

كتاب ماكينات هيدروليكية (4) التوربينات محورية السريان

تأليف

دكتور أسامة محمد المرضي سليمان خيال
أستاذ مشارك بقسم الهندسة الميكانيكية ، كلية الهندسة والتقنية
جامعة وادي النيل ، عطبرة ، السودان

مايو 2020م

شكر وعرفان

الشكر والعرفان لله والتبريكات والصلوات على رسوله وخادمه محمد صلى الله عليه وسلم وعلى آله وصحابه وجميع من تبعه إلى يوم القيامة.

لذكرى كُلِّ من أمي الغالية خضرة درار طه، وأبي العزيز محمد المرضي سليمان، وخالتي الحبيبة زعفران درار طه الذين تعلمت منهم القيمة العظيمة للعمل واحترام الوقت وترتيبه وتدبيره. إلى زوجتي الأولى نوال عباس عبد المجيد وبناتي الثلاث رؤى، روان وآية تقديراً لحبهم وصبرهم ومثابرتهم في توفير الراحة والسكون خاصّةً عندما تتعقد وتتشابك الأمور.

إلى زوجتي الثانية لمياء عبد الله علي فزاري التي مثّل حبها وتضرعها إلى الله الزخم الذي دفعني للمسير في طريق البحث والمعرفة الشائك.

يُودُّ الكاتب أن يتقدم بالشكر أجذله لكل من ساهم بجهده وفكره ووقته في إخراج هذا الكتاب بالصورة المطلوبة ويخص بذلك الزملاء الأساتذة بقسم الهندسة الميكانيكية بجامعة وادي النيل، وأيضاً الأخوة الأساتذة بقسم الهندسة الميكانيكية بجامعة البحر الأحمر وجامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا.

الشكر والتقدير والعرفان للبروفيسور محمود يس عثمان الذي ساهم بقدر كبير في مراجعة وإعادة مراجعة محتويات الكتاب.

أهدي هذا الكتاب لذكرى كُلِّ من بروفيسور صابر محمد صالح وبروفيسور الفاضل آدم عبد الله وبروفيسور مشارك عبد الجليل يوسف العطا وبروفيسور مشارك محي الدين إدريس حربة وبروفيسور مشارك هاشم احمد علي الهاشمي وبروفيسور مشارك صلاح احمد علي، والاستاذة

اشراقة صالح عبد الله صالح، والاستاذة انتصار عبده الذين ساهموا في تأسيس الصرح الشامخ
كلية الهندسة الميكانيكية عطبرة، رحمهم الله جميعاً وأسكنهم فسيح جناته مع الصديقين والشهداء
وحسن أولئك رفيقاً.

أهدي هذا الكتاب بصفة أساسية لطلاب دبلوم وبكالوريوس الهندسة في جميع التخصصات خاصة
طلاب قسم الهندسة الميكانيكية حيث يستعرض هذا الكتاب علم وتكنولوجيا التوربينات محورية
السريان {axial flow turbines}.

وأعبر عن شكري وامتناني إلى المهندس أسامة محمود بمركز دانية لخدمات الطباعة والنشر
بمدينة عطبرة الذي أنفق العديد من الساعات في طباعة، مراجعة وإعادة طباعة هذا الكتاب أكثر
من مرة.

أخيراً، أرجو من الله سبحانه وتعالى أن يتقبل هذا العمل المتواضع والذي آمل أن يكون ذو فائدة
 للقارئ.

مقدمة الطبعة الأولى

بحمد الله و توفيقه فقد اكملت كتاب ماكينات هيدروليكية (4) الذي يختص بدراسة التوربينات محورية السريان أو عجلة توربين كابلان. هذا الكتاب هو الكتاب الرابع في سلسلة كتب ماكينات هيدروليكية لطلاب الهندسة في تخصصات هندسة ميكانيكية ومدنية. لقد تم تأليف هذا الكتاب اثناء فترة الحجر الصحي الذي فرضته السلطات الصحية في جميع عموم دولة السودان بسبب الانتشار الوبائي العالمي لفيروس كورونا المستجد (Pandemic Corona Virus) أو

(COVID - 19). من خلال هذا المنبر المعرفي أسأل الله العلي القدير أن يديم علي البشرية جمعاء نعمة الصحة والعافية.

الحمد لله والصلاة والسلام علي رسوله محمد صلى الله عليه وسلم وبعد:

إنَّ مؤلّف هذا الكتاب إيماناً منه بالدور العظيم والمقدّر للأستاذ الجامعي في إثراء حركة التأليف والتعريب والترجمة يأمل أن يفي هذا الكتاب بمتطلبات برامج البكالوريوس والدبلوم العام والمتوسط لطلاب وفنيي الهندسة الميكانيكية وهندسة الإنتاج أو التصنيع والهندسة الكهربائية والمدنية. يتفق هذا الكتاب لغوياً مع القاموس الهندسي الموحّد السوداني، ويُعدّ الكتاب مرجعاً في مجاله حيث يمكن أن يستفيد منه الطالب والمهندس والباحث ويعتبر الكتاب مقتبساً من مذكرات مؤلفه في تدريسه لهذا المقرر لفترة لا تقل عن ثلاث وعشرون عاماً.

يهدف هذا الكتاب لتأكيد أهمية استخدام التوربينات لتوليد قدرة ميكانيكية يُستفاد منها في توليد قدرة كهربائية أو تشغيل منظومة مضخّات أو غيرها من التطبيقات الهندسية.

يشتمل هذا الكتاب على أربعة فصول، حيث يستعرض الفصل الأول مدخل ودراسة نظرية للتوربين الدفّاع وتوربين كابلان بإستخدام نظرية مُعدّل عزم كمية الحركة.

أما الفصل الثاني فيشتمل على أمثلة محلولة في التوربين الدفّاع وتوربين كابلان بإستخدام نظرية كمية الحركة أو الزخم (momentum theorem) وذلك حتى يتمكن الطالب من إستيعاب مادة الكتاب بسهولة ويسر، حيث تتضمن هذه الأمثلة كيفية اشتقاق المعادلات للوصول إلى الحلول النهائية للمسائل وتحديد بعض المتغيرات مثل قدرة خرج ودخل التوربين، الكفاءة الهيدروليكية، زوايا الريشة للمدخل والمخرج عند الطرف وعند الصرة وعند متوسط نصف القطر، سرعة الدوران، مُعدّل التصريف خلال التوربين، السرعة النوعية البعدية واللابعدية، قطر العجلة، صافي السمّ المتاح للتوربين، كفاءة أنبوب السحب، نسبة السرعة ونسبة السريان وغيرها.

