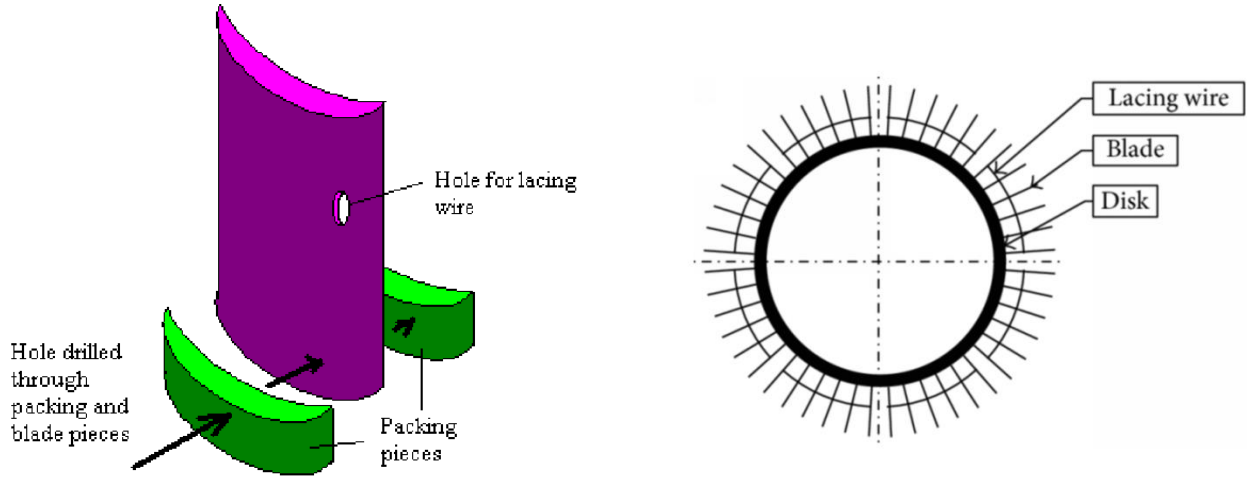
يسبب القبول الجزئي تدفق غير منتظم Non-uniform flow في مدخل المرحلة الأولى . كما هو موضح في الشكل أدناه ، يمكن أن يتدفق البخار فقط من خلال الأقواس النشطة Active arcs المرتبطة بالصمامات المفتوحة Open-valves . عدم الإنتظام يسبب التحميل غير المستقر Unsteady loading الذي ينتج تأثير الصدمة Shock impact والإهتزازات للريش الدوارة الأولى First rotor blades . وما لم يتم تضمين هذا التحميل غير المستقر في تصميم التوربين ، سوف تتعرض موثوقيته أو إعماديته الهيكلية (التركيبية) Structural reliability للخطر. وبالتالي ، فإن التنبؤ بتأثير عدم إستقرارية التحميل على الريش الدوارة لمرحلة التحكم مهم في توفير معلومات دقيقة لغرض دقة التحليلات الميكانيكية والإجهادية Mechanical and fatigue analysis .



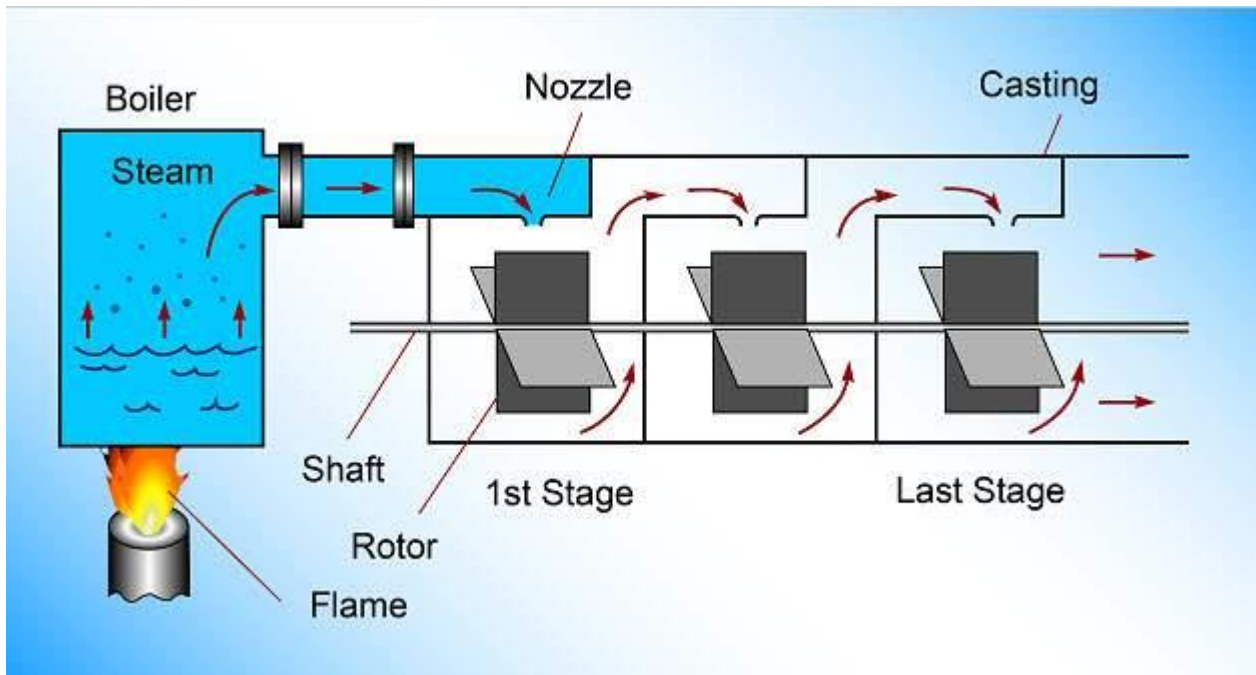
شكل يوضح مفهوم التشغيل في مرحلة التحكم Control stage

**ملاحظة توضيحية (١) :** تكون بنية منظومة ريش التوربين والقرص دائرية أو حلقيية Cyclic structure تتكون من عدد من حزم الريش Blade packets . تحتوي كل حزمة على ريش متعددة متصلة بسلك ربط بيني معدني Lacing wire أو حلقة الغطاء (الدرع أو طوق تقوية) Shroud ring . تشمل مراحل التوربين ذات الضغط المنخفض على ريش نحيلة طويلة Long slender blades تتعرض للتشوه الشديد الناتج عن الانحناء Bending deformation بسبب الترددات الطبيعية Natural frequencies في نطاق التشغيل الأدنى Lower operating range . تمر هذه الريش عبر حالة طنين أو رنين عابرة Transient resonant عند تردد مرور أو إجتياز الفوهة . من أجل الحد من التشوهات الإهتزازية Vibratory deformations ولتوفير دعم أو إسناد إضافي Additional support لتثبيت الريش Blading وبالتالي تقليل أو تخميد

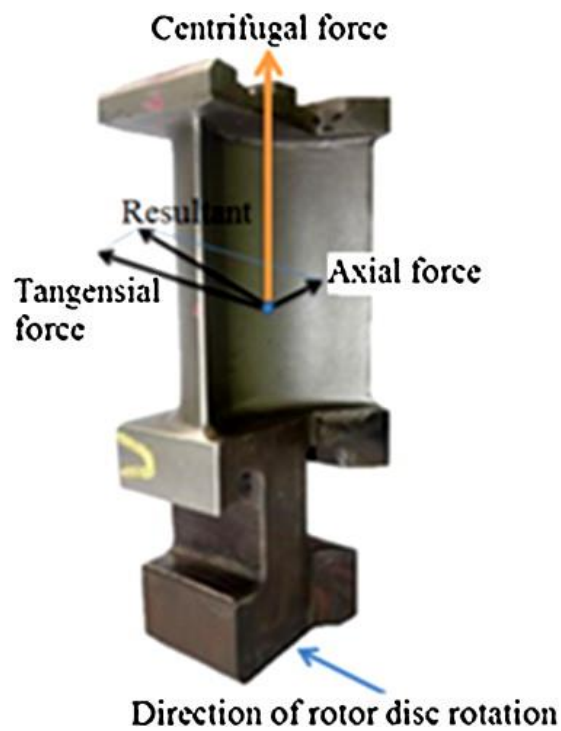
الإهتزازات ، غالبا ما تكون هذه الريش في مراحل الضغط المنخفض مُقواة بتوصيلات أسلاك الربط البيني Lacing wires . هذه الأسلاك هي في الواقع قضبان Rods ذات مقاطع عرضية دائرية Circular cross-sections وترتبط مع الريش عبر ثقوب فيها باستخدام مادة تقسية ( لحام بسبيكة ) Brazing material . في الأشكال أدناه نظام قرص ريشة التوربين النموذجي مع أسلاك الربط البيني . ويمكن ملاحظة أن الريش مُرتبة في مجموعات تسمى حزم الريشة Blade packets . تتكون كل حزمة ريشة من عدد صغير من الريش المترابطة بينيا (عادة ما يتراوح بين ٥ و ٧ ) ريش لمرحل توربين الضغط المنخفض ) .







شكل مبسط يوضح مبدأ عمل التوربين البخاري



شكل يوضح القوى المؤثرة على الريشة أثناء الدوران

## التسميات Nomenclature

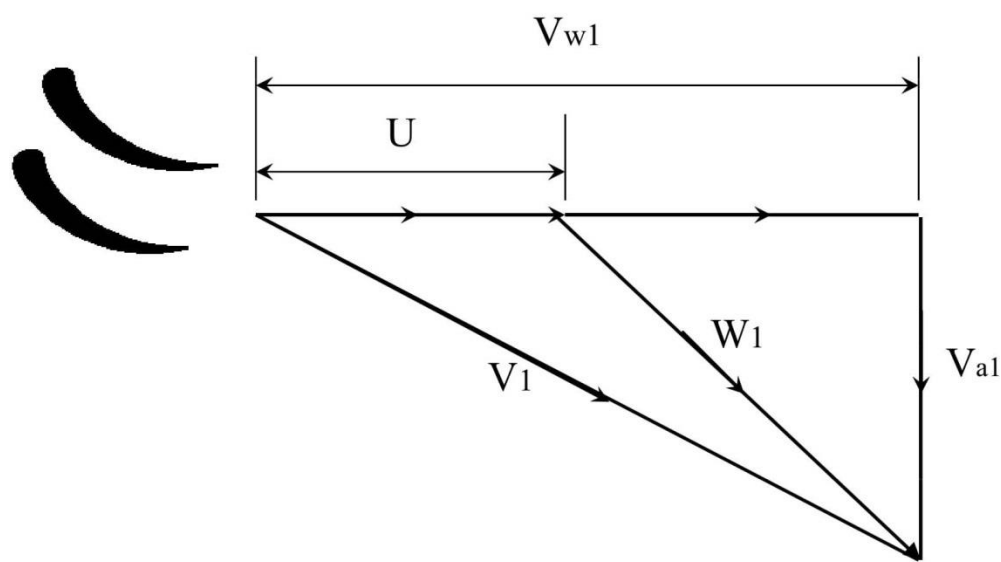
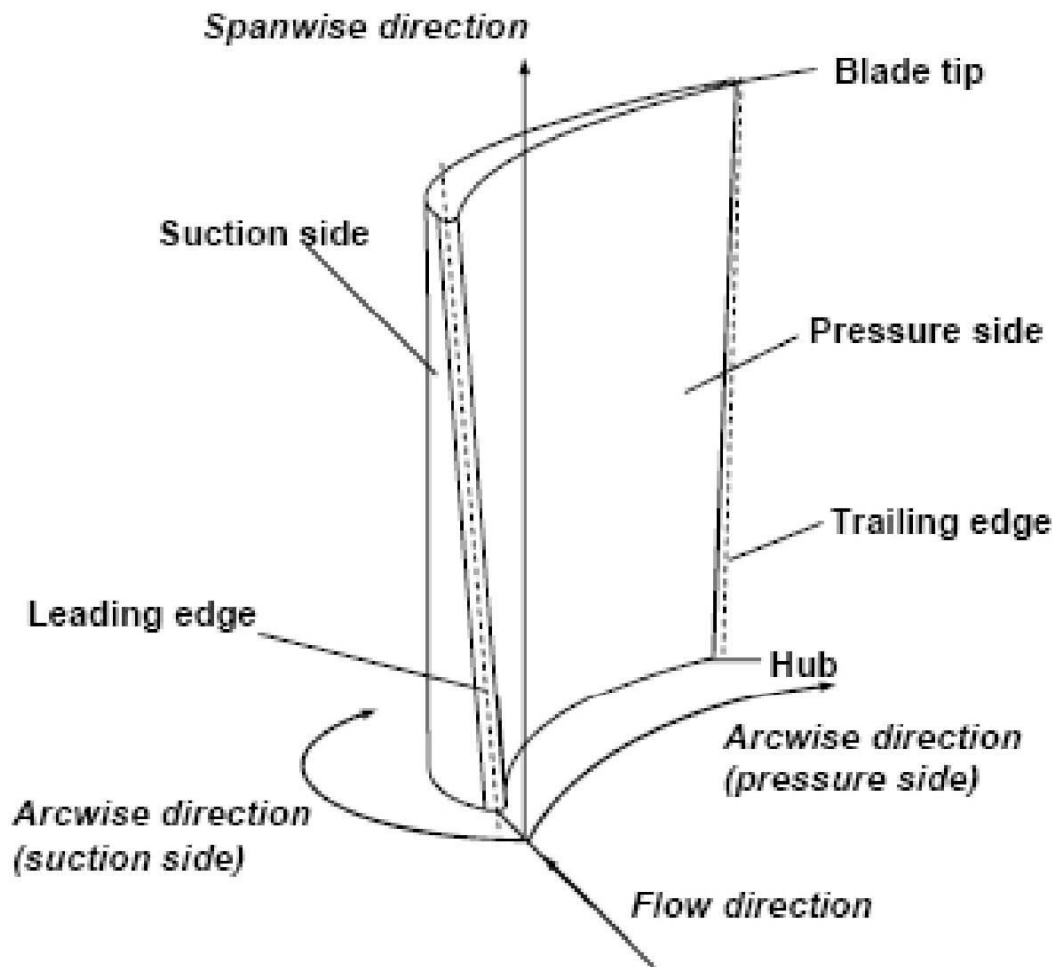
$V$	Absolute velocity of steam	السرعة المطلقة للبخار
$U$	Blade velocity	سرعة الريشة
$W$	Relative velocity of steam	السرعة النسبية للبخار
$V_a = V_f = V_m$	Axial component or flow velocity	المكون المحوري أو سرعة التدفق
$V_w$	Whirl or tangential component	المكون المماسي أو الدوامي
$\alpha$	Nozzle angle	زاوية القوهة
$\beta$	Blade angle	زاوية الريشة
$h$	enthalpy	المحتوى الحراري (الإنتالبي)
Suffix		اللواحق
1	Inlet	المدخل (الدخول)
2	Outlet	المخرج (الخروج)

## مثلثات السرعة Velocity Triangles

يتم استخدام السرعات الإتجاهية Velocity vectors الثلاثة وهي سرعة الريشة والسرعة المطلقة والسرعة النسبية فيما يتعلق بالجزء الدوار لتشكيل مثلث يسمى مثلث السرعة Velocity Triangle . وتستخدم مثلثات السرعة لتوضيح وتفسير التدفق في تراكيب الريش Bladings بالماكينات التوربينية Turbomachines . من السهل فهم التعبيرات في اتجاه التدفق Flow direction والسرعة بمساعدة مثلثات السرعة . لاحظ أنه يتم رسم مثلثات السرعة لمدخل ومخرج الجزء الدوار عند أنصاف أقطار معينة Certain radii .

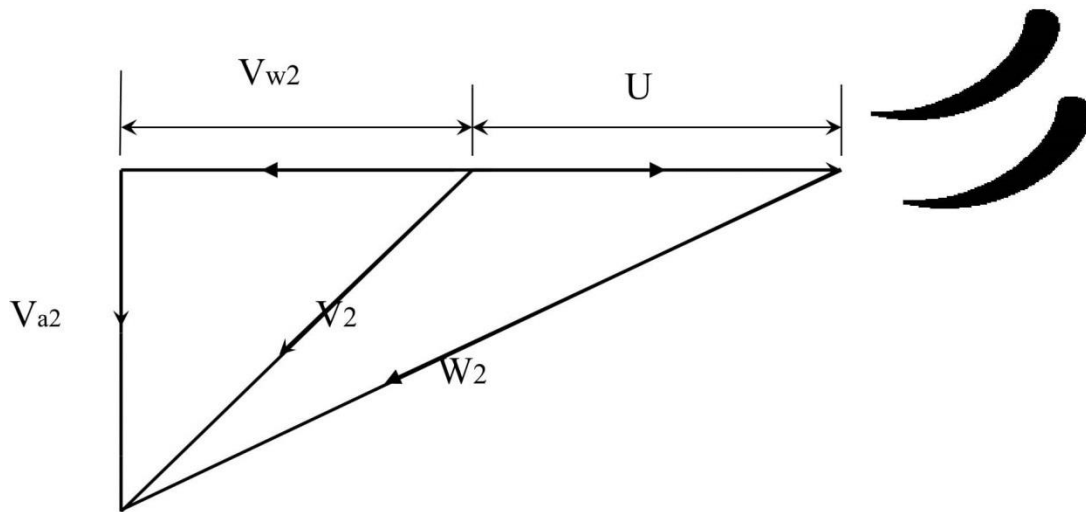
## المصطلحات الفنية لريشة التوربين البخاري Steam Turbine Blade Terminology

- في الشكل أدناه :
- Blade tip = رأس أو قمة الريشة .
- Hub = المركز الفعال .
- Arcwise direction = إتجاه قوسي .
- Spanwise direction = إتجاه إمتدادي (على إمتداد الريشة) .
- Suction side = جانب الشفط .
- Pressure side = جانب الضغط .
- Leading edge = الحافة الأمامية للريشة .
- Trailing edge = الحافة الخلفية للريشة .