يتناول الفصل الثالث مجموعة معتبرة من المسائل غير المحلولة في التوربين الدفّاع وتوربين كابلان، وهي عبارة عن تدريبات للطلاب في حل المسائل بصورة منطقية ومرتبّة إعتياداً على معطيات المسألة ومطلوباتها وإستناداً على الحلول النموذجية للأمثلة المعطاة في الفصل الثاني من هذا الكتاب.

أما الفصل الرابع والأخير من هذا الكتاب فيشتمل على مدخل ودراسة نظرية للتوربين الدفّاع وتوربين كابلان بإستخدام نظرية الجسيمات أو الجنيّحات الهوائية. في نهاية هذا الفصل هنالك بعض الأمثلة والمسائل التي يُرجى متابعتها.

إنَّ الكاتب يأمل أن يُساهم هذا الجهد المتواضع في إثراء المكتبة الجامعية داخل السودان وخارجه في هذا المجال من المعرفة ويأمل من القارئ بضرورة إرسال تغذية راجعة إن كانت هنالك ثمة أخطاء حتى يستطيع الكاتب تصويبها في الطبعة التالية للكتاب.

اللهم لا سهل إلا ما جعلته سهلاً

وأنت تجعل الحزن إذا شئت سهلاً

والله ولي التوفيق

المؤلف

دكتور أسامة محمد المرضي سليمان

خيال

قسم الهندسة الميكانيكية

كلية الهندسة والتقنية

جامعة واي النيل

مايو 2020م

المحتويات

الموضوع	الصفحة
شكر وعرفان	ii
مقدمة الطبعة الأولى	iv
المحتويات	vii

الفصل الأول: التوربينة الدفاعة وتوربينة كابلان مؤسستان على نظرية معدّل تغيّر عزم كمية

الحركة

1.1	مدخل	1
-----	------	---

الفصل الثاني: أمثلة محلولة في التوربينة الدفاعة وتوربينة كابلان باستخدام نظرية كمية

الحركة

2.1	مثال (1) تحديد زاوية الريشة عند المدخل والكفاءة الهيدروليكية	5
-----	--	---

للتوربينة

2.2	مثال (2) تحديد زاويتي المدخل والمخرج للريشة عند الطرف وسرعة	7
-----	---	---

الدوران للماكينة

2.3	مثال (3) إيجاد الكفاءة الهيدروليكية، معدّل التصريف خلال التوربين	8
-----	--	---

والقدرة المنتجة من التوربين

2.4	مثال (4) تحديد زوايا ريشة العجلة عند المدخل والمخرج وسرعة دوران	10
-----	---	----

التوربين

2.5	مثال (5) إيجاد مُعدّل التصريف الحجمي، الكفاءة الهيدروليكية، زاوية الريشة عند الطرف البعيد للعجلة وزاوية مخرج عجلة التوجيه	11
2.6	مثال (6) إيجاد قطر العجلة، سرعة العجلة وسرعات العجلة النوعية البعيدة واللابعيدة	13
2.7	مثال (7) تحديد قطر العجلة والسرعة الدوّارة للتوربين	14
2.8	مثال (8) تحديد صافي السمّت المتاح للتوربين، القدرة المنتجة والسرعة النوعية	16
2.9	مثال (9) تحديد كفاءة التوربين	17
2.10	مثال (10) حساب الارتفاع الأقصى للعجلة من منسوب المُسرّب السفلي	19
2.11	مثال (11) تحديد السرعة النوعية للتوربين واختيار التوربين المناسب	21
2.12	مثال (12) حساب السرعة النوعية، كفاءة التوربين، نسبة السرعة ونسبة السريان	22
2.13	مثال (13) حساب زوايا الريشة عند الصُرّة والطرف وعند أيّ قطر	23
2.14	مثال (14) تحديد السمّت وزاوية الريشة عند منتصف نصف القطر	27
2.15	مثال (15) تحديد القدرة والسرعة النوعية البعيدة واللابعيدة لتوربين كابلان	29
2.16	مثال (16) تحديد السرعة لتوربين كابلان	29
2.17	مثال (17) تحديد السرعة، زاوية مخرج ريشة التوجيه وزاوية مخرج	30

- 2.18 مثال (18) تحديد الكفاءة الهيدروليكية إعتماًداً على كفاءة أنبوب 32

السحب

- 2.19 مثال (19) تحديد سمت الضغط عند مخرج توربين دقّاع 33

- 2.20 مثال (20) تحديد الضغط عند مدخل أنبوب السحب 34

الفصل الثالث : مسائل في التوربينة الدقّاعة وتوربينة كابلان بإستخدام نظرية كمية الحركة

- 3.1 مسألة (1) حساب زوايا ريشة الدَّوَّار عند المدخل والمخرج لكلٍ من 36

الطرف والصرة

- 3.2 مسألة (2) تحديد قطر عجلة وسرعة التوربين 36

- 3.3 مسألة (3) حساب السرعة، زاوية ريشة التوجيه وزاوية مخرج الدَّوَّار 36

- 3.4 مسألة (4) تحديد نسبة السرعة المؤسّسة على القطر الخارجي للدَّوَّار 37

- 3.5 مسألة (5) حساب زاوية مخرج ريشة التوجيه وزاوية مدخل الدَّوَّار 37

- 3.6 مسألة (6) حساب سرعة وقطر التوربين 37

- 3.7 مسألة (7) تحديد زوايا مدخل ومخرج الريشة عند الطرف 37

- 3.8 مسألة (8) تحديد قطر وسرعة الدَّوَّار 37

- 3.9 مسألة (9) تحديد الضغط عند أعلى أنبوب السحب والسمت المفقود في 38

انبوب السحب

- 3.10 مسألة (10) تحديد الضغط الفراغي عند مخرج التوربين والقدرة الضائعة 38

في طاقة السرعة عند المخرج

3.11 مسألة (11) تحديد كفاءة أنبوب السحب 38

3.12 مسألة (12) تحديد زوايا المدخل والمخرج للريشة عند متوسط نصف 38

القطر

3.13 مسألة (13) تحديد مُعدّل السريان، زاوية ريشة الدوّار عند المخرج وقدرة 39

الخروج

الفصل الرابع : التوربينة الدفّاعة وتوربينة كابلان مؤسستان على نظرية الجسيمات أو

الجنّيات الهوائية

4.1 مدخل 40

4.2 أمثلة ومساائل محلولة في التوربينة الدفّاعة وتوربينة كابلان مؤسستان 44

على نظرية الجسيمات أو الجنّيات الهوائية

الكتب والمراجع

50 الكتب والمراجع العربية

51 الكتب والمراجع الإنكليزية

الفصل الأول

التوربينة الدّفاعية وتوربينة كابلان مؤسستان على نظرية

مُعَدِّل تغيّر عزم كمية الحركة

Propeller Turbine and Kaplan Turbine Based on Rate of Change of Moment of Momentum

1.1 مدخل (Introduction):

القدرة المنتجة بواسطة توربينة تكون متناسبة مع حاصل ضرب السمّت الكلي المتاح (H) ومُعَدِّل السريان (Q). عليه فإنّ القدرة المطلوبة من توربينة يتم الحصول عليها بالتوفيق أو بالتوافق بين هاتين الكميتين H و Q.

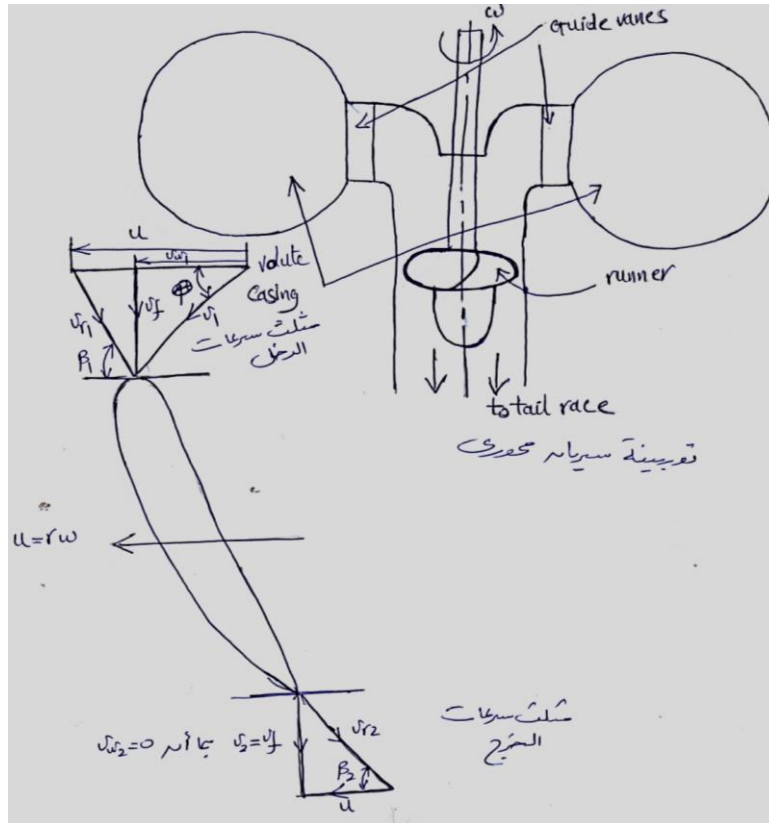
لتوربينة عجلة بلتون، لكي يتم تحقيق سرعات نفث عالية من الضروري أن يكون السمّت الإجمالي ضخماً، ونتيجة لذلك فإنّ مُعَدِّل السريان يكون عادة صغير. على أيّ حال، فإنّ توربينة عجلة بلتون تصبح غير مناسبة إذا كان السمّت المتاح صغيراً، يمكن بالتالي استخدام توربينة فرانسيس ذات النوع نصف القطري (Francis – type radial turbine)، حيث يعتمد مُعَدِّل السريان الذي يمر خلالها على أحجامها (مقاساتها). كما في حالة المضخّات، لمُعَدِّل سريان أكبر فإنّ مقاس عين العجلة (runner eye) يجب زيادته، ممرات الريشة تصبح أقصر لكنها أعرض، وينتج عن ذلك توربينة ذات نوع مختلط (mixed – flow type turbine) .

إذا تمّ حمل الإجراء إضافياً، يتم الحصول على توربينة ذات سريان محوري بما أنّ مُعَدِّل السريان الأقصى يمكن تمريره خلال التوربينة عندما يكون السريان موازياً للمحور. الشكل أدناه (1.1) يوضّح أن ترتيب ريش التوجيه لتوربينة سريان محوري تكون مشابهة لتلك لتوربينة فرانسيس. تكون حلقة ريش التوجيه في مستوى

متعامد مع العمود بحيث أنَّ السريان خلالها يكون نصف قطرياً. على أي حال، يكون وضع العجلة (runner) أسفل السريان، بحيث أنَّ المائع بين ريش التوجيه والعجلة يدور خلال زاوية قائمة في الاتجاه المحوري.

الغرض من ريش التوجيه هو خلق تدويم على المائع بحيث أنه عندما يقترب من العجلة يكون أساسياً من النوع ذو الدوامة الحرة (Free – vortex type) i.e. تتناسب السرعة المماسية (التدويمية) تناسباً عكسياً مع نصف القطر. ريش العجلة يجب أن تكون طويلة لكي تناسب مُعدّل السريان الضخم ونتيجة لذلك فإنّ اعتبارات المتانة (المقاومة) المطلوبة لنقل العزم الضخم المنتج تستدعي ضرورة استخدام وترات ريشة كبيرة (large blade chords).

عليه فإنّ نسب $\frac{\text{خطوة}}{\text{وترة}} = \left(\frac{\text{pitch}}{\text{chord}}\right)$ بمقدار 1.0 إلى 1.5 يتم استخدامها، بالتالي فإنّ عدد الريش يكون صغيراً، عادة 4 ، 5 أو 6 .