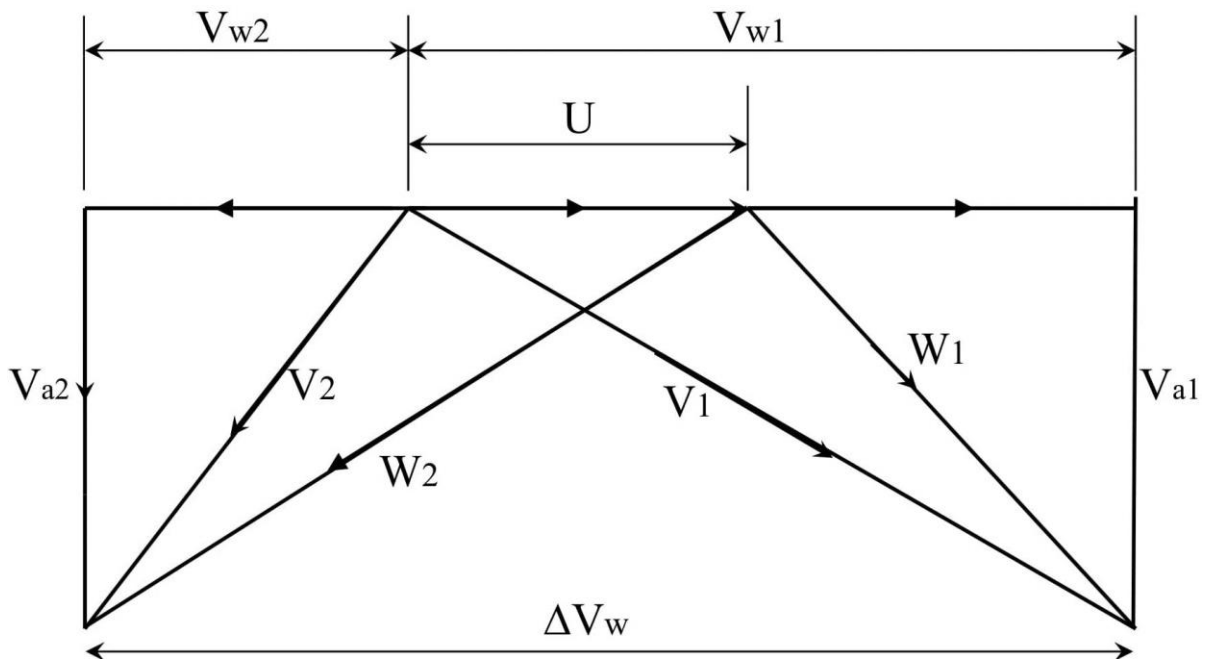


Inlet Velocity Triangles مثلثات سرعة الدخول





مثلثات سرعة الخروج Outlet Velocity Triangles



مثلثات السرعة المركبة (المشتركة) لتصميم (٥٠%) رد فعل  
 Combined Velocity Triangles for 50% reaction design

## الشغل المنجز – التوربين البخاري الدفعي Work Done – Impulse Steam Turbine

إذا كانت الريشة متناظرة أو متماثلة Symmetrical ، فإن  $\beta_1 = \beta_2$  وبإهمال تأثيرات الإحتكاك Frictional effects للريش على البخار ،  $W_1 = W_2$  .  
في الحالة الفعلية ، يتم تقليل السرعة النسبية عن طريق الإحتكاك ويتم التعبير عنها بواسطة معامل سرعة الريشة Blade velocity coefficient (k) .  
وبالتالي فإن  $k = W_2 / W_1$

من معادلة أويلر Euler's equation (٢) ، يتم تحديد الشغل المنجز بواسطة البخار عن طريق المعادلة التالية :  
$$W_t = U (V_{w1} + V_{w2}) \quad (1)$$

نظرًا لأن  $V_{w2}$  في اتجاه  $r$  سلبي ، فإن الشغل المنجز لكل وحدة تدفق كتلة Unit mass flow يتم تحديده بواسطة :  
$$W_t = U (V_{w1} + V_{w2}) \quad (2)$$

إذا  $V_{a1} \neq V_{a2}$  ، سيكون هناك دفع محوري Axial thrust في إتجاه التدفق . افترض أن  $V_a$  ثابت Constant عندئذ :  
$$W_t = UV_a (\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2) \quad (3)$$

$$W_t = UV_a (\tan\beta_1 + \tan\beta_2) \quad (4)$$

غالبًا ما يشار إلى المعادلة (4) على أنها شغل المخطط البياني Diagram work لكل وحدة تدفق كتلة وبالتالي يتم تعريف كفاءة المخطط البياني Diagram efficiency كما يلي :

شغل المخطط البياني لكل وحدة تدفق كتلة Diagram work done per unit mass flow

$$\eta_d = \frac{\text{شغل المخطط البياني لكل وحدة تدفق كتلة}}{\text{الشغل المتاح لكل وحدة تدفق كتلة}} \quad (5)$$

بالإشارة إلى المخطط المشترك ،  $\Delta V_w$  هو التغير في سرعة التدويم .  
وبالتالي تكون القوة الدافعة على الدولاب :

$$\text{The driving force on the wheel} = mV_w \quad (6)$$

نتاج القوة الدافعة وسرعة الريشة يحدد المعدل الذي يتم عنده إنجاز الشغل على الدولاب .  
من المعادلة (6) تكون القدرة المنتجة :

$$\text{Power output} = mU \Delta V_w \quad (7)$$

إذا كان :  $V_{a1} - V_{a2} = \Delta V_a$  ، فإنه يتم تحديد قوة الدفع المحوري Axial thrust بواسطة :

$$\text{Axial thrust} = m\Delta V_a \quad (8)$$

السرعة القصوى Maximum velocity للبخار الذي يضرب الريش :

$$v_1 = \sqrt{2(h_0 - h_1)} \quad (9)$$

حيث  $h_0$  هو المحتوى الحراري (الإنتالبي) عند مدخل الفوهة و  $h_1$  هو المحتوى الحراري عند المخرج ، بإهمال السرعة عند المدخل إلى الفوهة . الطاقة المجهزة للريش هي الطاقة الحركية Kinetic energy للنفث Jet (  $V_1^2/2$  ) وتكون كفاءة تركيب الريشة أو المخطط Blading or diagram efficiency :

$$\eta_d = \frac{\text{Rate of work performed per unit mass flow}}{\text{Energy supplied per unit mass of steam}}$$

$$\eta_d = (U \Delta V_w) 2 / V_1^2 \quad (10)$$

باستخدام معامل سرعة الريشة Blade velocity coefficient  $(k=W_2 / W_1)$  و ريش متماثلة  $(\beta_1 = \beta_2)$  ، يكون :  
 $\Delta V_w = 2 V_1 \cos \alpha_1 - U$   
 $\Delta V_w = 2 ( V_1 \cos \alpha_1 - U ) U$  **(11)** بالتالي :  
 وبما أن معدل الشغل المنجز لكل وحدة تدفق كتلة هو :

$$\text{Rate of work performed per unit mass flow} = 2(V_1 \cos \alpha_1 - U) U$$

$$\eta_d = 2(V_1 \cos \alpha_1 - U) U ( 2 / V_1^2 ) \quad \text{لذلك تكون كفاءة تركيب الريشة :}$$

$$\eta_d = 4(V_1 \cos \alpha_1 - U) U / V_1^2 = (4U / V_1) [ \cos \alpha_1 - (U / V_1) ]$$

حيث أن  $(U / V_1)$  تمثل نسبة سرعة الريشة Blade speed ratio .

$$\text{Blade speed ratio} = U / V_1 \quad (12)$$

بإجراء عملية التفاضل Differentiating للمعادلة (12) ومساواتها للصفر ، سنحصل على القيمة القصوى لكفاءة المخطط البياني ( كفاءة تركيب الريشة ) Maximum diagram efficiency :

$$d(\eta_d)$$

$$----- = 4 \cos \alpha_1 - 8 U / V_1 = 0$$

$$d(U / V_1)$$

$$U / V_1 = \cos \alpha_1 / 2 \quad (13) \quad \text{أو}$$

$$\eta_d = 4 \cos^2 \alpha_1 \quad (14) \quad \text{أي أن القيمة القصوى لكفاءة المخطط البياني :}$$

بإستبدال هذه القيمة في المعادلة (7) ، تكون القدرة المنتجة لكل وحدة معدل تدفق كتلة Power output per unit mass flow rate في حالة الحد الأقصى لكفاءة المخطط البياني :

$$P = 2U^2 \quad (15)$$

**ملاحظة توضيحية (٢) :** صيغة أويلر تعرف بهذا الاسم نسبة إلى عالم الرياضيات والفيزيائي والمهندس السويسري ليونارد أويلر Leonhard Euler ( ١٧٠٧ – ١٧٨٣ ) ، وهي صيغة رياضية Mathematical formula في التحليل المركب Complex analysis تحدد العلاقة الوثيقة بين الدوال المثلثية Trigonometric functions والدالة الأسية المركبة Complex exponential function . معادلات أويلر في علم حركة (ديناميك) الموائع Fluid dynamics هي مجموعة من المعادلات التي تحكم التدفق ثابت الحرارة (أدياباتي) Adiabatic وغير اللزج Inviscid . يمكن تطبيق معادلات أويلر على التدفق غير القابل للضغط Incompressible و القابل للضغط Compressible .

### درجة رد الفعل (نسبة رد الفعل Degree of Reaction (Reaction ratio))

درجة رد الفعل هي معامل Parameter يصف العلاقة بين نقل الطاقة Energy transfer بسبب تغير الضغط الساكن Static pressure ونقل الطاقة بسبب تغير الضغط الحركي (الديناميكي) Dynamic pressure . تعرف درجة رد الفعل بأنها نسبة إنخفاض Drop الضغط الساكن في الجزء الدوار Rotor إلى إنخفاض الضغط الساكن في المرحلة Stage . يتم تعريفه أيضا كنسبة إنخفاض المحتوى الحراري (الإنتالبي Enthalpy) الثابت في الجزء الدوار إلى إنخفاض المحتوى الحراري الثابت في المرحلة .

تغير المحتوى الحراري الثابت في الجزء الدوار

$$\text{درجة رد الفعل (R) Degree of reaction} = \frac{\text{تغير المحتوى الحراري الثابت في الجزء الدوار}}{\text{إجمالي التغير بالمحتوى الحراري في المرحلة}}$$

$$R = \frac{\text{Static enthalpy change in rotor } h_1 - h_2}{\text{Total enthalpy change in stage } h_0 - h_2} \quad (16)$$

يتم التعبير عن المحتوى الحراري الثابت عند المدخل إلى الريشة الثابتة Fixed blade بصيغة المحتوى الحراري الركود Stagnation enthalpy (٣) ، والسرعة عند المدخل إلى الشفرات الثابتة كما يلي :

$$h_2 = h_{02} - (V_2^2 / 2C_p) \quad \text{وبالمثل} \quad h_0 = h_{00} - (V_0^2 / 2C_p)$$

وبالتعويض :

$$R = \frac{h_1 - h_2}{[h_{00} - (V_0^2 / 2C_p)] - [h_{02} - (V_2^2 / 2C_p)]}$$

ولكن للمرحلة العادية (الطبيعية) Normal stage ،  $V_0 = V_2$  ، وبما أن  $h_{00} = h_{01}$  في الفوهة ، فإن :

$$R = h_1 - h_2 / h_{01} - h_{02} \quad (17)$$

$$h_{01} - h_{02} = (h_1 - h_2) + [(V_{w1}^2 - V_{w2}^2) / 2] = 0 \quad \text{نعرف أن :}$$

وبالتعويض عن  $(h_1 - h_2)$  في المعادلة (17) ،

$$R = (V_{w2}^2 - V_{w1}^2) / 2 (h_{01} - h_{02}) = (V_{w2}^2 - V_{w1}^2) / 2 U (V_{w1} - V_{w2}) \quad (18)$$

على افتراض أن السرعة المحورية Axial velocity ثابتة على طول المرحلة ، إذن :

$$R = (V_{w2}^2 - V_{w1}^2) / 2 U (U + V_{w1} + V_{w2} - U)$$

$$R = (V_{w2} - V_{w1}) (V_{w2} + V_{w1}) / 2 U (V_{w1} + V_{w2}) \quad (19)$$

$$R = V_a (\tan \beta_2 + \tan \beta_1) / 2 U \quad (20)$$

من مثلثات السرعة يتبين أن :  $V_{w2} = V_{w2} - U$  ،  $V_{w1} = V_{w1} + U$

لذلك يمكن ترتيب المعادلة (20) في شكل ثاني :

$$R = \frac{1}{2} \frac{V_a}{U} (\tan \beta_2 + \tan \alpha_2) \quad (21)$$

بجعل  $(R = 0)$  في المعادلة (20) ، نحصل على :

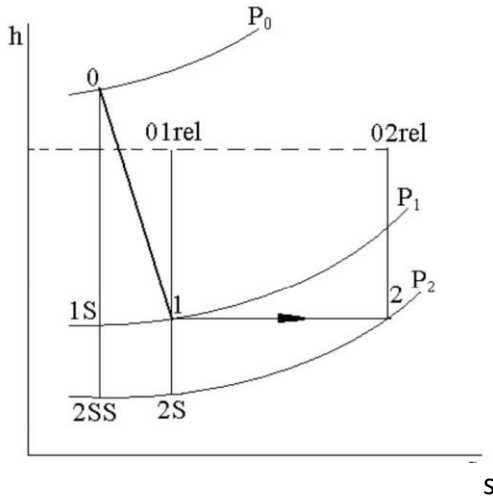
$$(\beta_2 = \alpha_1) \text{ ، } (R = 0.5) \text{ ، ولدرجة رد فعل } V_1 = V_2 \text{ و } (\beta_2 = \beta_1)$$

**ملاحظة توضيحية (٣) :** إن المحتوى الحراري الراكد هو المحتوى الحراري للتدفق عند نقطة ركود Stagnation point (السرعة = صفر Zero velocity) . إذا توقف التدفق في نقطة بعد السرعة .

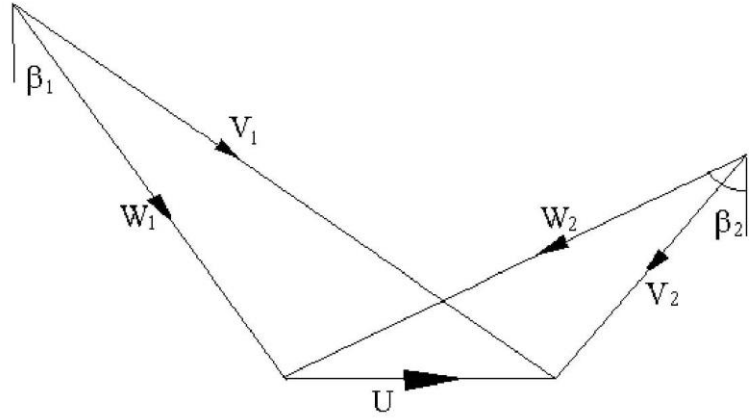
يتم تحديد إجمالي المحتوى الحراري عند كل نقطة في مجال التدفق Flow field ولكن يتم تحديد المحتوى الحراري الراكد عند نقطة الركود فقط . إجمالي المحتوى الحراري هو مجموع المحتوى الحراري المرتبط بدرجة الحرارة Temperature عند كل نقطة إضافة إلى المحتوى الحراري المرتبط بالضغط الديناميكي Dynamic pressure عند كل نقطة . إجمالي المحتوى الحراري هو نفسه عند كل نقطة في مجال التدفق ، لذا فإن المحتوى الحراري الراكد عند نقطة الركود يكون متطابقاً أو يساوي عددياً Numerically إجمالي المحتوى الحراري في كل مكان في مجال التدفق .

### مرحلة رد الفعل الصفري Zero reaction stage

لنناقش أولاً الحالة الخاصة لرد الفعل الصفري Zero reaction . وفقاً لتعريف رد الفعل ، عندما تكون  $R = 0$  ، فإن المعادلة (16) تُظهر أن  $h_1 = h_2$  والمعادلة (20) تُظهر أن  $\beta_1 = \beta_2$  .



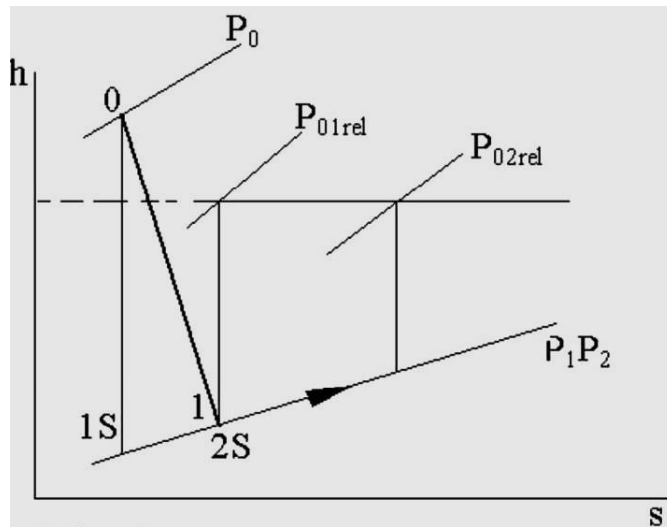
Mollier diagram مخطط مولير



Velocity Diagram مخطط السرعة

هنا  $h_1 = h_2$  و  $h_{01rel} = h_{02rel}$  لدرجة رد فعل ( $R = 0$ ) . إذن  $W_1 = W_2$  . في الحالة المثالية ، لا يوجد إنخفاض بالضغط في الجزء الدوار ويجب أن تتطابق النقاط (1 و 2 و 2s) على مخطط مولير . ولكن بسبب اللاعكوسية (Irreversibility) (٤) ، هناك إنخفاض بالضغط من خلال الجزء الدوار . رد الفعل الصفري في مرحلة الدفع Impulse stage من حيث التعريف ، يعني أنه لا يوجد أي إنخفاض في الضغط خلال الجزء الدوار . يبين الشكل (1a) مخطط مولير لمرحلة الدفع ، حيث يمكن ملاحظة أن المحتوى الحراري Enthalpy يزداد خلال الجزء الدوار .  
حسب المعادلة (16) ، من الواضح أن رد الفعل يكون سلبيا لمرحلة التوربين الدفعي عندما تؤخذ اللاعكوسية في نظر الإعتبار .

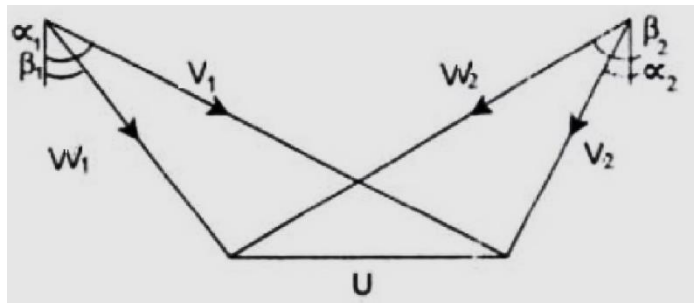
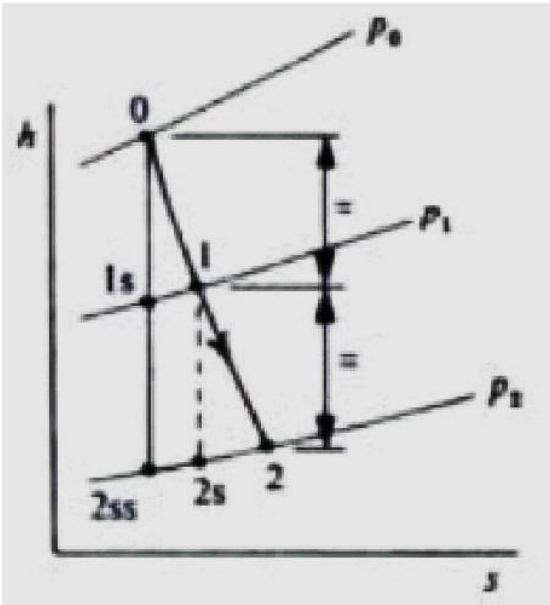
**ملاحظة توضيحية (٤) :** اللاعكوسية Irreversibility هو الإجراء الذي يستحيل عكس إتجاهه بعد حدوثه دون تغيير على حالة النظام System و المحيط Surroundings . ( الإجراء الذي لا يمكن للنظام أن يعود خلاله إلى حالته الابتدائية إلا بفقدان طاقة ) . في الترموديناميك توجد إمكانيتان للتفاعل بين النظام والمحيط ، فإما تستبدل حرارة بينهما أو يستبدل شغل . وعند تبادل الحرارة (طاقة) بينهما يتغير أيضا إنتروبي النظام وإنتروبي الوسط المحيط .