شكل (1.1) التوربينة الدفّاعة أو توربينة كابلان ومخططات السرعة لها

تكون سرعة الريش متناسبة طردياً مع نصف القطر بينما سرعة تدويم المائع تكون متناسبة عكسياً مع نصف القطر. لمراعاة هذا الاختلاف، فإنَّ ريش العجلة يتم ليَّها بحيث أنَّ الزاوية التي تصنعها مع المحور تكون أكبر عند الطرف (tip) من الصرة (hub).

يمكن سبابة الريش كأجزاء تكاملية مع العجلة أو يمكن لحامها إلى الصرة (hub). في مثل هذه الحالات، فإنَّ زوايا الريشة يتم تثبيتها بحيث ينشأ عن ذلك هبوط سريع في الكفاءة تحت أحوال الحمل الجزئي بما أنَّ خفض مُعدّل السريان خلال الماكينة يتسبب في عدم انسجام (mismatch) بين إتجاه سرعة المائع بالنسبة للعجلة وزاوية الريشة. لتخطي هذه الصعوبة فإنَّ العجلات يمكن أن تكون قابلة للضبط أو أن تكون الريش ذات خطوة متغيرة ، بحيث يمكن تدويرها حول محاورها، وذلك لتغيير زاوية الهجوم لمقابلة المائع مماسياً. بهذه الترتيبة يمكن تحقيق طيف واسع من الكفاءات. توربينات سريان محوري بريش ذات خطوة متغيرة تعرف بتوربينات كابلان. تتراوح كفاءة توربينة كابلان بين 90% و 93% وتنتج قدرة حتى 85MW . مثلثات السرعة الموضحة في الشكل (1.1) عاليه، تكون مشابهة لتلك لمضخات السريان المحوري. تكون سرعة السريان محورية عند المدخل والمخرج وتظل متساوية. تكون سرعة التدويم مماسية، وسرعة الريشة عند المدخل والمخرج هي نفسها، ولكنها تتغير على إمتداد طول الريشة من الصرة إلى الطرف.

إذا كانت السرعة الزاوية للعجلة هي ω ، وسرعة الريشة عند نصف قطر r يُعطى بـ $u = r\omega$ ، وبما أنه لكفاءة قصوى $v_{w_2} = 0$ وبالتالي $v_2 = v_f$ يتبع ذلك، أنَّ الشغل المبذول في الثانية لكل وحدة وزن على العجلة ، أو سمت أولير :

$$E = u v_{w_1} / g$$

حيث أنه ومن مثلث سرعات الدحل $v_{w_1} = v_f \cot\theta$. بما أنَّ E يجب أن تكون نفسها عند طرف الريشة وعند الصرة وبما أنَّ u تكون أكبر عند الطرف من الصرة فسيُتبع ذلك أنَّ v_{w_1} يجب تخفيضها كلما تحرك المائع من الصرة إلى الطرف. وبما أنَّ سرعة السريان v_f يجب أن تظل ثابتة بطول الريشة بالتالي فإن $\cot\theta$ يجب تخفيضها في اتجاه طرف الريشة.

هكذا فإن θ يجب خفضها ونتيجة لذلك فإن الريشة يجب ليّها (twisted) بحيث تصنع زاوية أكبر مع المحور عند الطرف (tip) من تلك عند الصرة (hub).

الفصل الثاني

أمثلة محلولة في التوربينة الدفاعة وتوربينة كابلان باستخدام نظرية كمية الحركة

Solved Examples in Propeller and Kaplan Turbines Using Momentum Theorem

2.1 مثال (1): تحديد زاوية الريشة عند المدخل والكفاءة الهيدروليكية للتوربينة

يتم إمداد ماء لتوربينة ذات سريان محوري تحت سمت إجمالي مقداره 35m . يكون متوسط قطر العجلة 2m وتدور بسرعة 145rev/min . يغادر الماء ريش التوجيه بزاوية مقداره 30° في اتجاه دوران العجلة وعند نصف القطر المتوسط فإن زاوية ريشة العجلة عند المخرج تكون 28° . إذا تمَّ فقد 7% من السمت الإجمالي في الغلاف وريش التوجيه وتمَّ تخفيض السرعة النسبية بمقدار 8% نتيجة للاحتكاك في العجلة، حدِّد الآتي:

(i) زاوية الريشة عند المدخل (عند نصف قطر متوسط).

(ii) الكفاءة الهيدروليكية للتوربينة.

الحل:

الشكل (2.1) أدناه يوضِّح مخططات سرعات المدخل والمخرج لتوربينة سريان محوري.

$$H_{total} = 35m$$

$$D = 2m$$

$$N = 145 \text{ rev/min}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

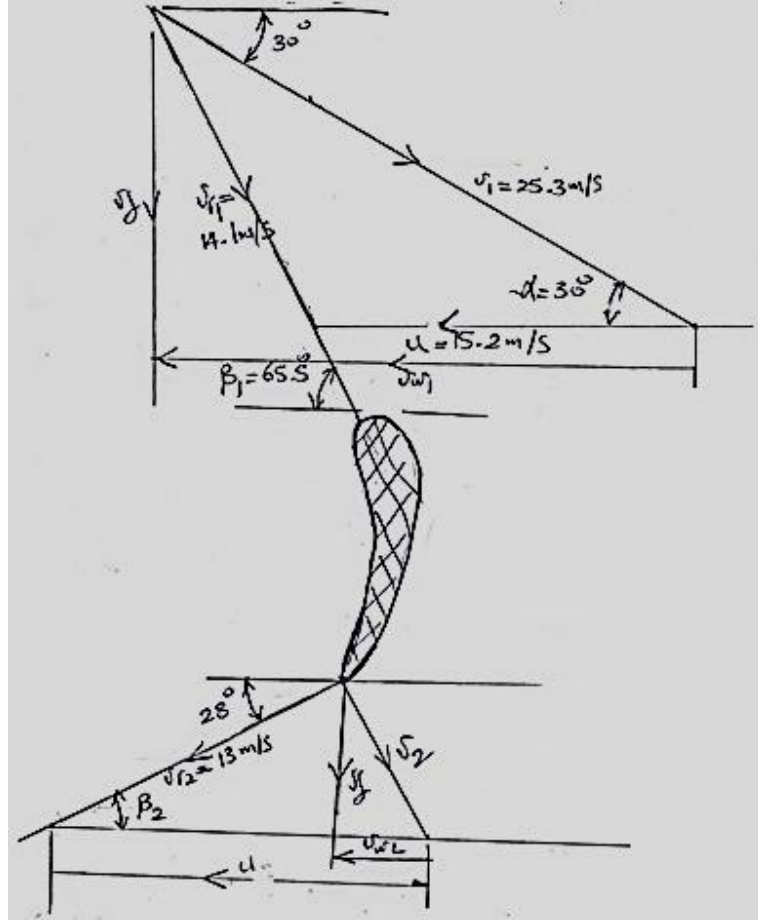
$$B_2 = 28^\circ , \quad R = D/2 \quad \text{عند نصف القطر المتوسط}$$