الشكل (1a)

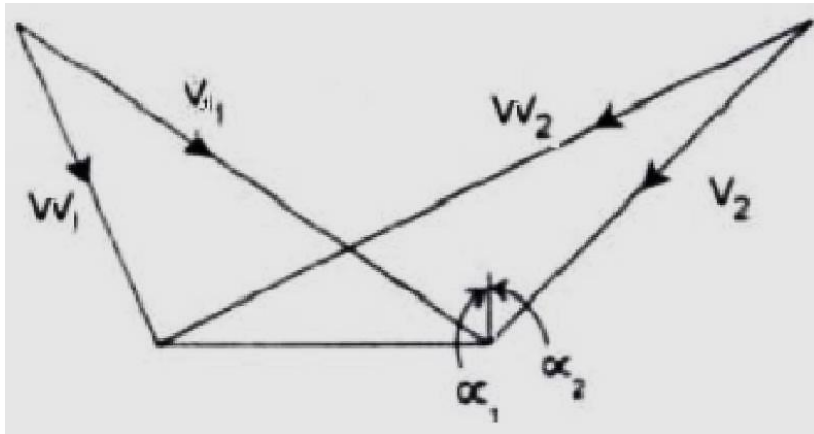
### مرحلة رد الفعل خمسون في المئة Fifty percent reaction stage

من المعادلة (16) لدرجة رد فعل ( $R = 0.5$ ) تكون  $\alpha_1 = \beta_2$  ومخطط السرعة متناظر أو متماثل . وبسبب التناظر ، فمن الواضح أيضا أن  $\alpha_2 = \beta_1$  . بالنسبة إلى  $R = 1/2$  ، فإن إنخفاض المحتوى الحراري في صف الفوهة Nozzle row يساوي إنخفاض المحتوى الحراري في الجزء الدوار . أي أن :  $h_0 - h_1 = h_1 - h_2$  .



بتعويض  $\beta_2 = \tan \alpha_2 + (U / V_a)$  في المعادلة (21) :

$$R = 1 + (V_a / 2U) (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1) \quad (22)$$



وبالتالي عندما تكون ( $\alpha_2 = \alpha_1$ ) ، تكون درجة رد الفعل وحدة واحدة Unity ( $V_1 = V_2$ ) . يُظهر مخطط السرعة ( $R = 1$ ) في الشكل أعلاه ، مع نفس القيم من ( $V_a$  ،  $U$  و  $W$ ) المستخدمة لدرجة رد الفعل ( $R = 0$ ) و ( $R = 1/2$ ) . من الواضح أنه إذا تجاوز ( $R$ ) الوحدة الواحدة ، عندئذ  $V_1 < V_0$  (أي إنتشار تدفق الفوهة)

## إختيار رد الفعل والتأثير على الكفاءة Choice of Reaction and Effect on Efficiency

يمكن إعادة كتابة المعادلة (17) بالصيغة التالية :

$$R = 1 + (V_{w2} - V_{w1} / 2 U)$$

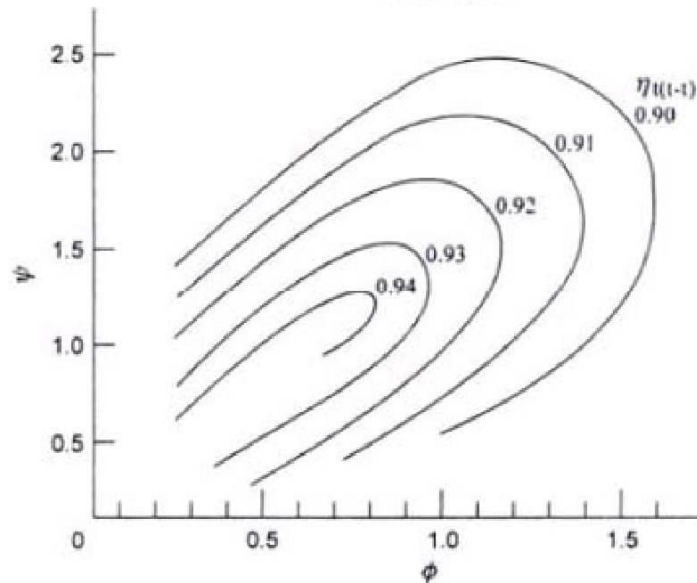
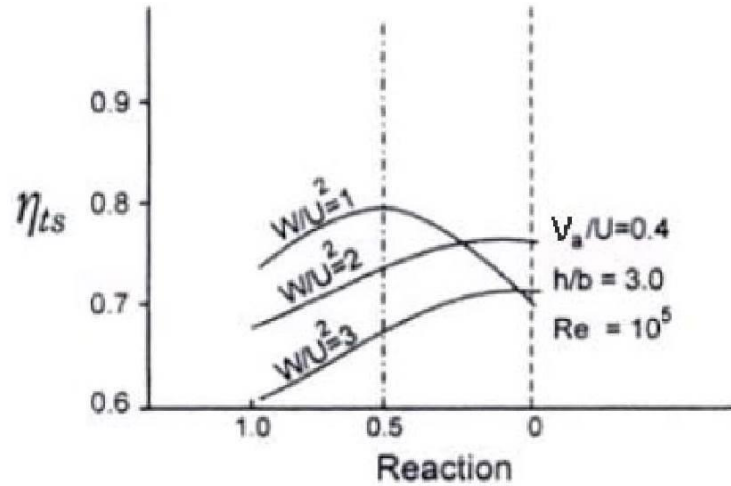
يمكن التعويض عن  $(V_{w2})$  بإستخدام هذه المعادلة :

$$V_{w2} = (W / U) - V_{w1}$$

ناتجا ما يلي :

$$R = 1 + (W / 2U^2) - (V_{w1} / U)$$

في الشكل أدناه ، يظهر مجموع الكفاءات الساكنة (الإستاتيكية)  $(\eta_{ts})$  Static efficiencies في مقابل درجة رد الفعل . عندما يكون  $(W / U^2 = 2)$  ، يكون  $(\eta_{ts})$  في الحد الأقصى عند  $(R = 0)$  . مع تحميل أعلى ، يتم الحصول على  $(\eta_{ts})$  مثالي عند نسب ( درجات ) رد فعل أعلى . كما هو موضح في الشكل ، يجب أن يكون عامل تحميل الريشة Blade loading factor صغيرا قدر الإمكان ، مما يعني أن أعلى قيمة ممكنة لسرعة الريشة Blade speed تتوافق مع تحديدات إجهاد الريشة Blade stress limitations . ذلك يعني أن إجمالي الكفاءة الإستاتيكية يعتمد بشكل كبير على نسبة رد الفعل ويمكن تحسين  $(\eta_{ts})$  من خلال إختيار قيمة مناسبة لرد الفعل .

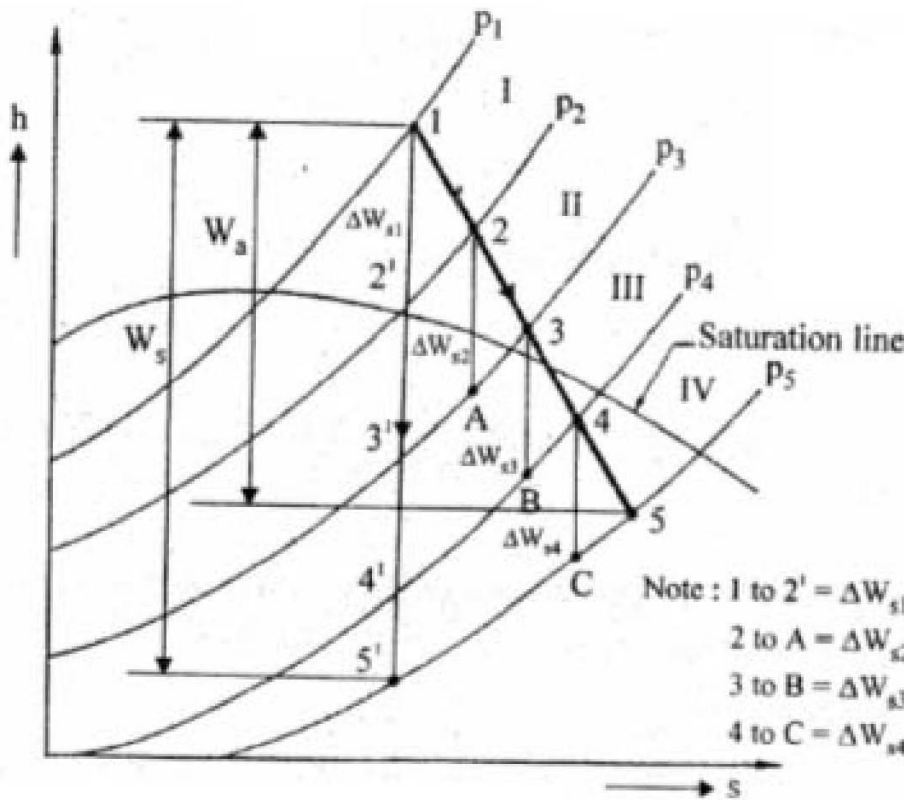




## إرتفاع الريشة في الماكينات محورية التدفق Blade Height in Axial Flow Machines

يمكن استخدام معادلة الإستمرارية  $\dot{m} = \rho A V_a$  لإيجاد إرتفاع الريشة (h) Blade height . المساحة الحلقية Annular area للتدفق هي  $(\pi Dh)$  . وبالتالي فإن معدل التدفق الكتلي Mass flow rate خلال توربين التدفق المحوري Axial flow turbine هو :  $\dot{m} = \rho \pi Dh V_a$   
 $h = \dot{m} / \rho \pi D V_a$   
 سيزداد إرتفاع الريشة في إتجاه التدفق في التوربين ويقل في إتجاه التدفق في الضاغط Compressor .

## تأثير عامل إعادة التسخين وكفاءة المرحلة Effect of Reheat Factor & Stage Efficiency



يمكن فهم التأثير الديناميكي الحراري ( الثيرموديناميكي ) Thermodynamic effect على كفاءة التوربين إذا تم الأخذ بنظر الإعتبار عدد المراحل Stages ، مثلا (4) ، بين الحالات ( 1 و 5 ) كما هو موضح في الشكل أعلاه . يتم تقسيم التمدد الكلي Total expansion إلى أربع مراحل بنفس كفاءة المرحلة Stage efficiency ونسبة الإنضغاط Pressure ratio .

$$P_1 / P_2 = P_2 / P_3 = P_3 / P_4 = P_4 / P_5 \quad \text{أي أن :}$$

لتكن  $(\eta_0)$  هي الكفاءة الإجمالية Overall efficiency للتمدد ، ويتم تعريفها على أنها نسبة الشغل الفعلي المنجز Actual work done لكل كيلو غرام ( كغم kg ) من البخار إلى الشغل متساوي الإنتروبي المنجز (المثالي أو النظري) Isentropic work done لكل كغم من البخار بين ( 1 و 5 ) .

$$\eta_0 = W_a / W_s = h_1 - h_5 / h_1 - h_5' \quad \text{أي أن :}$$

$$W_a = \eta_0 W_s \quad (23) \quad \text{الشغل الفعلي المنجز لكل كغم من البخار :}$$

القيم متساوية الإنتروبي أو المثالية Ideal في كل مرحلة هي :  $\Delta W_{s4}$  ،  $\Delta W_{s3}$  ،  $\Delta W_{s2}$  ،  $\Delta W_{s1}$   
لذا فإن القيمة الإجمالية للشغل الفعلي المنجز في هذه المراحل هي :

$$W_a = \Sigma(1-2)+(2-3)+(3-4)+(4-5)$$

كما يتم تحديد كفاءة المرحلة ( $\eta_s$ ) لكل مرحلة عن طريق :

الشغل الفعلي المنجز / كغم بخار Actual work done / kg of steam

$$\eta_s = \frac{\text{Actual work done / kg of steam}}{\text{Isentropic work done in stage}} \quad \text{الشغل متساوي الإنتروبي المنجز في المرحلة}$$

$$\eta_{s1} = W_{a1} / W_{s1} \quad \text{للمرحلة (1) :}$$

$$\eta_{s1} = h_1 - h_2 / h_1 - h_2' = W_{a1} / \Delta W_{s1}$$

$$\Delta W_{a1} = \eta_{s1} \Delta W_{s1} \quad \text{أو :}$$

$$\Delta W_a = \Sigma \Delta W_a = \Sigma [\eta_{s1} \Delta W_{s1} + \eta_{s2} \Delta W_{s2} + \eta_{s3} \Delta W_{s3} + \eta_{s4} \Delta W_{s4}] \quad \text{إذن :}$$

$$\eta_{s1} = \eta_{s2} = \eta_{s3} = \eta_{s4} \quad \text{لنفس كفاءة المرحلة في كل مرحلة :}$$

$$W_a = \eta_s \Sigma [\Delta W_{s1} + \Delta W_{s2} + \Delta W_{s3} + \Delta W_{s4}] = \eta_s \Sigma \Delta W_s \quad (24)$$

$$\eta_0 W_0 = \eta_s \Sigma \Delta W_s \quad \text{من المعادلتين (23) و (24) :}$$

$$\eta_0 = \eta_s [ \Sigma \Delta W_s / W_s ] \quad (25) \quad \text{إذن :}$$

يتم تحديد الإنحدار لخطوط الضغط الثابت Slope of constant pressure lines على مخطط (الإنتالبي - الإنتروبي) (h - s) بواسطة :

$$[\partial h / \partial s]_p = T$$

وهذا يدل على أن خطوط الضغط الثابت يجب أن تتحرك باتجاه اليمين . وبالتالي :  $\Sigma \Delta W_s / W_s > 1$  من الواضح لعملية التمدد Expansion process أن المحتوى الحراري يزداد عندما تتحرك باتجاه اليمين نحو خطوط الضغط الثابت . ومن ثم فإن مجموع (  $\Delta W_{s1}$  و  $\Delta W_{s2}$  وإلخ ) يكون أكثر من الإنخفاض الإجمالي للمحتوى الحراري متساوي الأنتروبي ( $W_s$ ) Isentropic enthalpy drop . نسبة الإنخفاض الإجمالي للمحتوى الحراري متساوي الأنتروبي لمرحلة أحادية إلى الإنخفاض الإجمالي للمحتوى الحراري متساوي الأنتروبي لكل المراحل تسمى بعامل إعادة التسخين Reheat factor .

$$RF = \frac{\Sigma[\Delta W_{s1} + \Delta W_{s2} + \Delta W_{s3} + \Delta W_{s4}]}{W_s}$$

$$RF = \frac{\Sigma[(1-2') + (2-a') + (3-b') + (4-c')]}{(1-5)} = \frac{\Sigma \Delta W_s}{W_s} \quad (26)$$

$$\eta_0 = \eta_{stage} \times RF \quad (27) \text{ وبالتالي فإن الكفاءة الإجمالية لعملية التمدد :}$$

$$RF = (\Sigma \Delta W_s / W_s) > 1 \quad \text{وبما أن :}$$

فإن الكفاءة الإجمالية للتوربين  $\eta_0$  أكبر من كفاءات المرحلة  $\eta_s$  أي أن للتوربينات :

$$\eta_0 > \eta_s \quad (28)$$

## Merits and Demerits of Reheating مزايا وعيوب إعادة التسخين

### مزايا إعادة التسخين :

- ١- زيادة في إنتاج التوربين Output of turbine .
- ٢- يتم تقليل مشاكل التعرية Erosion والتآكل Corrosion في التوربينات البخارية .
- ٣- تحسن في الكفاءة الحرارية الكلية Overall thermal efficiency للتوربين .
- ٤- يتم تحسين حالة البخار في المرحلة الأخيرة من التوربين .

### العيوب :

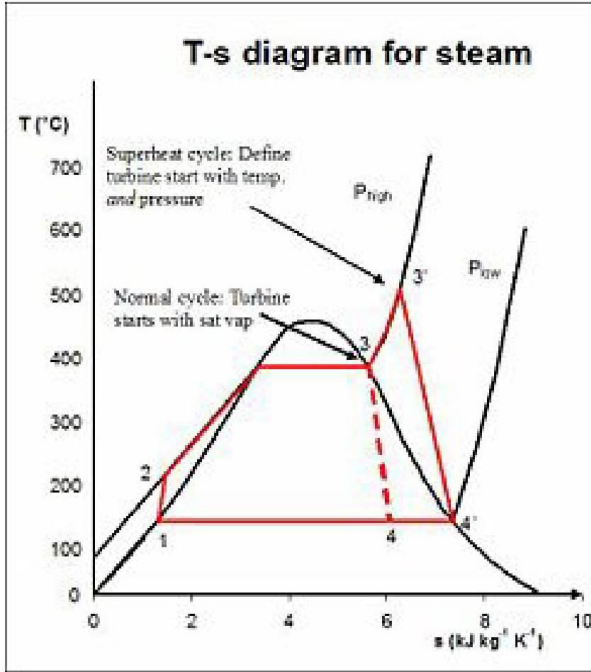
- ١- التكلفة الرأسمالية Capital cost المطلوبة لإعادة التسخين .
- ٢- الزيادة في الكفاءة الحرارية ليست ملموسة ( ملحوظة) مقارنة بالنفقات المصروفة Expenditure في إعادة تسخين التوربينات ذات السعة الأصغر Smaller capacity turbines .

## مواد التوربين البخاري Materials of Steam Turbine

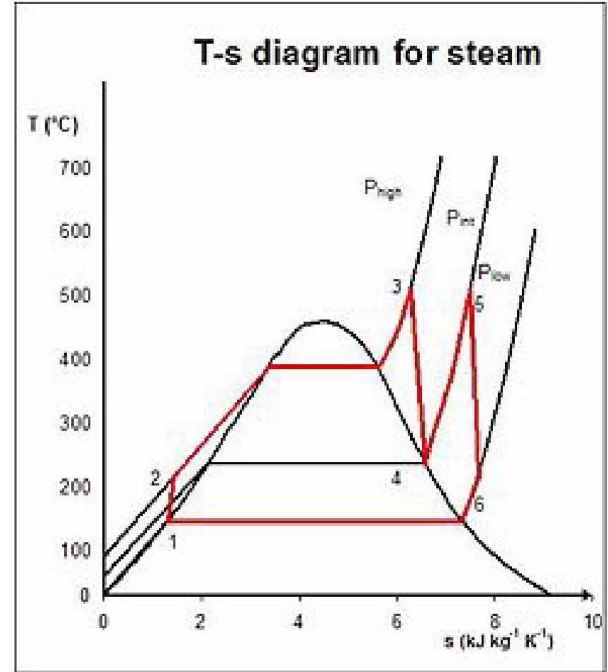
Part name أسم الجزء	Material Code/Composition رمز   تركيب المادة
Casing الغلاف	IS:2063
Inner casing الغلاف الداخلي	GS 22Mo4 Shaft
Shaft العمود الدوار	30CrMoV121
Blade high pressure ريشة الضغط العالي	X22CrMoV121
Blade Low pressure ريشة الضغط المنخفض	X20Cr3
Crossover pipe أنبوب التحويل العرضي	ASTM 533 Gr.70
Casing joint bolt برغي ربط الغلاف	21CrMoV57
Valve spindle ساق (محور) الصمام	X22CrMoV121
Valve body جسم (بدن) الصمام	GS17CrMoV511
Valve seat مقعد الصمام	21CrMo57

## دورة التوربينات البخارية (دون الدرجة) Steam Turbine Cycle (Subcritical)

### مخططات درجة الحرارة – الإنتروبي للبخار T – S Diagram for steam

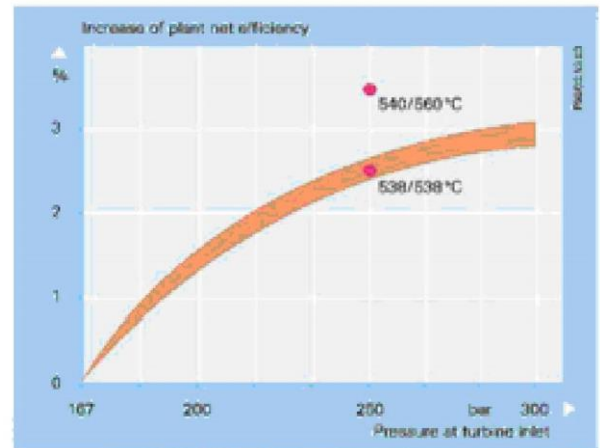
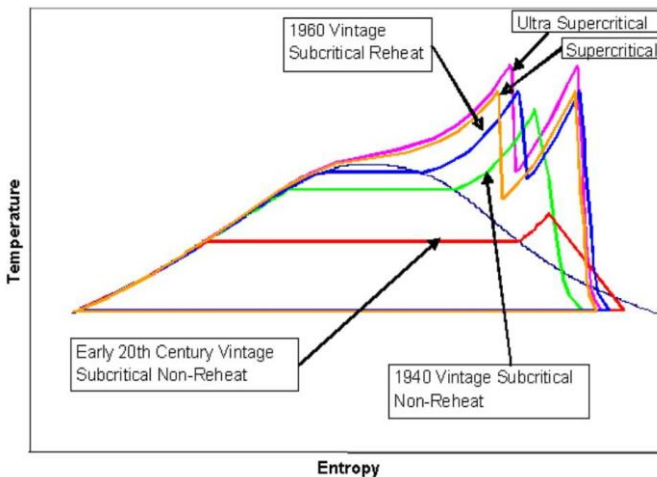


دورة رانكين مع التمهيص  
Rankine cycle with superheat



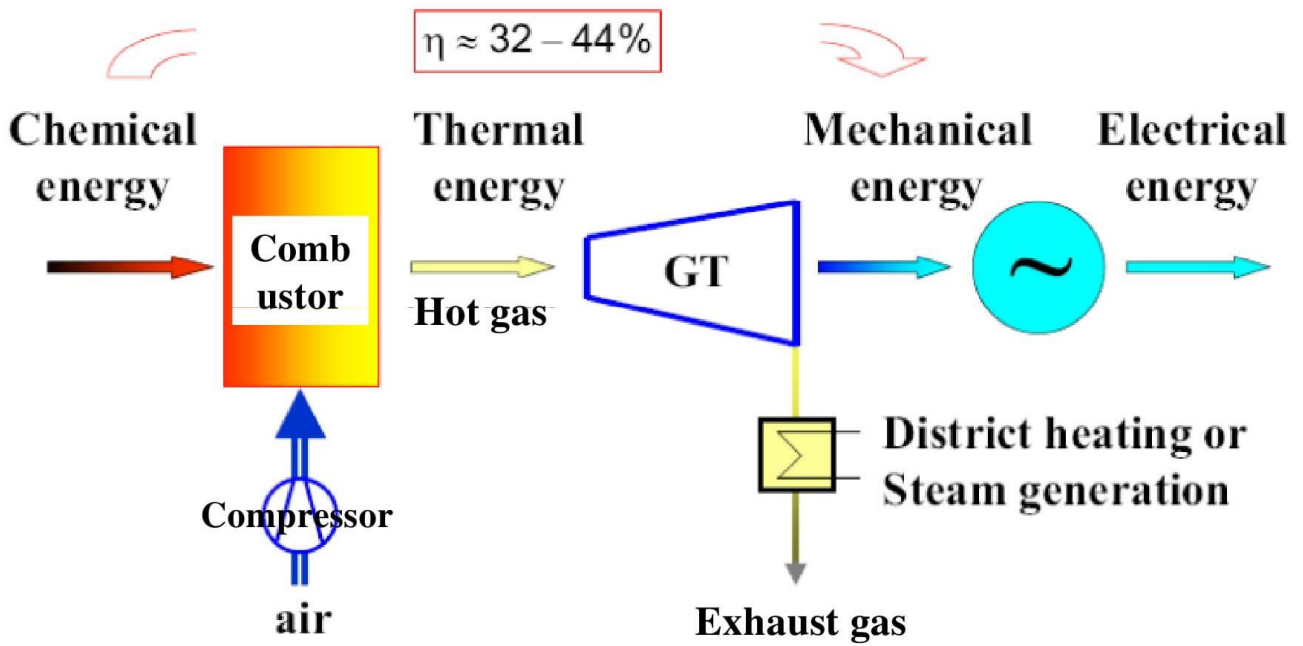
دورة رانكين مع إعادة التسخين  
Rankine cycle with reheat

## دورة التوربينات البخارية (فوق الدرجة) Steam Turbine Cycle (Supercritical)

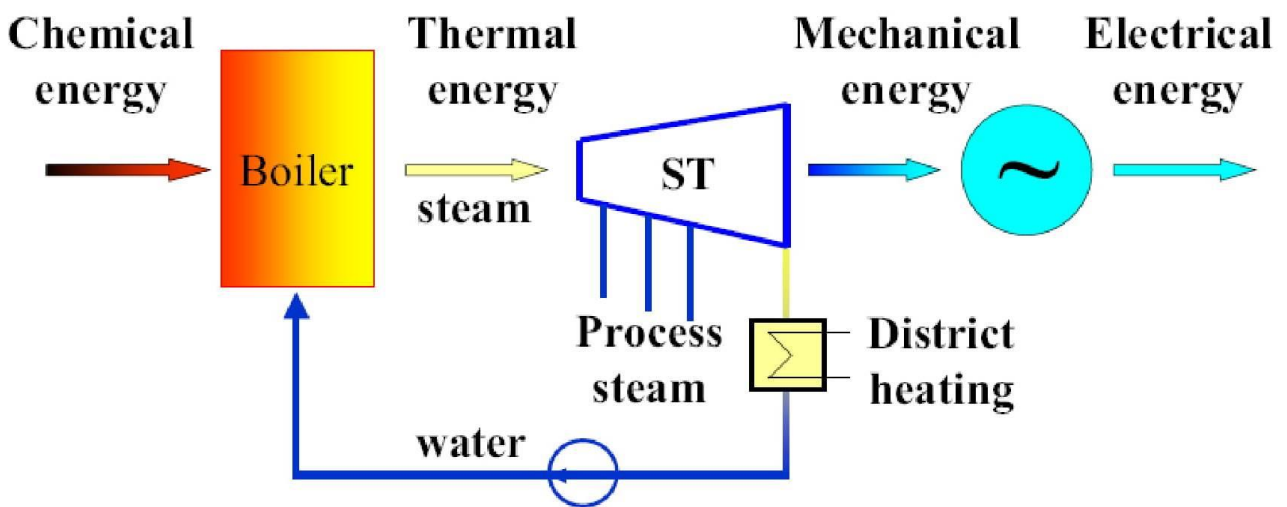


هناك مزايا جوهرية لدورة البخار فوق الحرج : حيث أن الضغوط العالية ودرجات الحرارة العالية تُحسن الكفاءة الحرارية Thermal efficiency ، وتجنب استخدام مجففات البخار Steam dryers وفواصل البخار Steam separators ، وتقليل انبعاثات Emissions غاز ثاني أكسيد الكربون CO<sub>2</sub> .

محطة قدرة بالتوربين الغازي Gas Turbine Power Plant

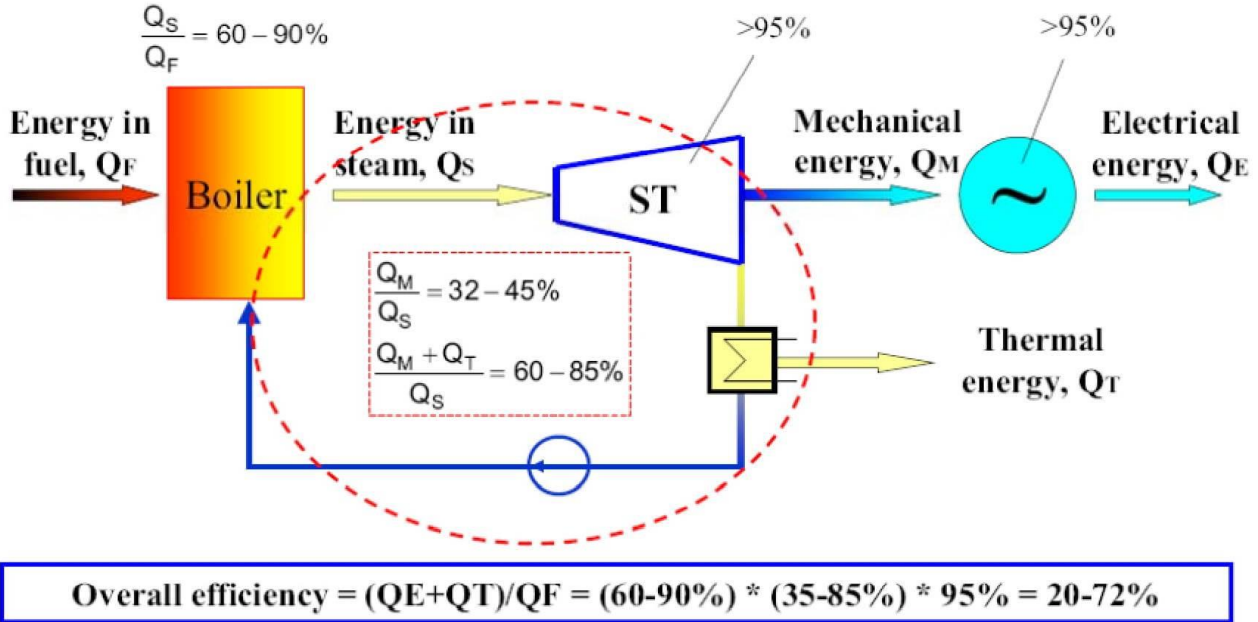


محطة قدرة بالتوربين البخاري Steam Turbine Power Plant



## محطة قدرة بالتوربين البخاري ( توليد القدرة Power Generation )

الكفاءة Efficiency = الطاقة الخارجة \ Energy out \ الطاقة الداخلة Energy in



الكفاءة الإجمالية Overall efficiency =  $Q_F \setminus (Q_T + Q_E)$

Electrical energy =  $Q_E$  الطاقة الكهربائية

Thermal energy =  $Q_T$  الطاقة الحرارية

Chemical energy ( Fuel ) =  $Q_F$  الطاقة الكيميائية (الوقود)

تأثير العوامل المتغيرة في تصميم التوربين البخاري

### Influence Parameters in Steam Turbine Design

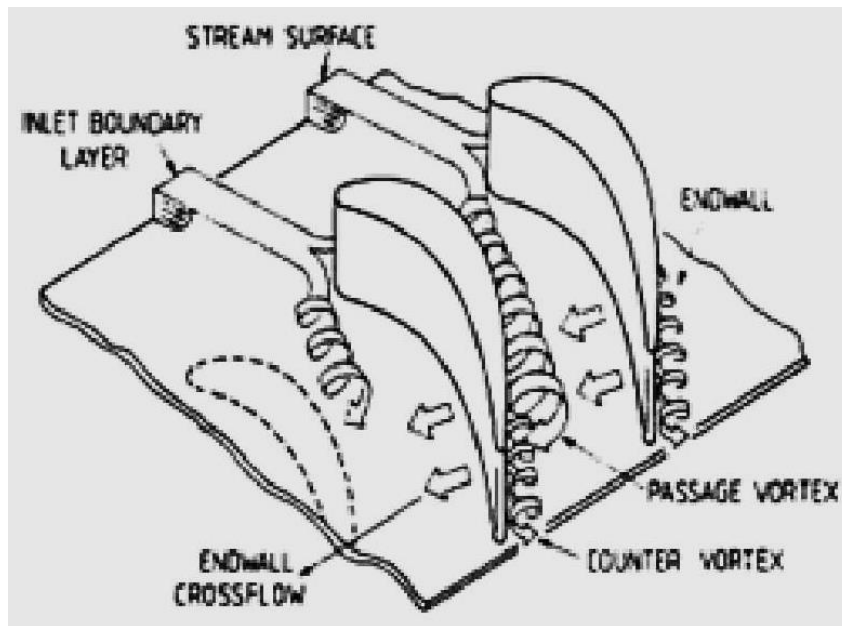
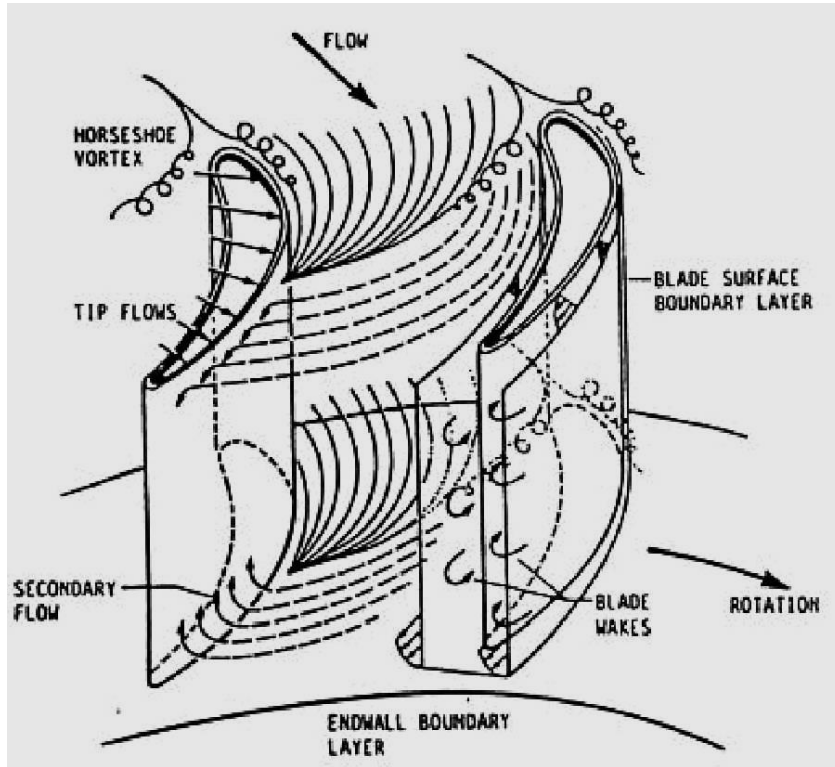
العوامل الديناميكية الهوائية (الحركية الهوائية) Aerodynamic Parameters

- زاوية السقوط Incidence angle .
- تفاعل الجزء الثابت - الدوار (تأثير متبادل) Stator - rotor interaction .
- درجة رد الفعل Degree of reaction .
- التوزيع الدوامي (التدويم) Whirl distribution .

العوامل الهندسية Geometric Parameters

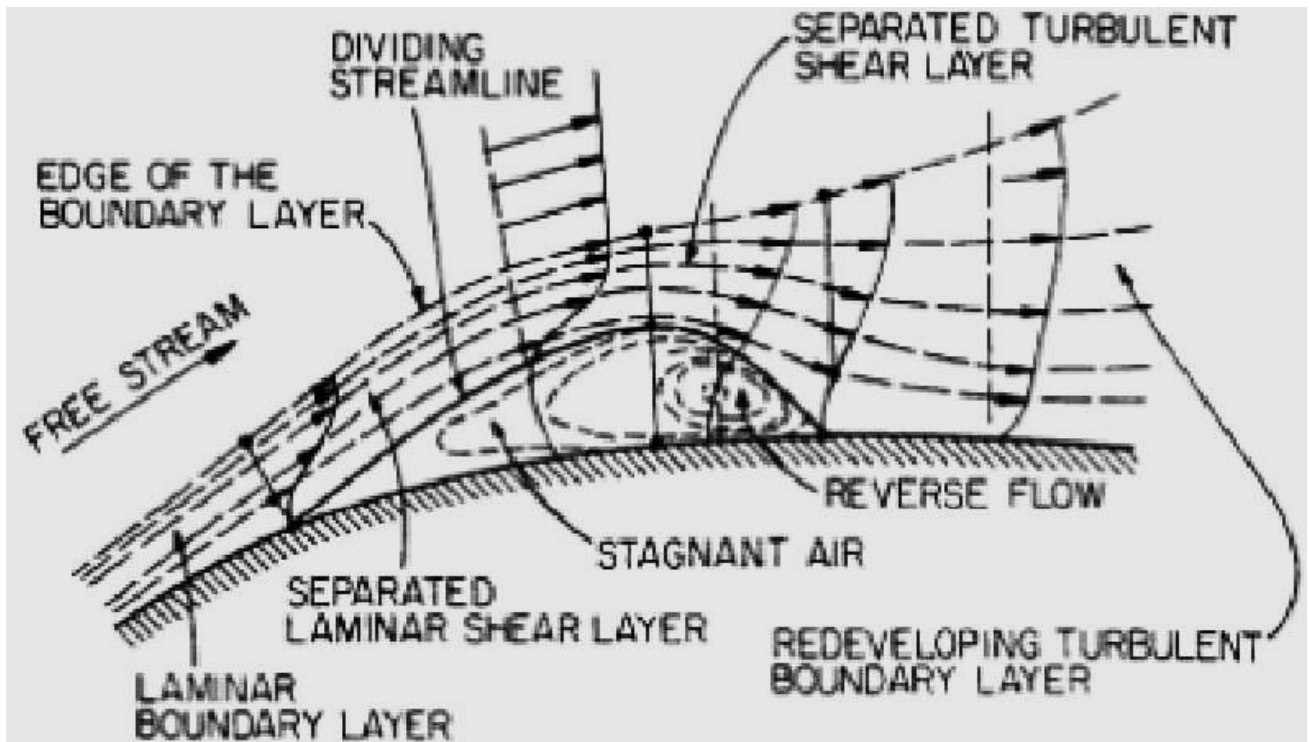
- المظهر الجانبي للريشة Blade profile .
- صلابة ومثانة الريشة Blade solidity .
- نسبة إمتداد الريشة (نسبة البعدين ، الطول إلى العرض) Blade aspect ratio .
- رص أو تجميع الريش Blade stacking .

## آليات الخسارة ( الفقد ) Loss Mechanisms

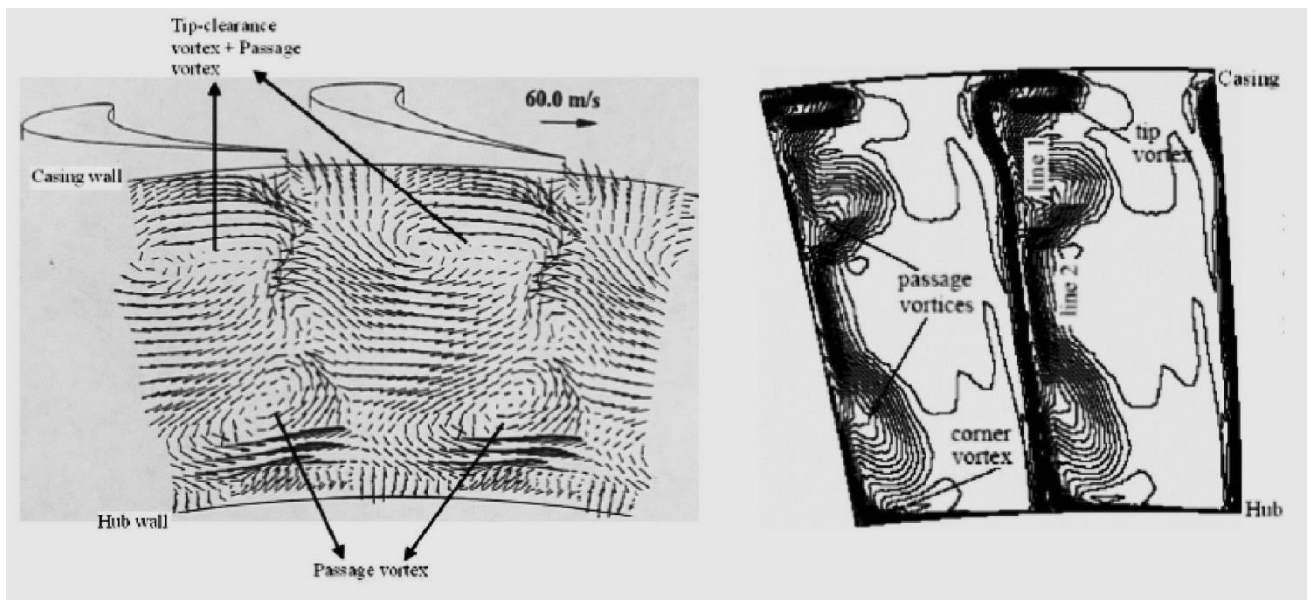


التدفق عبر صفوف ريش التوربين يكون لزج Viscous وغير ثابت Unsteady وثلاثي الأبعاد Three dimensional . وتشمل الخسائر : فقدان المظهر الجانبي Profile loss ، خسائر الجدار النهائي أو الجدار الجانبي End wall loss ، خسائر التدفق الثانوي Secondary flow loss ، خسائر تسرب الطرف الرأسي (الخلوص الطرفي) Tip clearance loss .