فقودات السمت في الغلاف وريش التوجيه،

$$hf = 0.07 \times H_{total} = 0.07 \times 35 = 2.45m$$

$$\therefore H_{net} = 35 - 2.45 = 32.55m \simeq 32.6m$$

$$v_{r2} = 0.92 v_{r1}$$



شكل (2.1) مخططات سرعات المدخل والمخرج لتوربينة سريان محوري

$$B_1 = ? \quad (i)$$

$$\eta_H = ? \quad (ii)$$

الحل:

$$v_1 = \sqrt{2gH_{net}} = \sqrt{2 \times 9.81 \times 32.6} = 25.27 \text{ m/s} \approx 25.27 \text{ m/s}$$

$$u = \frac{\pi DN}{60} = \frac{\pi \times 2 \times 145}{60} = 15.2 \text{ m/s}$$

عليه، من مثلث سرعات الدخول شكل (2.1) أعلاه، وباستخدام مقياس رسم مناسب:

$$v_{r1} = 14.1 \text{ m/s}$$

$$\beta_1 = 65.5^\circ, \quad v_{w1} = 21.2 \text{ m/s}$$

$$\eta_H = \frac{E}{H_2} = \frac{v_{w1}^2}{gH} \left(1 + \frac{\tan \theta}{\tan \beta_1} \right)$$

$$0.8 = \frac{v_{w_1}}{9.81 \times 12} \therefore v_{w_1} = u_1 = 9.7 \text{ m/s}$$

من مثلث السرعة عند المدخل، شكل (2.1) أعلاه:

$$\tan \theta = \frac{v_{f_1}}{u_1} = \frac{23}{9.7}, \quad \theta = 13.3^\circ$$

بما أن $u = r \omega$ و $r_2 = \frac{1}{2} r_1$

$$u_2 = \frac{1}{2} u_1 = 4.85 \text{ m/s}$$

من مثلث السرعة عند المخرج، شكل (2.1) أعلاه:

$$\tan \beta_2 = \frac{v_{f_2}}{u_2} = \frac{2.3}{4.85}, \therefore \beta_2 = 25.3^\circ$$

$$u_1 = 9.7 = r_1 \omega, \therefore r_1 = \frac{9.7}{\frac{2\pi \times 300}{60}} = 0.31 \text{ m}$$

$$Q = 0.28 = A_1 v_{f_1}$$

$$A_1 = 0.9\pi \times d_1 \times b_1$$

$$0.28 = 0.9\pi d_1 b_1 v_{f_1} \Rightarrow$$

$$b_1 = \frac{0.28}{0.9\pi \times 2 \times 0.31 \times 2.3} = 0.069 \text{ m}$$

وبالمثل b_2 :

$$0.28 = 0.9 \times \pi d_1 \times b_1 v_{f_1} \Rightarrow b_2 = 0.139 \text{ m}$$

2.2 مثال (2): تحديد زاويتي المدخل والمخرج للريشة عند الطرف وسرعة الدوران للماكينة

توربين كابلان ينتج قدرة مقدارها 11772 kw تحت سمت فعّال 20 m ، القطر الخارجي للدوّار 3.5 m

وقطر الصُرّة 1.75 m . زاوية ريش التوجيه عند المدخل 35° ، الكفاءة الهيدروليكية 89% والكفاءة الكلية

84% . لا يوجد تدويم عند المخرج، أوجد:

(أ) زاويتي المدخل والمخرج للريشة عند الطرف.

(ب) سرعة الدوران.

الحل:

$$p = 11772 \times 10^3 = \eta \rho g Q H$$

$$Q = \frac{11772 \times 10^3}{0.84 \times 9.81 \times 10^3 \times 20} = 71.4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_r^2 - D_b^2) v_{f_1} = 71.4$$

$$\therefore v_{f_1} = \frac{71.4 \times 4}{\pi (3.5^2 - 1.75^2)} = 9.9 \text{ m/s}$$

من مثلث السرعة عند الدخول:

$$\tan \alpha = \frac{v_{f_1}}{v_{w_1}} \Rightarrow v_{w_1} = 14.14 \text{ m/s}$$

$$\tan \beta_1 = \frac{v_{f_1}}{v_{w_1} - u_1} = \frac{9.9}{14.14 - 12.21} \Rightarrow \beta_1 = 78$$

$$\eta_H = \frac{u_1 v_{w_1}}{g H} \Rightarrow u_1 = 12.21 \text{ m/s}$$

من مثلث السرعة عند المخرج :

$$\tan \beta_2 = \frac{v_{f_2}}{u_2} = \frac{9.9}{12.21} \Rightarrow \beta_2 = 39$$

سرعة الدوران N ،

$$u_1 = u_2 = \frac{\pi D N}{60}$$

$$N = \frac{60 u_1}{\pi D_r} = \frac{60 \times 12.21}{\pi \times 3.5} = 66.6 \text{ rev/min}$$

2.3 مثال (3): إيجاد الكفاءة الهيدروليكية، مُعدّل التصريف خلال التوربين والقدرة المنتجة من

التوربين

قطر الدوّار في توربين دفاعة مروحية 4.5 m وسرعة الدوران 48 rev/min ، زاوية ريش التوجيه عند

المدخل 35° وزاوية ريش الدوّار عند المخرج 25° . مساحة السريان خلال الدوّار 30 m^2 . تكون ريش الدوّار

عند المدخل نصف قطرية، أوجد:

i. الكفاءة الهيدروليكية.

ii. مُعدّل التصريف خلال التوربين.

iii. القدرة الناتجة.

من مثلث السرعة عند المدخل:

$$\tan \alpha = \frac{v_f}{u} \quad , \quad \therefore v_f = u \tan \alpha$$

$$u = \frac{\pi DN}{60} = \frac{\pi \times 4.5 \times 48}{60} = 11.31 \text{ m/s}$$

$$\therefore v_f = u \tan \alpha = 11.31 \tan 35^\circ = 7.92 \text{ m/s}$$

من مثلث السرعة عند المخرج:

$$\tan \beta_2 = \frac{v_f}{u - v_{w_2}}$$

$$u - v_{w_2} = \frac{v_f}{\tan \beta_2} \quad , \quad \therefore -v_{w_2} = \frac{v_f}{\tan \beta_2} - u \quad , \quad \therefore v_{w_2} = u - \frac{v_f}{\tan \beta_2}$$

$$\therefore v_{w_2} = 11.31 - \frac{7.92}{\tan 54.5^\circ} = 5.66 \text{ m/s}$$

$$\therefore v_2 = \sqrt{v_f^2 + v_{w_2}^2} = \sqrt{7.92^2 + 5.66^2} = 9.73 \text{ m/s}$$

سمت اويلر ،

$$E = \frac{1}{g} (u v_{w_1} - u v_{w_2}) = \frac{u}{g} (v_{w_1} - v_{w_2})$$

$$= \frac{11.31}{9.81} [11.31 - 5.66] = 6.5 \text{ m}$$

$$H = E + \frac{v_2^2}{2g} = 6.5 + \frac{9.73^2}{2 \times 9.81} = 11.33 \text{ m}$$

$$\eta_H = \frac{E}{H} = \frac{6.5}{11.33} = 0.574 = 57.4\%$$

$$Q = A_f v_f = 30 \times 7.92 = 237.6 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_{0/P} = \rho g Q E = 10^3 \times 9.81 \times 237.6 \times 6.5 = 15.15 \times 10^6 \text{ W} = 15.15 \text{ Mw}$$

2.4 مثال (4): تحديد زوايا ريشة العجلة عند المدخل والمخرج وسرعة دوران التوربين

توربين كابلان يعمل تحت سم 25 m ويُؤَد قدرة عمود مقدارها 16000kw . القطر الخارجي للعجلة 4 m وقطر الصُرّة 2 m . زاوية ريشة التوجيه تساوي 35° . الكفاءات الهيدروليكية والاجمالية هما 90% و 85% على الترتيب.

إذا كانت سرعة التدويم صفرية عند المخرج، حدّد زوايا ريشة العجلة عند المدخل والمخرج وسرعة التوربين.

الحل:

معطى:

$$D_b = 2m, D_0 = 4m, H = 25m, \alpha = 35^\circ$$

$$\eta_0 = 0.85, \quad \eta_H = 0.9, \quad v_{w_2} = 0, \quad P_{0/P} = 16000 \text{ kw}$$

المطلوب:

$$N = ? , \quad \beta_2 = ? , \quad \beta_1 = ?$$

$$P_{0/P} = \eta_0 \rho g Q H$$

$$\therefore Q = \frac{P_{0/P}}{\eta_0 \rho g H} = \frac{16.000 \times 10^3}{0.85 \times 10^3 \times 9.81 \times 25} = 75.29 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\eta_o = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_b^2) \times v_{f_1}$$

$$\therefore v_{f_1} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_b^2)} = \frac{75.29}{\frac{\pi}{4} (4^2 - 2^2)} = 7.99 \text{ m/s}$$

من مثلث سرعات الدخّل:

$$\tan \alpha = \frac{v_{f_1}}{v_{w_1}}$$

$$\therefore v_{w_1} = \frac{v_{f_1}}{\tan \alpha} = \frac{7.99}{\tan 35^\circ} = 11.41 \text{ m/s}$$

من الكفاءة الهيدروليكية في المعادلة أدناه،

$$\eta_H = \frac{u_1 v_{w_1}}{g H}$$

$$\therefore u_1 = \frac{\eta_H g H}{v_{w_1}} = \frac{0.9 \times 9.81 \times 25}{11.41} = 19.345 \frac{m}{s}$$

$$\therefore \beta_1 = \tan^{-1} \left[\frac{v_{f_1}}{u_1 - v_{w_1}} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{7.99}{19.345 - 11.41} \right] = \tan^{-1} 1 = 45^\circ$$

لتوربين كابلان،

$$v_{f_1} = v_{f_2} = 7.99 m/s \quad , \quad u_1 = u_2 = 19.345 m/s$$

من مثلث سرعات الخرج،

$$\beta_2 = \tan^{-1} \frac{v_{f_2}}{u_2} = \tan^{-1} \frac{7.99}{19.345} = \tan^{-1} 0.413 = 22.44^\circ$$

$$u_1 = u_2 = \frac{\pi D_0 N}{60}$$

$$\therefore N = \frac{60 u_1}{\pi D_0} = \frac{60 \times 19.345}{\pi \times 4} = 92.37 \text{ rev/min}$$

2.5 مثال (5): إيجاد مُعدّل التصريف الحجمي، الكفاءة الهيدروليكية، زاوية الريشة عند

الطرف البعيد للعجلة وزاوية مخرج عجلة التوجيه

توربين كابلان يعمل تحت سمّت 22 m ويدور بسرعة 150 rev/min . أقطار العجلة والصُرّة هما

4.5 m و 2 m على الترتيب. نسبة السريان هي 0.43 . زاوية مدخل الريشة عند الطرف البعيد هي

$163^\circ 19'$ اذا كان تصريف التوربين نصف قطرياً عند المخرج، حدّد التصريف، الكفاءة الهيدروليكية، زاوية

ريشة التوجيه عند الطرف البعيد للعجلة وزاوية مخرج الريشة عند الطرف البعيد للعجلة.

الحل:

الشكل (2.2) أدناه يوضّح مثلث سرعات المدخل والمخرج لتوربين كابلان.