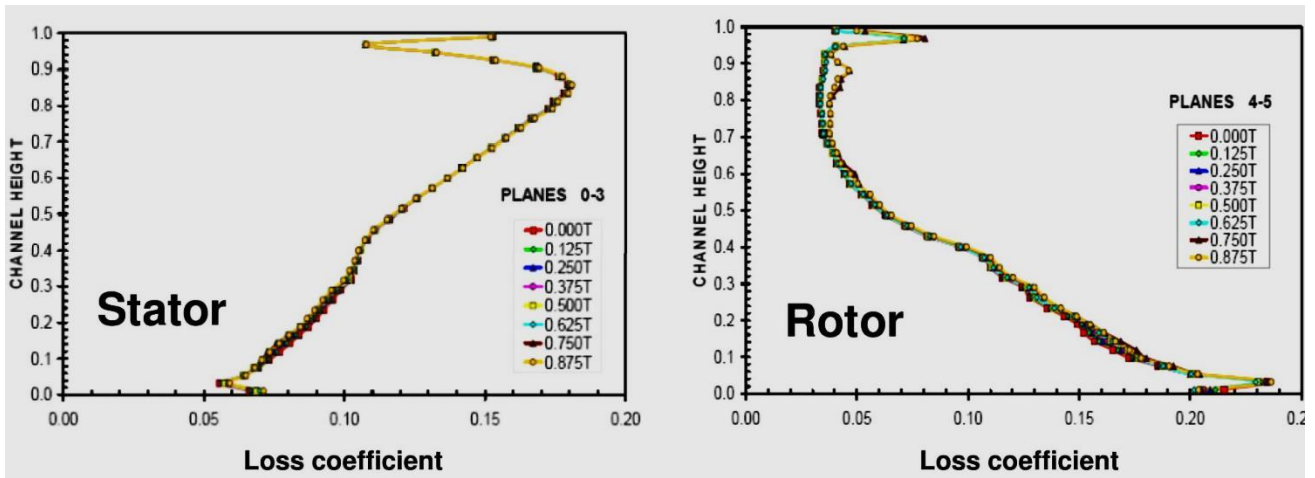


شكل يوضح فقاعة الفصل الصفائحي (الطبقي) Laminar separation bubble



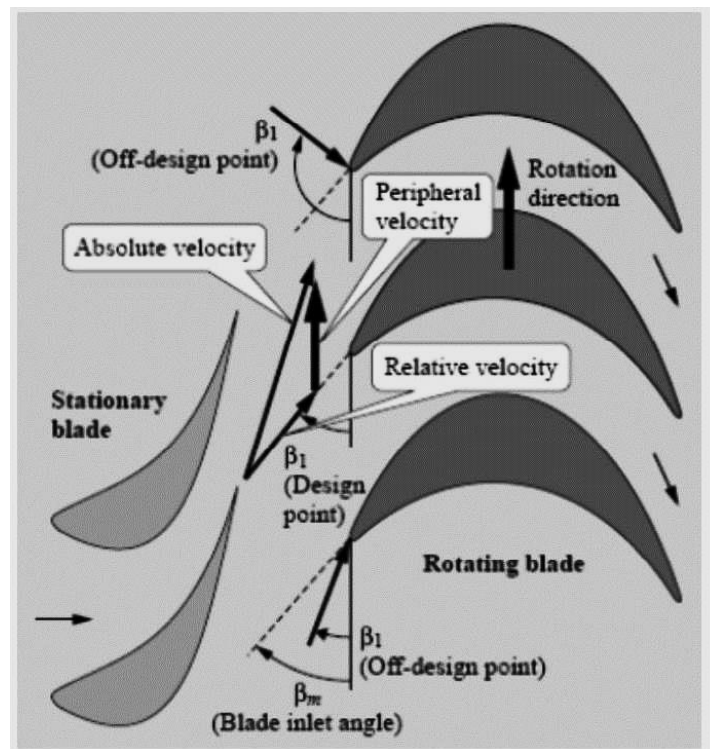
شكل يوضح دوامات الممر والخلوص الطرفي Tip clearance and passage vortices

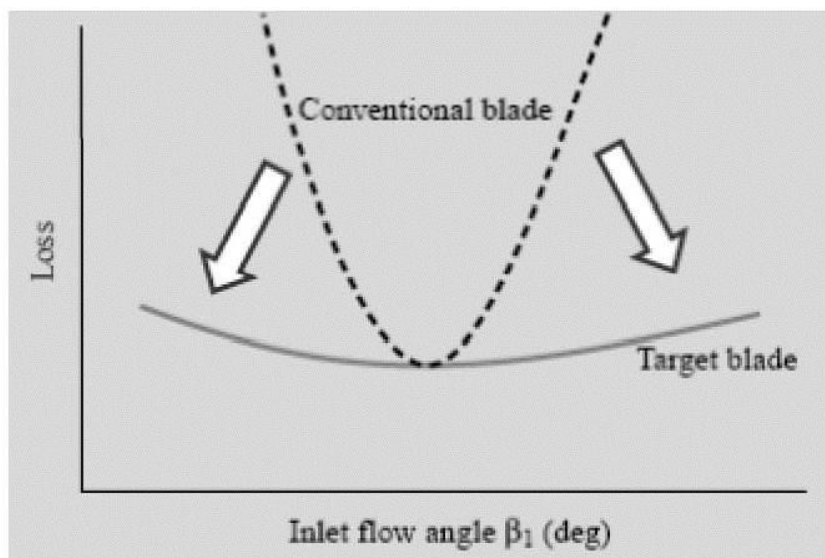
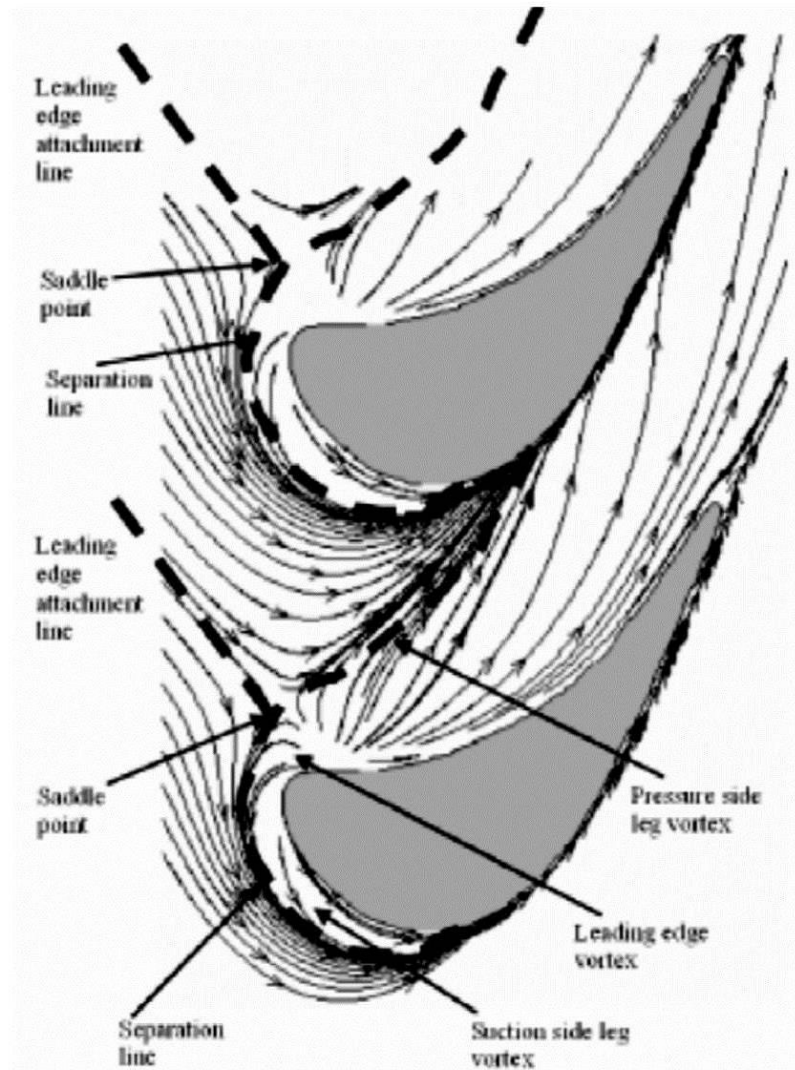
## Spanwise Variation of Loss Coefficient تباین معامل الفقد لمسافة إمتداد الريشة

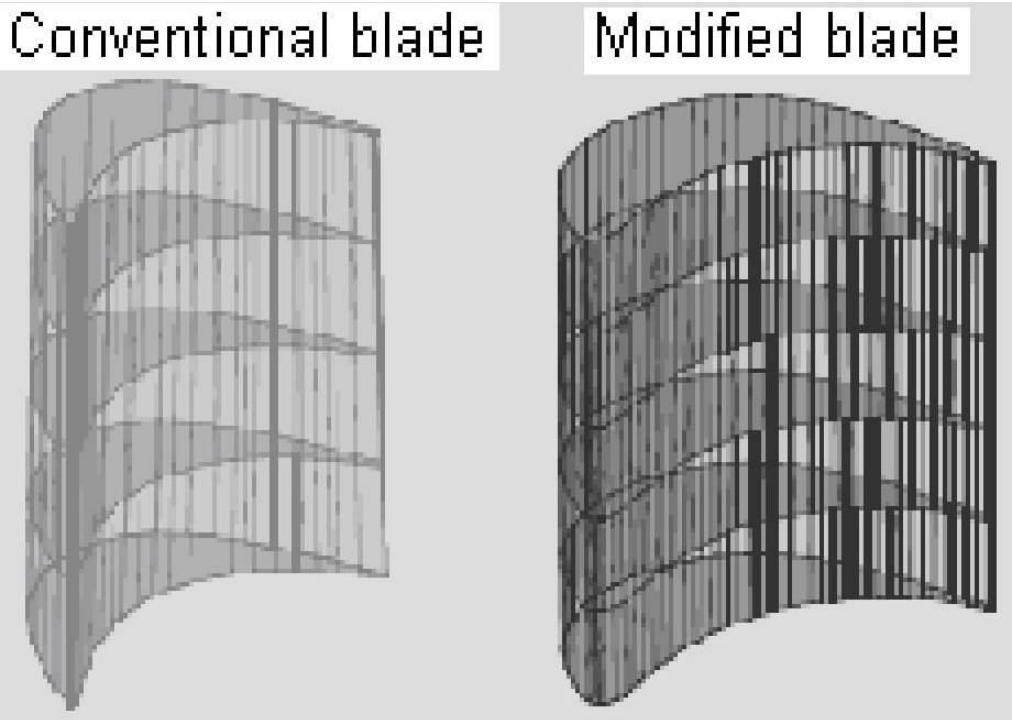


معامل الفقد Loss Coefficient في المرحلة الأخيرة Last stage من الجزء الثابت والدوار Stator and Rotor لتوربين بخاري كبير ، (القدرة = Power 1000 ميكاواط MW ، السرعة = Speed 3000 دورة في الدقيقة rpm ، طول ريشة الجزء الدوار = Length of rotor blade 1.085 متر m) .  
 [المرجع : الجامعة التقنية التشيكية ، براغ [Ref: M. Stastny, et al, Czech Technical University, Praha

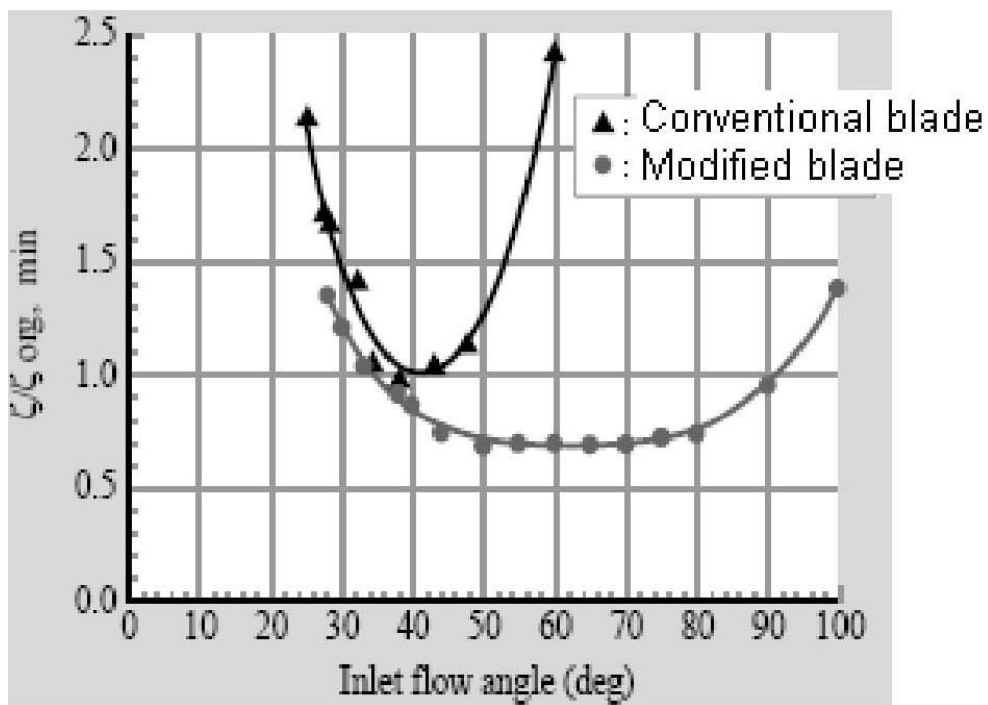
## تأثير زاوية السقوط Effect of Incidence Angle







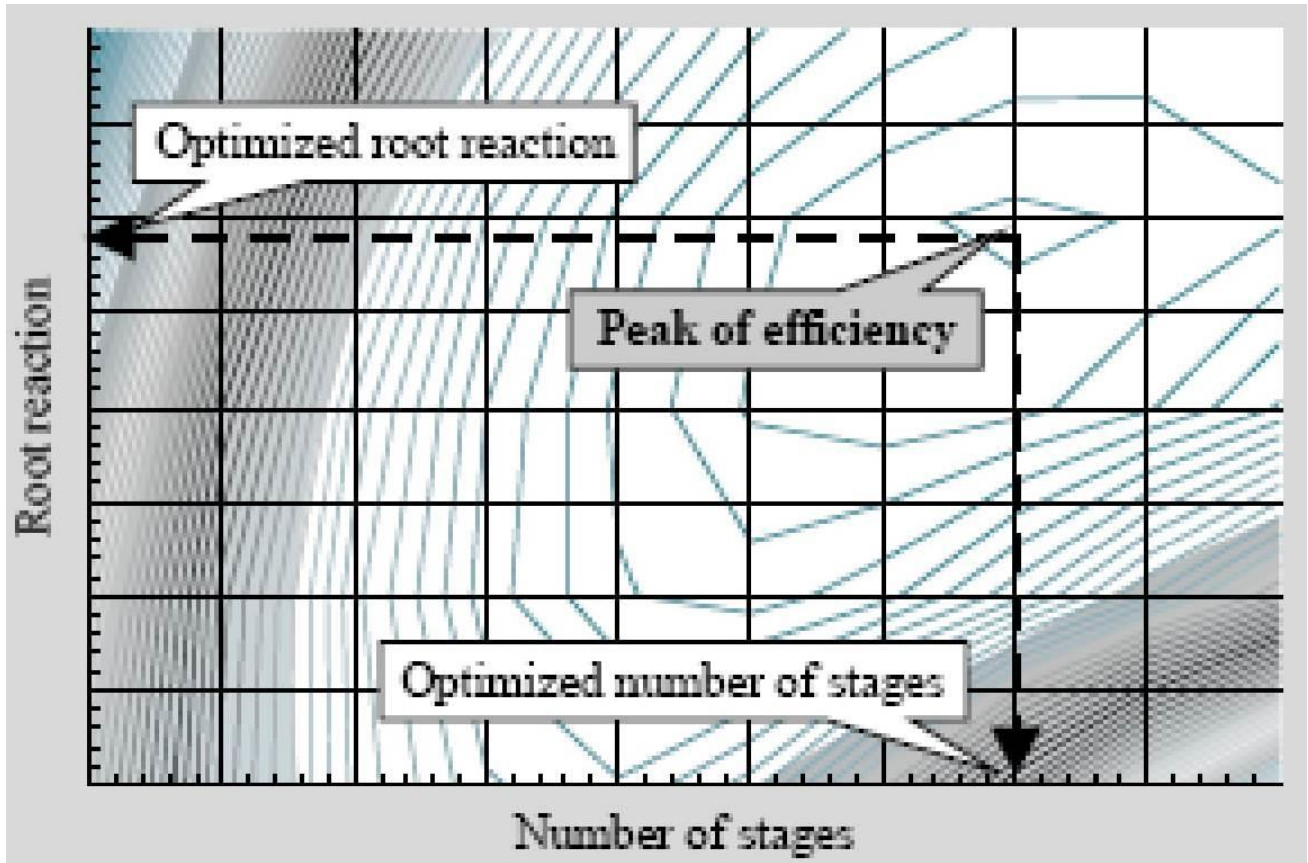
ريش التوربين قليلة الخسارة التقليدية والمعدلة modified  
 Conventional and modified low loss turbine blades



تباين معامل خسارة المظهر الجانبي مع زاوية تدفق المدخل  
 Variation of profile loss coefficient with inlet flow angle

يجب أن تكون مقاطع الريشة Blade sections مصممة لحدوث خسائر سقوط قليلة Low loss incidence ، سواء تحت ظروف التصميم أو خارج التصميم Off-design . يتطلب ذلك إختبارا متسلسلا مكثفا Extensive cascade testing لمقاطع الريشة للوصول إلى خسارة منخفضة مقبولة في مظاهر (أشكال) الريش . Acceptable low loss profiles .