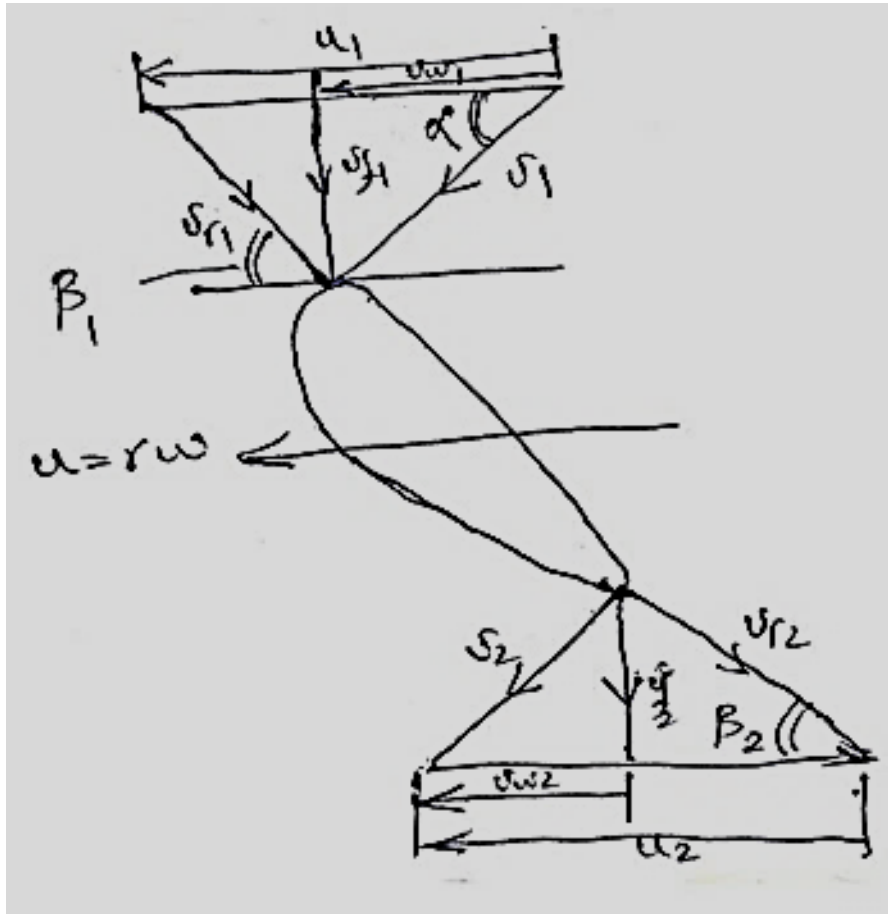
معطى:

$$\beta_1 = 163^\circ 19' , D_b = 2 \text{ m} , D_0 = 4.5 \text{ m} , N = 150 \text{ rev/min} , H = 22 \text{ m}$$

$$\therefore v_2 = v_{f_2} = v_{f_1} , \quad v_{w_2} = 0 , \quad \frac{v_{f_1}}{v_1} = 0.43$$

المطلوب:

$$\beta_1 = ?, \quad \alpha = ?, \quad \eta_H = ?, \quad Q = ?$$



شكل (2.2) مثلث سرعات المدخل والمخرج لتوربين كابلان

$$u_1 = u_2 = \frac{\pi D_0 N}{60} = \frac{\pi \times 4.5 \times 150}{60} = 35.34 \text{ m/s}$$

$$v_{f1} = 0.43v_1 = 0.43\sqrt{2gH} = 0.43\sqrt{2 \times 9.81 \times 22} = 8.934 \text{ m/s}$$

$$Q = A_f v_f = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_b^2) v_f = \frac{\pi}{4} (4.5^2 - 2^2) \times 8.934 = 114 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\tan(180 - \beta_1) = \frac{v_{f1}}{u - v_{w1}}$$

$$\tan(180^\circ - 163.317^\circ) = \frac{8.934}{35.34 - v_{w1}}$$

$$35.34 - v_{w1} = \frac{8.934}{\tan 16.683}$$

$$\therefore -v_{w1} = \frac{8.934}{\tan 16.683} - 35.34$$

$$\therefore v_{w_1} = 35.34 - \frac{8.934}{\tan 16.683} = 35.34 - 29.81 = 5.53 \text{ m/s}$$

تُعطى الكفاءة الهيدروليكية بـ ،

$$\eta_H = \frac{u_1 v_{w_1}}{g H} = \frac{35.34 \times 5.53}{9.81 \times 22} = 0.906 = 90.6\%$$

$$\tan \alpha = \frac{v_{f_1}}{v_{w_1}} = \frac{8.934}{5.53} = 1.616$$

$$\therefore \alpha = \tan^{-1} 1.616 = 58.25^\circ$$

من مثلث سرعات الخرج،

$$\beta = \tan^{-1} \frac{v_{f_2}}{u_2} = \tan^{-1} \frac{8.934}{35.34} = 14.2^\circ$$

2.6 مثال (6): إيجاد قطر العجلة، سرعة العجلة وسرعات العجلة النوعية البعدية واللابعدية

توربين كابلان يُراد تصميمه لتوليد قدرة مقدارها 7350 kw . صافي السممت المتاح يساوي 5.5 m . افترض

أن نسبة سرعة السريان هي 0.68 ونسبة السرعة المماسية للعجلة هي 2.2 ، الكفاءة الاجمالية 60% ، وقطر

الصُرّة يُمثّل $\frac{1}{3}$ قطر العجلة. أوجد قطر العجلة، سرعتها وسرعتها النوعية البعدية وسرعتها النوعية اللابعدية.

الحل:

معطى:

$$\eta_0 = 60\% , \quad \frac{v_{f_1}}{v_1} = 0.68 , \quad H = 5.5 \text{ m} , \quad P_{0/P} = 7350 \text{ kw}$$

$$\frac{u_1}{v_1} = 2.2 , \quad D_b = \frac{D_0}{3}$$

المطلوب : $D_0 = ? , N = ? , N_s = ? , n_s = ?$

$$\frac{v_{f_1}}{\sqrt{2gH}} = 0.68 , \text{ وبالتالي } v_{f_1} = 0.68 \sqrt{2 \times 9.81 \times 5.5} = 7.064 \text{ m/s}$$

$$\frac{u_1}{\sqrt{2gH}} = 2.2 , \text{ وبالتالي } u_1 = 2.2 \sqrt{2 \times 9.81 \times 5.5} = 22.854 \text{ m/s}$$

$$P_{0/P} = \eta_0 \rho g Q H = 0.6 \times 10^3 \times 9.81 \times Q \times 5.5 = 7350 \times 10^3$$