### درجة رد الفعل Degree of Reaction

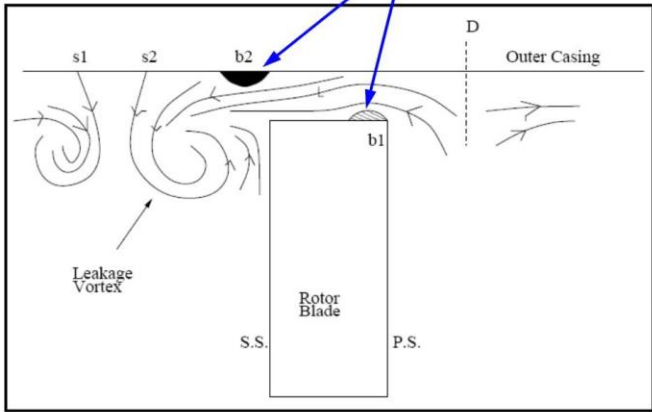


يمكن تحسين كفاءة مراحل التوربين Turbine stages عن طريق قطر الجذر الأصغر Smaller root diameter وعدد أكثر من المراحل . يجب إجراء دراسات التحسين وتحقيق القيم المثلى Optimization studies مع الأخذ بنظر الإعتبار قطر الجذر الريشة وعدد المراحل و درجة رد الفعل .

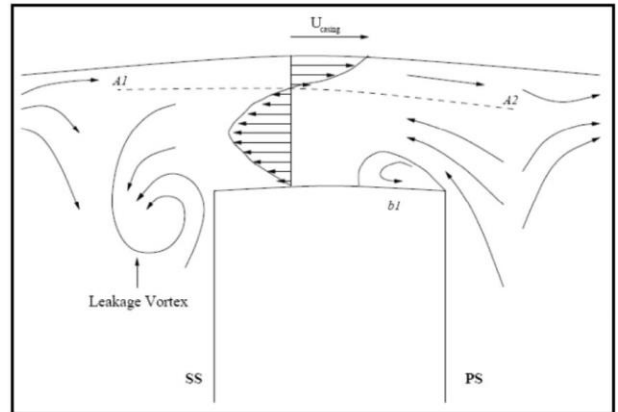


رسم تخطيطي لتدفق التسرب من جهة الطرف الرأسي Schematic of Tip Leakage Flow

فقاعات الفصل Separation Bubble



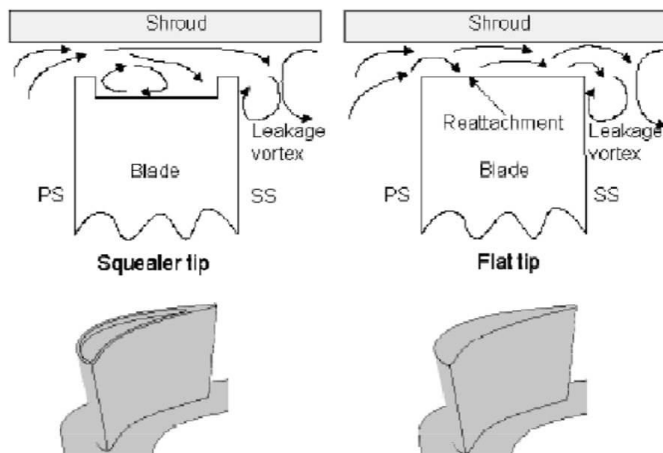
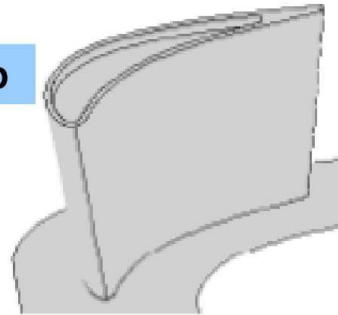
خطي تعاقبي (متسلسل) Linear Cascade



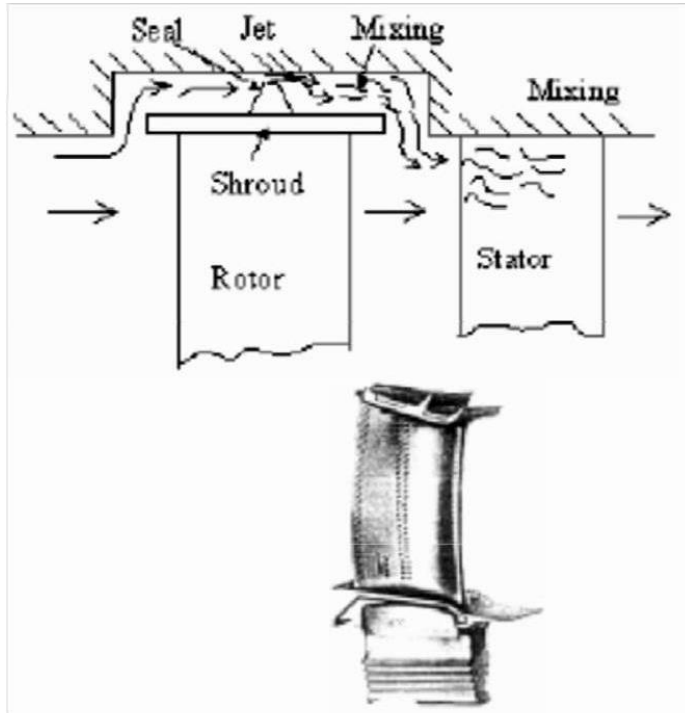
الجزء الدوار للتوربين Turbine Rotor

تدفق التسرب من الطرف الرأسي المسطح و التجويفي Squealer and Tip Leakage Flow

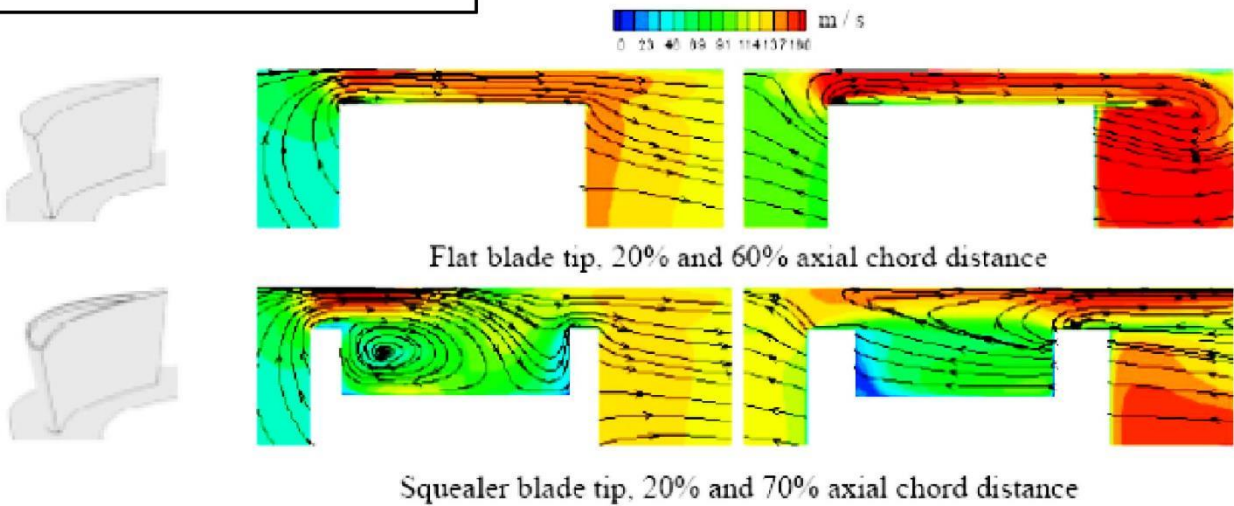
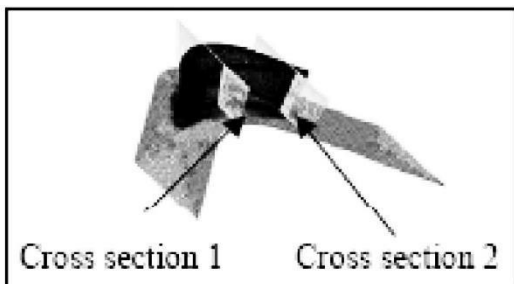
طرف رأسي تجويفي Squealer tip



تدفق التسرب من الطرف الرأسي لريشة مكشوفة (غير مغطاة بطوق أو شريحة) Unshrouded

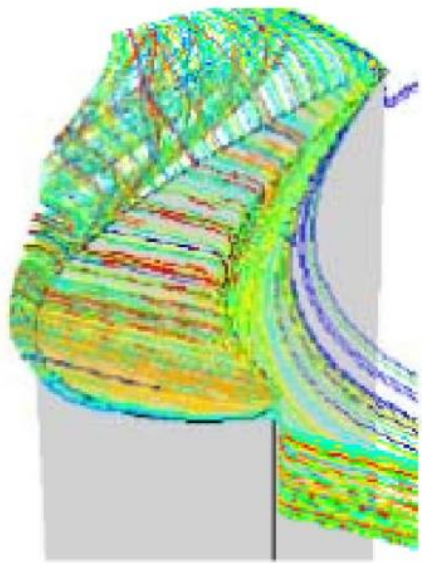


تدفق التسرب عبر مانع تسرب الطرف الرأسي المغطى (المقوى) بشريحة Tip leakage flow over a shrouded tip seal



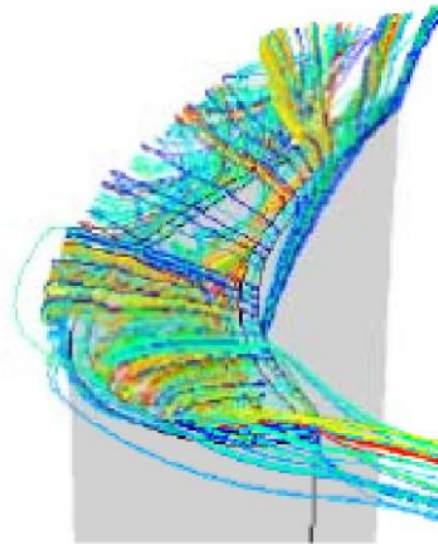
منحنيات محيطية تمثل مقدار السرعة وخطوط الإنسياب ( الجريان)  
Streamlines and Velocity Magnitude Contours

الوتر = Chord



1.0% tip gap

Flat tip طرف رأسي مسطح



Squealer tip طرف رأسي تجويفي

Flow Streamlines over the Blade تدفق خطوط الجريان عبر الريشة

### Steam Turbine Blade Rows صفوف ريش التوربين البخاري



149 MW steam turbine rotor



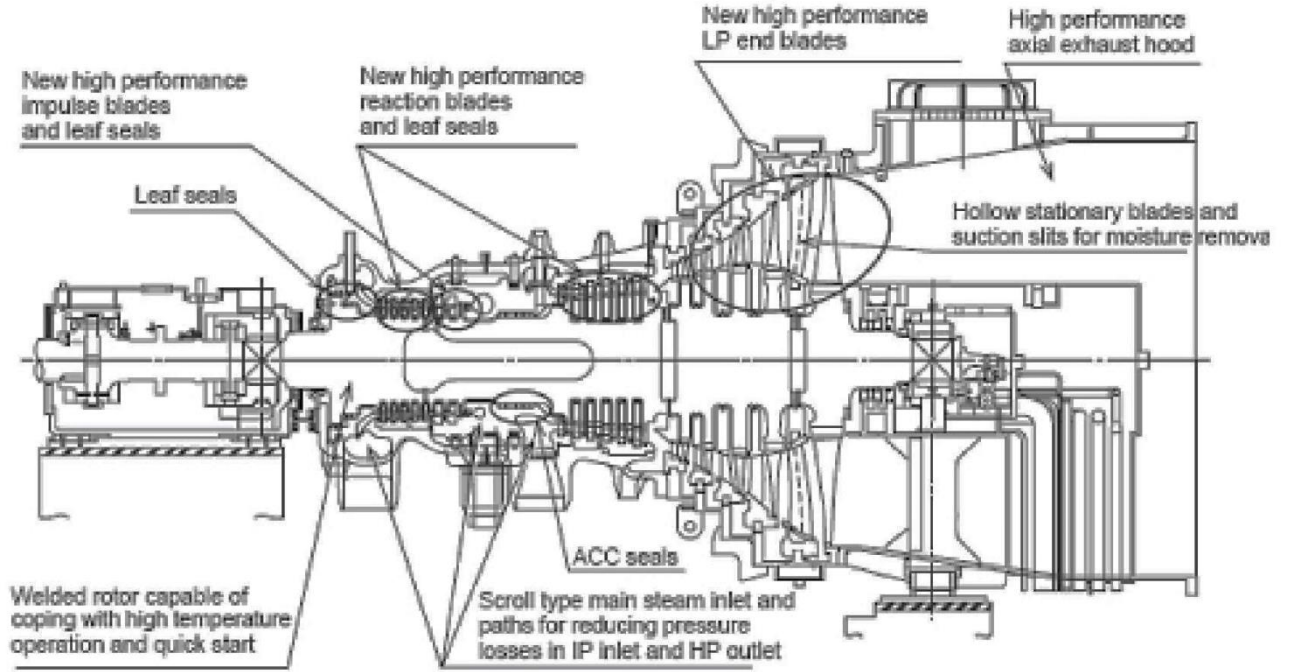
غلاف توربين نوع أحادي الأسطوانة

Single cylinder type turbine casing





## توربين بخاري عالي الأداء High Performance Steam Turbine

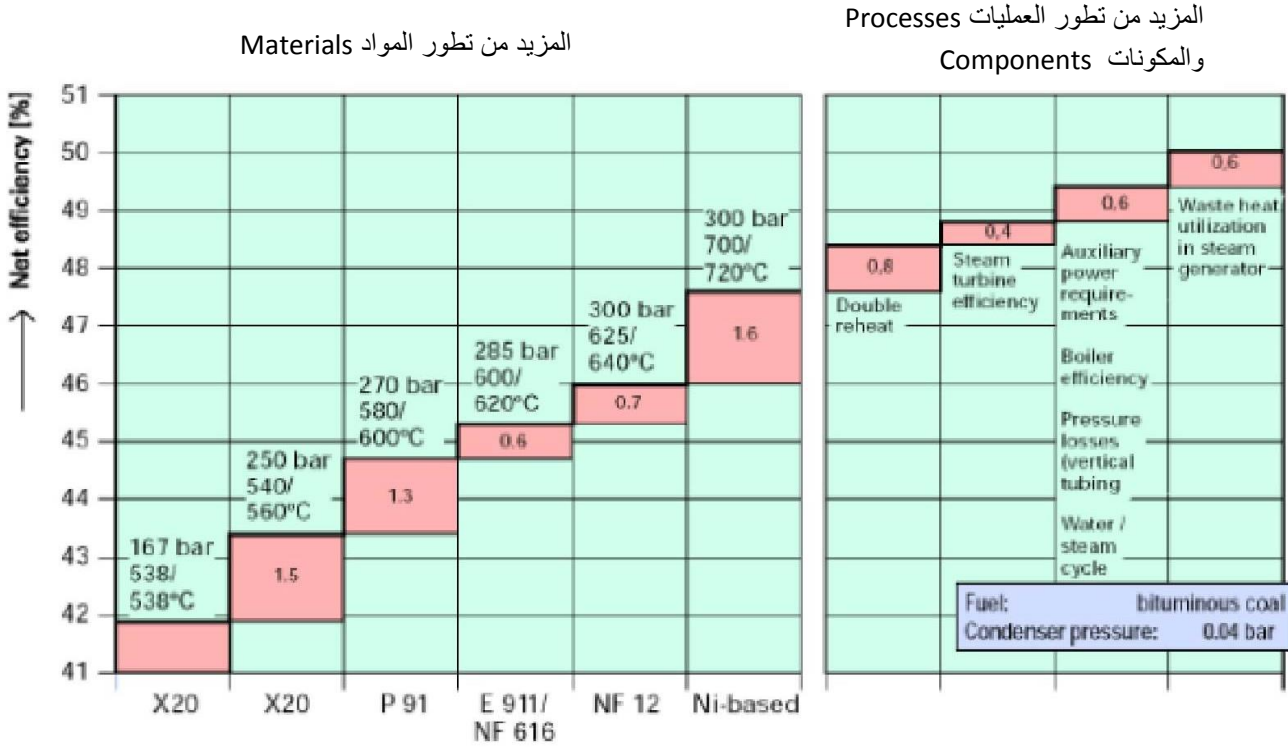


شكل يعرض موقع التقنيات الحديثة New technologies في توربين بخاري عالي الأداء High performance  
بسعة Capacity (١٠٥ ميكرواواط MW) من طراز ميتسوبيشي Mitsubishi



ريش الضغط المنخفض النهائية LP end blades عالية الأداء (٣٦٠٠ دورة \ دقيقة rpm - ٣٦ إنج Inches) لتوربين بخاري  
نموذجي عالي الأداء من طراز ميتسوبيشي

## زيادة صافي الكفاءة Increasing Net Efficiency



المصدر : مولدات البخار للجيل القادم من محطات الطاقة في جوانب التصميم والأداء التشغيلي .

Source : J. Franke, R. Kral, and E. Wittchow (1999) : Steam generators for the next generation of power plants aspects of design and operating performance . VGB Power Tech 12/9.

## Future Trends الإتجاهات المستقبلية

- توربينات بخارية فوق الحرجة جدا Ultra Supercritical (USC) steam turbines .
- ضغوط دورة عالية (~ 350 بار) ودرجات حرارة (< 700 درجة مئوية °C) .
- ريش ثلاثية الأبعاد 3D blades لها أشكال إيروديناميكية (ديناميكية هوائية) Aerodynamic shapes قليلة الخسارة مع الإنحناء (التقوس) Bow والهزيل Lean .
- التمهيد لمنع التسرب الطرفي للجزء الدوار Rotor tip seal .
- فولاذ حديدي Ferritic steels مع تحسين مقاومة الزحف (تغيير الشكل) Creep strength للأجزاء الدوارة وريش التوربين المطروقة حراريا Forged .
- تصاميم مُحسنة للمراجل مع أنابيب تمرير عمودية أحادية Vertical single pass tubes .

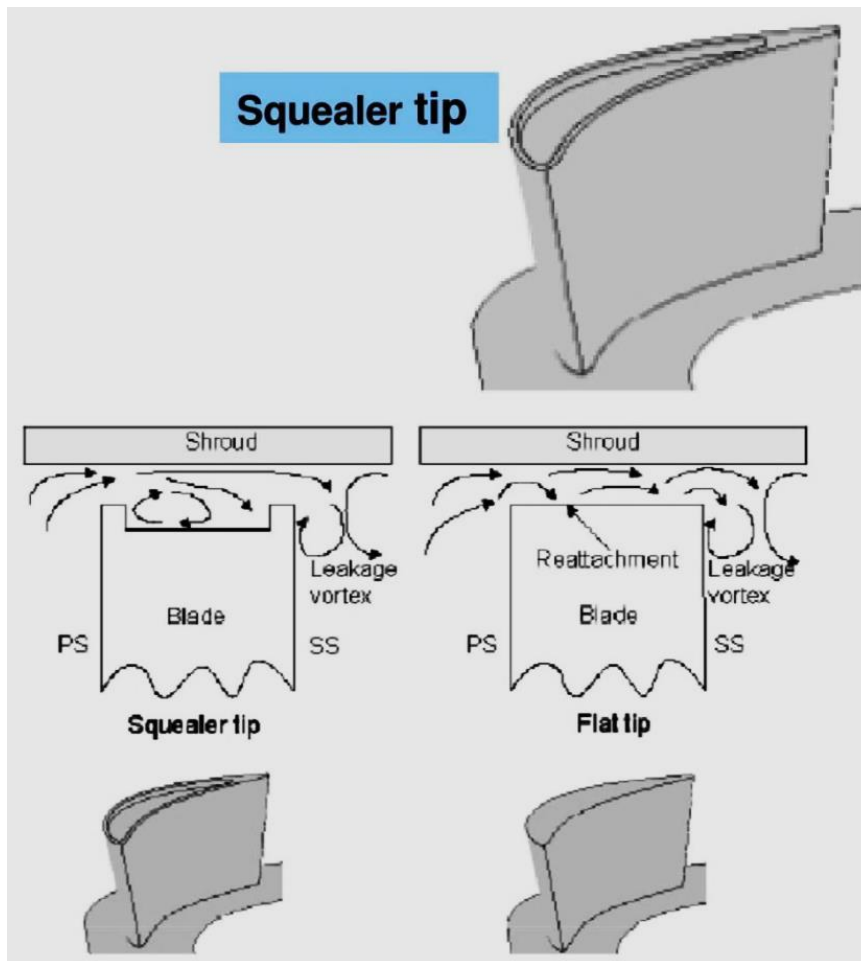
## ملاحظة توضيحية حول تدفق تسرب الطرف الرأسي التجويفي Squealer Tip Leakage Flow

يعد تقليل خسارة تسرب الطرف الرأسي مهما لتحسين الأداء الديناميكي الهوائي Aerodynamic performance للتوربين .

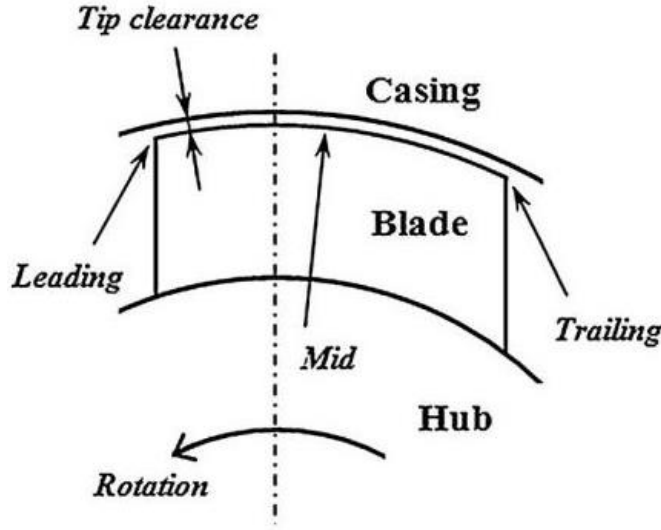
غالبا ما يحتوي الطرف الرأسي لريشة التوربين على موانع تسرب طرفية Tip seals لتقليل الفجوة Gap بين أجزاء قطع الحلقة Ring segments والريش في مسار الغاز أو البخار بالتوربين . غالبا ما يشار إلى موانع التسرب الطرفية بالأسم (Squealer tips) ويتم دمجها على أطراف الريش للمساعدة في تقليل خسائر الضغط بين مراحل التوربين .

توفر الريشة ذات الطرف الرأسي التجويفي (الحافة الرفيعة) Squealer tip blade معامل انتقال حرارة إجمالي Overall heat transfer coefficient أقل عند مقارنتها بريشة الطرف الرأسي المسطح Flat tip blade .

يوفر الطرف الرأسي التجويفي (الحافة الرفيعة) إنخفاضا كبيرا في السرعة Velocity من خلال فجوة الطرف الرأسي Tip gap عند مقارنتها بريشة الطرف الرأسي المسطح . بالنسبة إلى الطرف المسطح ، تؤدي الزيادة في رقم رينولدز Reynolds number إلى زيادة في مستويات سرعة الطرف الرأسي ، لكن الطرف الرأسي التجويفي غير حساس نسبيا للتغيرات في رقم رينولدز.



شكل يوضح تدفق التسرب من الطرف الرأسي لريشة مكشوفة (غير مغطاة بطوق أو شريحة Unshrouded)



شكل يوضح الخلوص الطرفي الرأسي Tip clearance

**ملاحظة توضيحية :** رقم رينولدز رمزه  $Re$  هو رقم لا بعدي Dimensionless quantity له أهمية كبيرة في تطبيقات ميكانيك الموائع Fluid mechanics ، يستخدم رقم رينولدز للمقارنة بين أنظمة تجريبية مختلفة لتحديد مقدار التشابه الديناميكي بينها . كما ويستخدم الرقم لإستخلاص معلومات عن نظام جريان معين ، كالجريان الصفائحي أو الجريان المضطرب أو الدوامي . فعادة ما تتسم أنظمة جريان صفائحية بأرقام رينولدز منخفضة ، حيث تكون قوى اللزوجة ذات فعالية أكبر تؤدي إلى وجود نظام جريان ثابت وأملس ، في حين تتسم الأنظمة الدوامية بأرقام مرتفعة المصحوبة بقوى عطالة (القصور الذاتي) أكبر تؤدي إلى حدوث دوامات في نظام جريان متأرجح .

عند أرقام رينولدز المنخفضة ، تميل التدفقات إلى التحكم في التدفق الصفائحي أو الرقائقي (الشبيه بالورق) -Laminar (sheet-like) flow ، في حين عند أرقام رينولدز العالية فإن اضطراب Turbulence ينتج عن الاختلافات في سرعة وإتجاه السائل ، والتي قد تتقاطع أحيانا أو حتى تتعارض (تعاكس) مع الإتجاه العام للتدفق (التيارات الدوامية Eddy currents) . تبدأ هذه التيارات الدوامية بتسريع عملية اضطراب التدفق ، بإستخدام الطاقة ، والتي بالنسبة للسوائل Liquids تزيد من فرص التكهف (التجويف ، التآكل نتيجة التجوف) Cavitation للسوائل . يحتوي رقم رينولدز على تطبيقات واسعة ، تتراوح من تدفق السائل في الأنابيب Pipe إلى مرور الهواء Air فوق جناح الطائرة Aircraft wing . يتم إستخدامه للتنبؤ بالانتقال من التدفق الصفائحي إلى التدفق المضطرب Turbulent flow ، ويستخدم في تدرج حالات التدفق المتشابهة ولكنها مختلفة الحجم ، مثل بين نموذج الطائرة في نفق هوائي وبين النسخة الكاملة الحجم Full size version . يمكن إستخدام التنبؤات بظهور الإضطراب والقدرة على حساب التأثيرات القياس للمساعدة في التنبؤ بسلوك الموائع Fluid behaviour على نطاق أوسع ، كما هو الحال في حركة Movement الهواء أو الماء على المستوى المحلي أو العالمي وبالتالي التأثيرات الجوية Meteorological والمناخية Climatological المرتبطة بها .

ينسب هذا الرقم إلى عالم فيزياء إيرلندي اسمه أوزبورن رينولدز Osborne Reynolds (١٨٤٢ - ١٩١٢)، والذي كان قد اقترح استعمال أرقام رينولدز في عام ١٨٨٣ .

**ملاحظة توضيحية :** قوى العطالة أو القصور الذاتي Inertia forces مصطلح فيزيائي يعني مقاومة الجسم المادي لأي تغيير في سرعته Velocity وكذلك مقاومة تغيير سرعة Speed أو إتجاه Direction الجسم المتحرك ، ولقد عبر نيوتن عن هذا المصطلح في قانونه الأول المعروف بقانون القصور الذاتي أو العطالة. وهو خاصية مقاومة الجسم المادي لتغيير حالته من السكون إلى الحركة بسرعة منتظمة وفي خط مستقيم ما لم تؤثر عليه قوة تغير من حالته أي أن كل جسم مادي قاصر عن تغيير حالته من السكون أو الحركة ما لم تؤثر عليه قوة تغير من حالته .

## الدوامات Vortices

التدفق الرئيسي Main flow وتدفق فجوة الطرف الرأسي Tip gap flow لصف الجزء الدوار Rotor row يحتوي على دوامات Vortices مميزة ومختلفة . هذه الدوامات قوية بما فيه الكفاية للتأثير على مجال التدفق Flow field ، وبالتالي فهي مهمة في شرح كيف أن هندسية الطرف الرأسي التجويفي Cavity tip يزيد من كفاءة التوربين . الدوامات داخل الطرف التجويفي هي : دوامة التجويف Cavity vortex ودوامة الكشط (القشط) Scraping vortex ودوامة الفصل الزاوي Corner separation vortex ، وهي موضحة في الشكل أعلاه . ودوامات التدفق الرئيسية هي : دوامة تسرب الطرف الرأسي Tip-leakage vortex ودوامة الممر Passage vortex .

**دوامة التجويف** : عندما ينفصل التدفق عند جانب الضغط (PS) Pressure Side للريشة ، فإنه يقص Shear الحافة Rim . هذا المائع المنفصل والمقصوع يتجه إلى منطقة طرف الفجوة مع زيادة الدوامية Vorticity ، ويمنع انخفاض إرتفاع التجويف من إعادة الإتصال Reattaching . يقص التدفق المنفصل أكثر في منفث المرور ، مما ينتج دوامة تجويف بالقرب من حافة جانب الضغط .

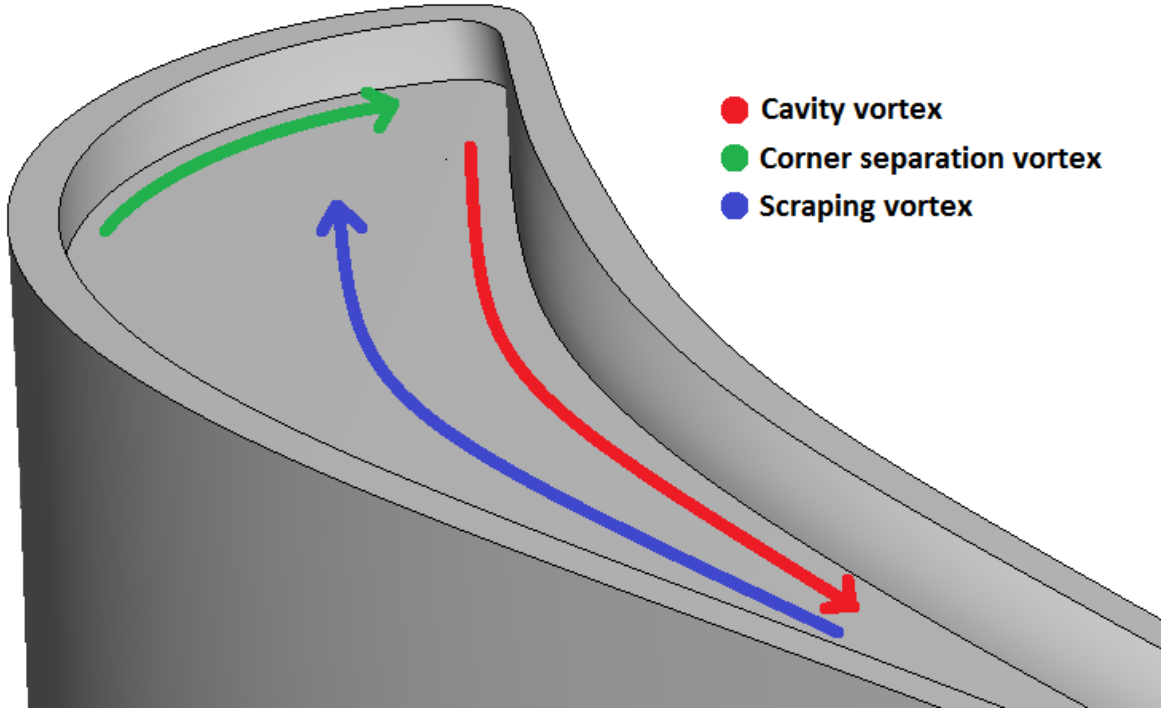
**دوامة القشط** : بينما يمر المائع اللزج Viscous fluid عبر الدوران العكسي لغطاء الريشة (شريحة التقوية) Shroud ، فإن الشريحة ستقص المائع ، مع وجود قص أقوى على حواف الطرف التجويفي ، حيث ينقلص حجم التدفق بين الحافة وشريحة التقوية . دوامة الكشط هي نتيجة لهذا القص ، وتكون في الطرف التجويفي بين دوامة التجويف وحافة جانب الشفط (المص) Suction Side (SS) . في المحاكاة العددية Numerical simulation ، تظهر دوامة الكشط عندما يتم تحديد حركة نسبية Relative motion بين شريحة التقوية وريشة الجزء الدوار Rotor blade . ومن خلال الأبحاث عن تأثيرات الحركة النسبية للجدار الجانبي Endwall ، لوحظ أن وجود دوامة كشط يعمل على تقليل الضغط عبر فجوة الطرف الرأسي ، مما يقلل من معدل التدفق الكتلي للتسرب Leakage mass flow rate .

أن دوامة الكشط المتولدة داخل التجويف هي بنية التدفق السائدة التي تؤثر على الأداء الديناميكي للتوربين . تتشكل من خلال دوامة الكشط ، شبكة من المسارات المتداخلة تشابه تأثير مانع التسرب Sealing ، مما يزيد من تبديد الطاقة Energy dissipation لتدفق التسرب داخل الفجوة ويقلل من مساحة التدفق المكافئ Equivalent flow area عند مخرج الفجوة . وبالتالي يتم تقليل معامل التفريغ (التصريف) Discharge coefficient من الطرف الرأسي التجويفي ، ومن ثم يتم تقليل فقدان تسرب الطرفي الرأسي . إن الاختلافات في توزيع تحميل الريشة في منطقة الطرف الرأسي وهندسة التجويف Squealer geometry ، تغير خصائص دوامة الكشط ، مثل الحجم Size والشدة (الكثافة) Intensity وموضعها داخل التجويف ، مما يؤدي إلى تأثير تحكم مختلف على فقدان التسرب . عن طريق توزيع معقول لتحميل الطرف الرأسي للريشة إضافة إلى هندسة تجويف الطرف الرأسي لتنظيم خصائص دوامة الكشط ، يمكن للطرف الرأسي التجويفي تحسين الأداء الديناميكي للتوربين بفعالية .

**دوامة الفصل الزاوي** : في زاوية الحافة الأمامية Leading edge لجانب الشفط ، يكون الضغط الساكن Static pressure عند الحد الأقصى موضعياً . هذا يؤدي إلى إستيعاب أو إمتصاص التدفق مسبباً دوامة فصل زاوي . يوصف أصل الحد الأقصى للضغط الساكن على أنه إصطدام (إعتراض) Impingement للتدفقات الثانوية Secondary flows عبر الممر .

**دوامة تسرب الطرف الرأسي** : عندما يخرج تدفق تسرب الطرف الرأسي عبر حافة جانب الشفط ، فإنه يخرج بسرعة Velocity مختلفة وزاوية Angle مختلفة عن التدفق الرئيسي المار ، مما يُنشأ صفيحة دوامية . عندما تتحرك هذه الصفيحة ، يتم إنشاء دوامة تسرب طرفي . لا تؤثر ديناميكيات Dynamics (حركة) دوامة التسرب الطرفي على فقدان ، بل على مجال التدفق عند جانب الشفط لفجوة الطرف الرأسي الذي يتم إنشاؤها فيه .

**دوامة الممر :** يُحدث التدفق المار عبر الحافة الأمامية للجزء الدوار دوامة عند إتصال المحور الدوار Hub والحافة الأمامية . ينقسم التدفق إلى دوامة شكلها أشبه بحدوة الحصان Horse shoe vortex ، مع دخول أحد فرعي الحدوة إلى الممر عند جانب الشفت للجزء الدوار ، والآخر عند جانب الضغط .

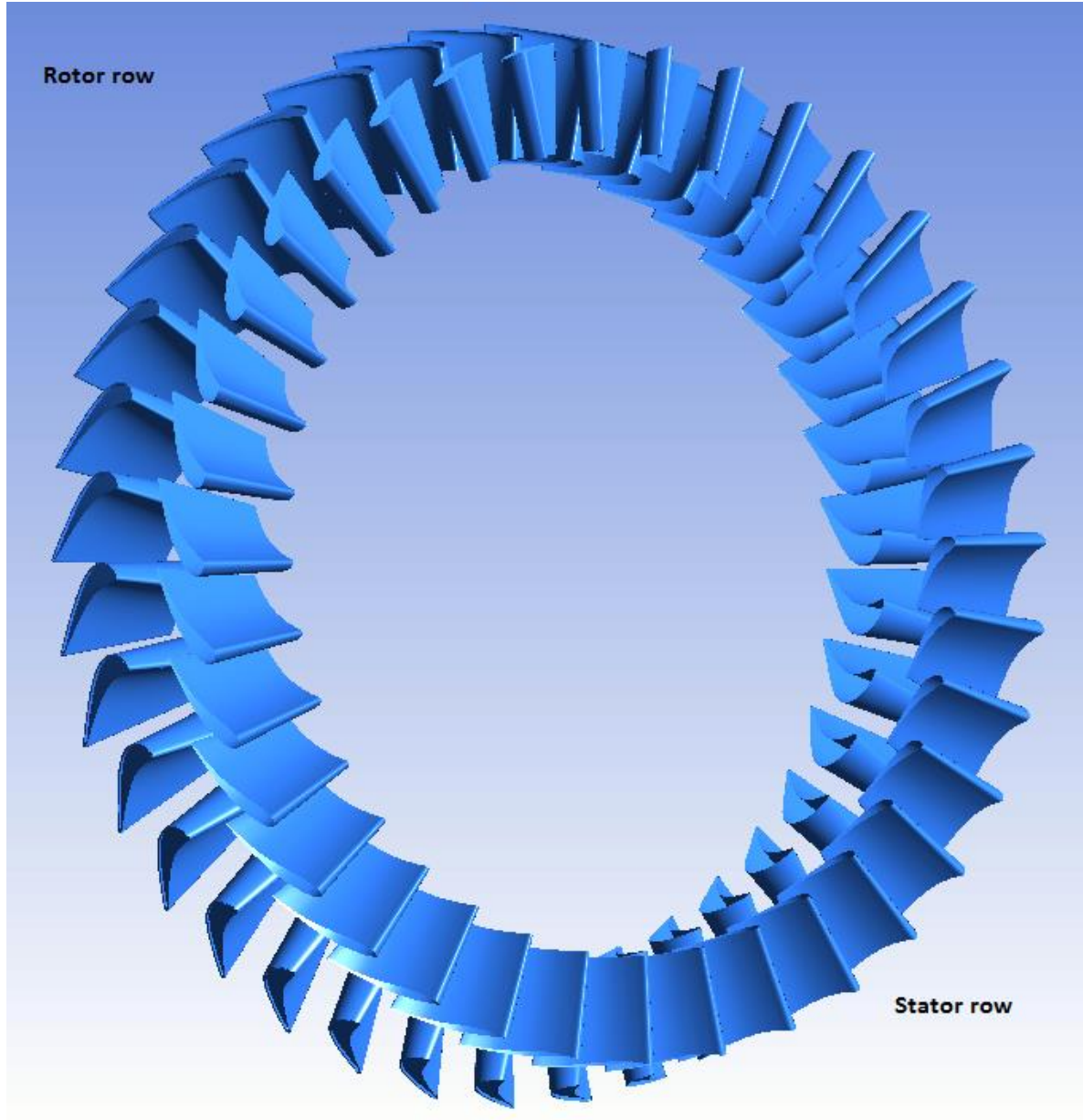


شكل يوضح إتجاه وموقع الدوامات الثلاثة في الطرف الرأسي التجويفي.  
The direction and the location the three cavity tip vortices.

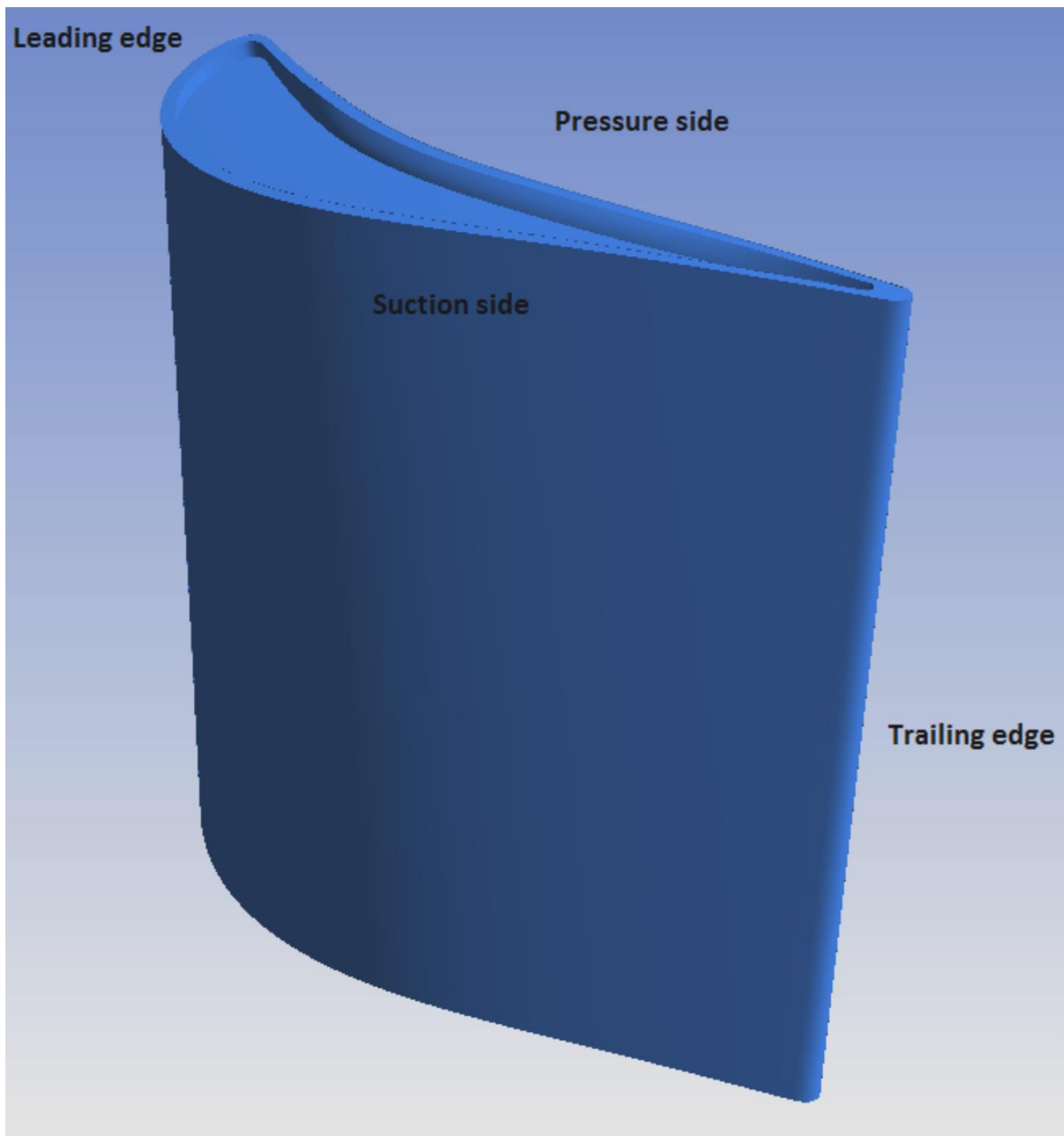


شكل يوضح الطرف الرأسي التجويفي (الحافة الرفيعة) للريشة Squealer tip blade



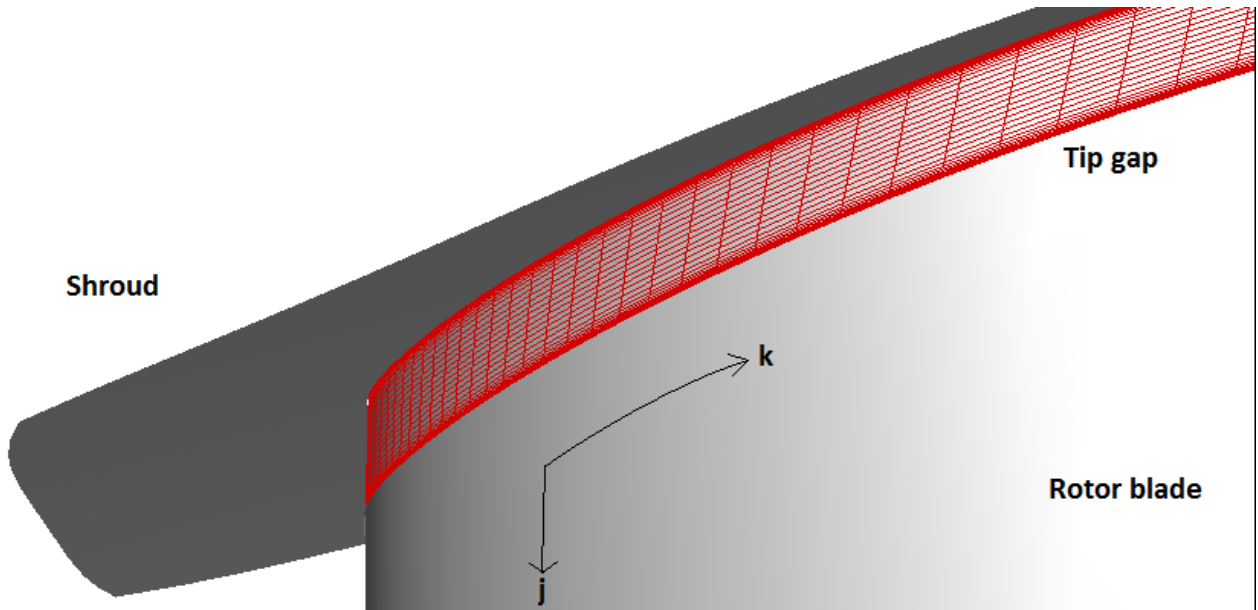


شكل يوضح مرحلة واحدة في الماكينة التوربينية المحورية Axial turbomachine.

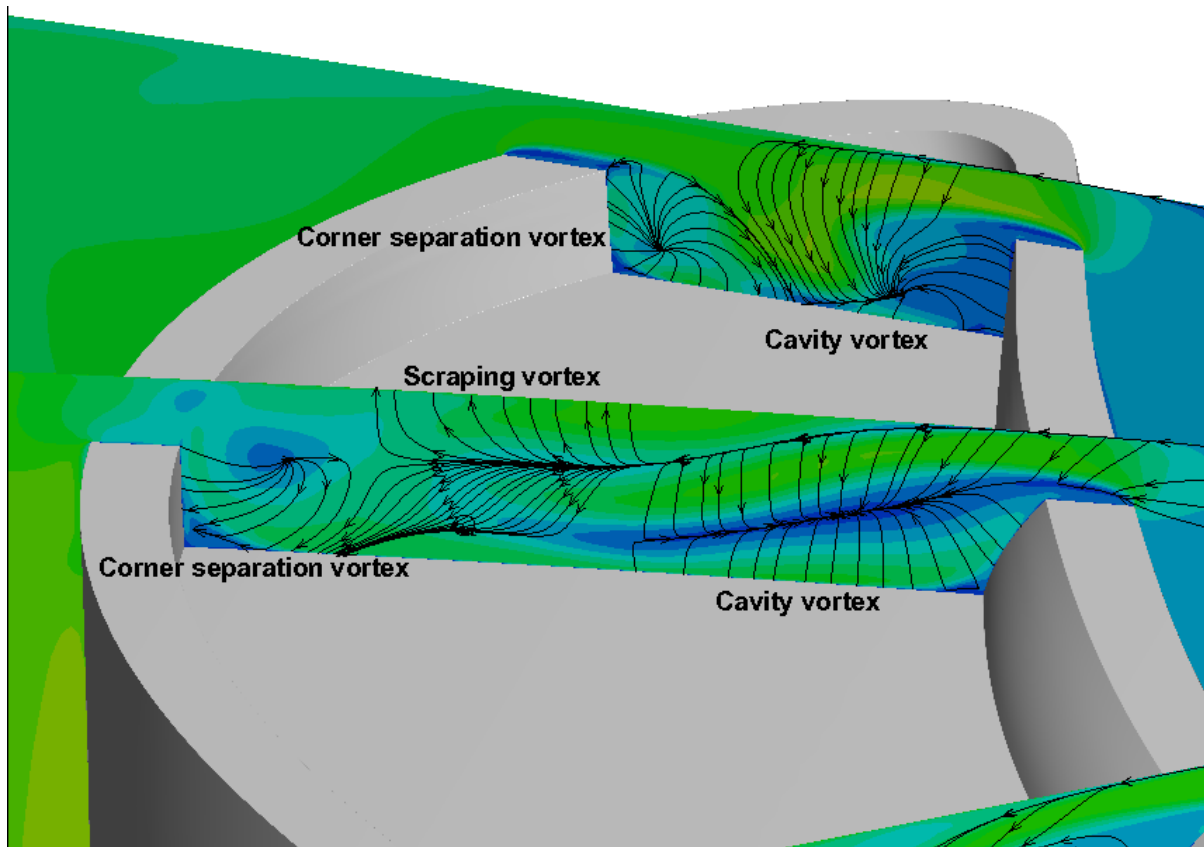


شكل يوضح ريشة الجزء الدوار للتوربين مع طرف رأسي تجويفي Turbine rotor blade with cavity tip

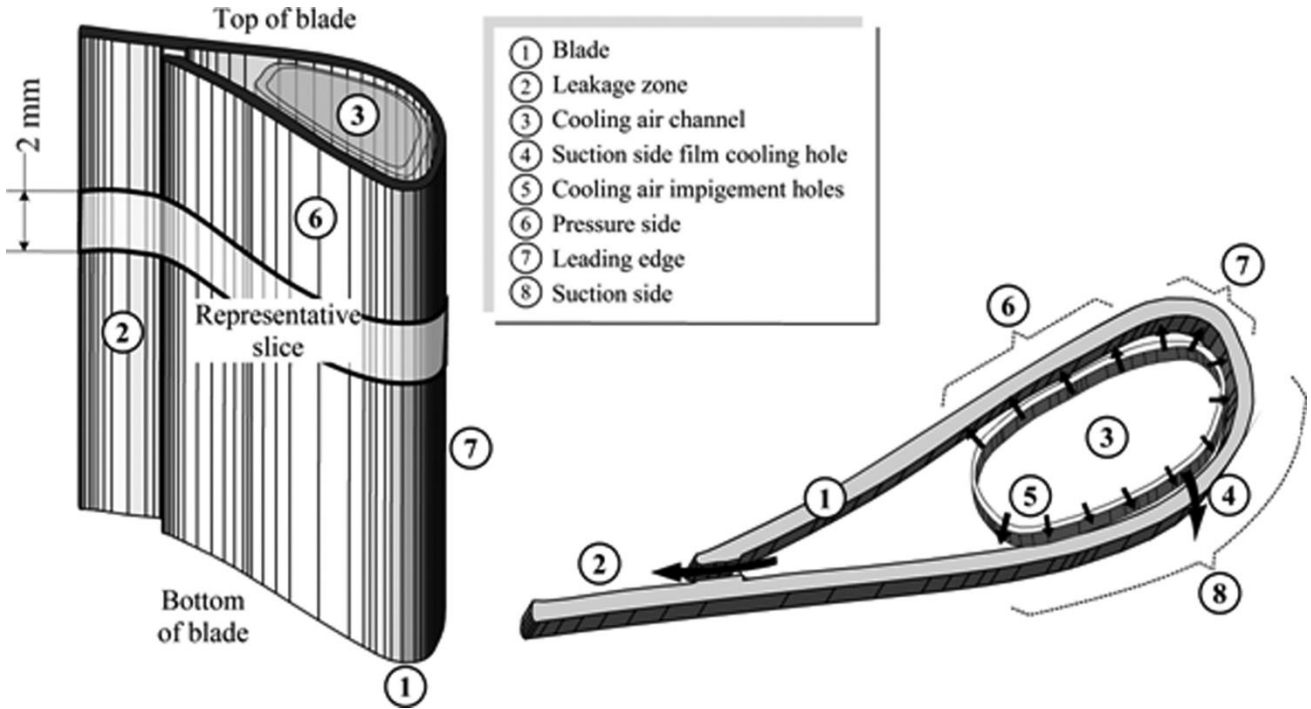




تحديد مخرج فجوة الطرف الرأسي Tip gap exit باللون الأحمر عند جانب الشفط للريشة Blade suction side ، ويتم حساب معدل التدفق الكتلي للتسرب Leakage mass flow rate بجمع المؤشرين ( k and j ) .



شكل يوضح تواجد كل أنواع دوامات الطرف الرأسي التجويفي



شكل يوضح بعض اجزاء الريشة

### ملاحظة توضيحية حول مصطلحات (Spanwise) و (Chordwise)

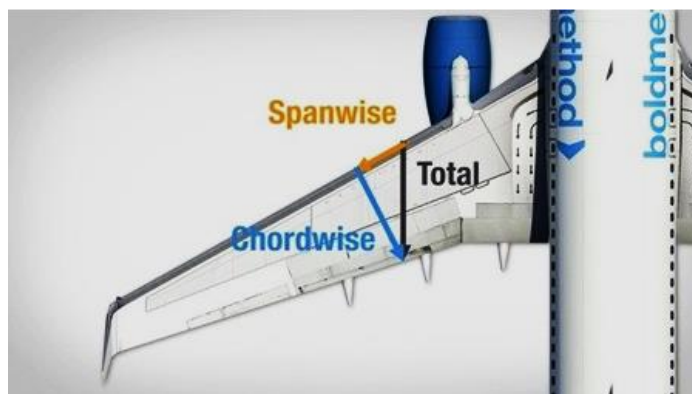
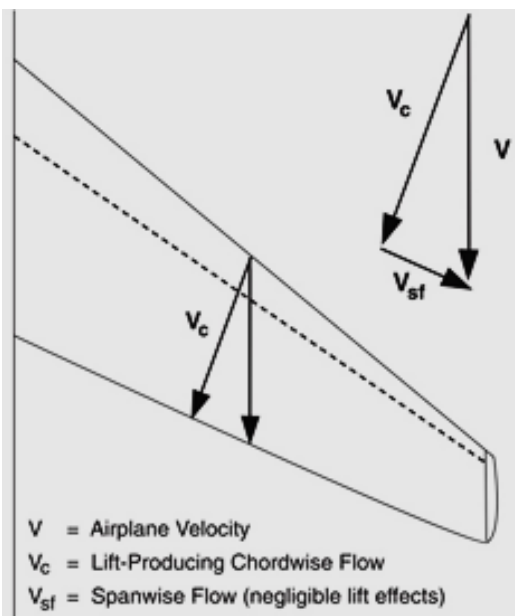
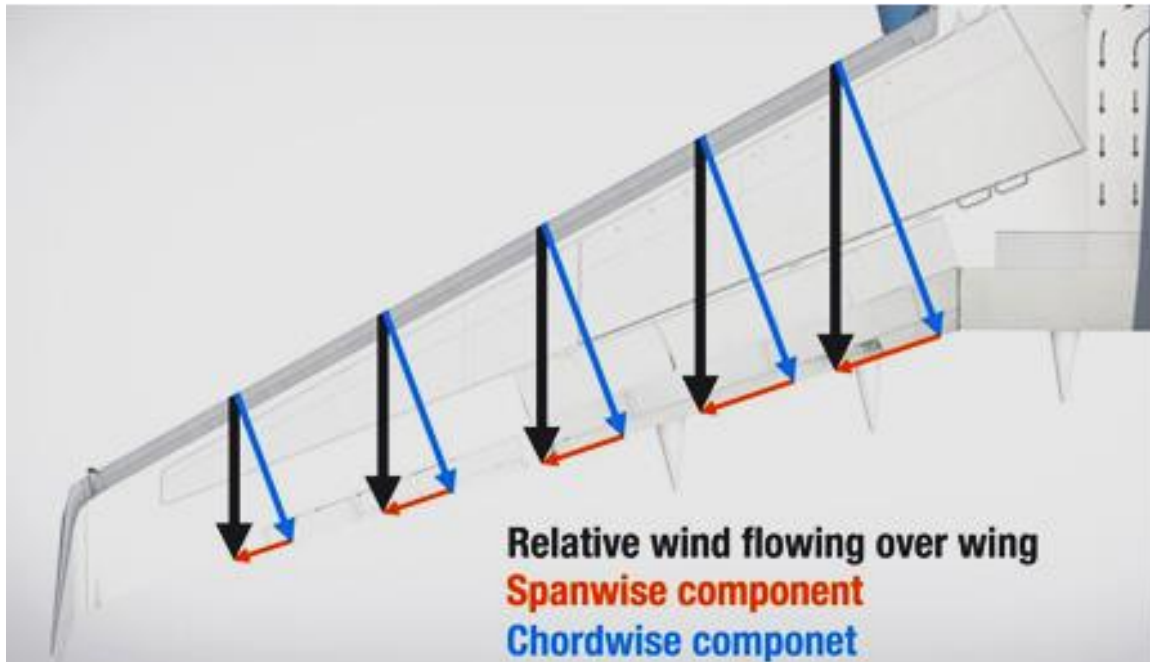
مسافة إمتداد الريشة Span هي المسافة من الطرف الرأسي للريشة (قمة الريشة) Blade Tip إلى جذر الريشة Blade Root . لذلك فإن أي قياس Measurement على الريشة في هذا الإتجاه يُطلق عليه اسم (Spanwise) . يُستخدم مصطلح (Spanwise) لوصف إتجاه القياس على طول الريشة من الجذر إلى الطرف الرأسي .

الوتر Chord هو الخط الممتد من الحافة الأمامية Leading edge للريشة إلى الحافة الخلفية Trailing edge لها ، ويعمل الوتر عمودياً على مسافة إمتداد الريشة . أي قياس في الريشة بين الحافتين يطلق عليه أسم (Chordwise) . يُستخدم المصطلح (Chordwise) لوصف إتجاه القياس على طول الريشة من الحافة الأمامية إلى الحافة الخلفية .

Spanwise يكون من جذر الريشة إلى طرف رأس الريشة ، في حين أن chordwise يكون من حافة الريشة الأمامية إلى حافة الريشة الخلفية .

Chordwise هو في الأساس ظاهرة ثنائية الأبعاد Two dimensional phenomena المستخدمة في السطح الإنسيابي للريشة (شكل مقطع الريشة) Airfoil بينما Spanwise هو ثلاثي الأبعاد 3 Dimensional يُستخدم لكامل الريشة .

عادة ما يتم وصف حركة تدفق الهواء على جناح الطائرة Airplane wing على أنها Spanwise و Chordwise تمتد من الحكمة والحكمة . تكون مسافة الإمتداد Span لجناح الطائرة ثابتة (باستثناء عدد قليل من الطائرات المقاتلة Fighter planes ذات الإمتداد المتغير) حيث يتغير الوتر Chord (يقول) ، وبالتالي فإن الجناح يتناقص في الشكل . الأشكال الأربعة أدناه توضح حركة تدفق الهواء على جناح الطائرة .



مثال : أشكال توضيحية لحركة تدفق الهواء على جناح الطائرة

## المراجع References

- 1- Design of Steam Turbines . Session delivered by: Prof. Q. H. Nagpurwala .
- 2- Evolution of Cavity Tip Vortices in High-Pressure Turbines. Albin Berglund, 2017
- 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 .