أيضاً يتم التعبير عن Q كالآتي:

$$\therefore Q = \frac{7350 \times 10^3}{0.6 \times 10^3 \times 9.81 \times 5.5} = 227 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_b^2) v_{f_1}$$

$$D_0^2 - D_b^2 = \frac{4Q}{\pi v_{f_1}}$$

$$D_0^2 - \left[\frac{D_0}{3}\right]^2 = \frac{4Q}{\pi v_{f_1}}$$

$$D_0^2 - \frac{D_0^2}{9} = \frac{4Q}{\pi}, \therefore \frac{8}{9} D_0^2 = \frac{4Q}{\pi}, D_0 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_f} \times \frac{9}{8}}$$

$$\therefore D_0 = \sqrt{\frac{4 \times 227 \times 9}{\pi \times 8 \times 7.064}} = 6.78 \text{ m}$$

$$u = \frac{\pi D_0 N}{60}$$

$$\therefore N = \frac{60u}{\pi D_0} = \frac{60 \times 22.854}{\pi \times 6.78} = 64.38 \text{ rev/min}$$

$$N_s = \frac{NP^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} = \frac{64.38 \times (7350)^{\frac{1}{2}}}{(5.5)^{\frac{5}{4}}} = \frac{64.38 \times 85.73}{8.423}$$

$$= 655.27$$

$$n_s = \frac{N (P/\rho)^{\frac{1}{2}}}{(gH)^{\frac{5}{4}}} = \frac{64.38 \left(\frac{7350}{1000}\right)^{\frac{1}{2}}}{(9.81 \times 5.5)^{\frac{5}{4}}} = \frac{64.38 \times 2.711}{146.231}$$

$$= 1.1936$$

2.7 مثال (7): تحديد قطر العجلة والسرعة الدوّارة للتوربين

البيانات التالية مرتبطة بعجلة توربين كابلان الذي ينتج قدرة مقدارها 8850 kw عند عمود التوربين:

صافي السممت المتاح = 5.5 m

نسبة السرعة المحيطية الى السرعة المطلقة = 2.1

نسبة سرعة السريان الى السرعة المطلقة = 0.67

الكفاءة الاجمالية = 85%

افتراض أن قطر الصُرّة يُمثّل 35% من القطر الخارجي، أحسب قطر العجلة وسرعتها الدوّارة.

الحل:

معطى:

$$\frac{v_{f1}}{v_1} = 0.67 , \quad \frac{u}{v_1} = 2.1 , \quad H = 5.5 \text{ m} , \quad P_{0/P} = 88850 \text{ kw}$$
$$D_h = 0.35 D_0 , \quad \eta_o = 0.85$$

السرعة المحيطية،

$$u = 2.1 v_1 = 2.1 \sqrt{2gH} = 2.1 \sqrt{2 \times 9.81 \times 5.5} = 21.81 \text{ m/s}$$

سرعة السريان،

$$v_f = 0.67 v_1 = 0.67 \sqrt{2gH} = 0.67 \sqrt{2 \times 9.81 \times 5.5} = 6.96 \text{ m/s}$$

قدرة الخرج = القدرة المتاحة عند العمود،

$$P_{0/P} = \eta_o \rho g Q H$$

مُعَدِّل السريان الحجمي،

$$Q = \frac{P_{0/P}}{\eta_o \rho g H} = \frac{8850 \times 10^3}{0.85 \times 10^3 \times 9.81 \times 5.5} = 193 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

يتم اعطاء التصريف خلال التوربين بـ :

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_h^2) \times v_f$$

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - (0.35 D_0)^2) \times 6.96$$

$$Q = \frac{\pi}{4} (0.8775 D_0^2) \times 6.96 = 193$$

$$\therefore D_0 = 6.343 \text{ m}$$

سرعة العجلة أو الدوّار،

$$N = \frac{60 u}{\pi D_0} = \frac{60 \times 21.81}{\pi \times 6.343} = 65.67 \text{ rev/min}$$

2.8 مثال (8): تحديد صافي السمات المتاح للتوربين، القدرة المنتجة والسرعة النوعية

لتوربين كابلان بقطر دوار مقداره 4 m ، يكون التصريف مساوياً لـ $60 \text{ m}^3/\text{s}$ والكفاءات الهيدروليكية والميكانيكية مقاديرهما 90% و 94% على الترتيب. قطر الصرّة يُمثّل ثلث قطر الدوار ونسبة السرعة المحيطية إلى السرعة المطلقة هي 2 . بافتراض تصريف حر وأنه ليس هنالك تدويم عند المخرج، أحسب صافي السمات المتاح للتوربين، القدرة المنتجة والسرعة النوعية.

الحل:

معطى:

$$\eta_m = 0.94 , \eta_H = 0.9 , Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}, D = 4 \text{ m}$$

$$\frac{u}{v_1} = 2 , \quad D_b = \frac{1}{3} D_0 = \frac{4}{3} \text{ m}$$

ليس هنالك تدويم عند المخرج،

$$\therefore v_2 = v_{f_2} , \quad v_{w_2} = 0$$

المطلوب : $N_s = ? , P_{0/P} = ? , H = ?$

يتم اعطاء التصريف Q خلال التوربينة ب :

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_b^2) \times v_f$$

$$v_f = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_n^2)} = \frac{60}{\frac{\pi}{4} \left(4^2 - \left(\frac{4}{3} \right)^2 \right)} = \frac{60}{11.17} = 5.37 \text{ m/s}$$

أجعل H هو صافي السمات المتاح لتوربين كابلان، بالتالي:

$$E = H - \frac{v_2^2}{2g} = H_g = \eta_H \times H$$

$$H - \frac{v_2^2}{2g} = 0.9 H$$

$$0.1 H = \frac{v_2^2}{2g} \quad (1)$$

في حالة عدم وجود تدويم عند المخرج، $v_2 = v_{f_2} = 5.37 \text{ m/s}$ ، وبتعويض قيمة v_2 في المعادلة (1) نحصل على:

$$0.1 H = \frac{5.37^2}{2 \times 9.81}$$

$$\therefore H = \frac{5.37^2}{2 \times 9.81 \times 0.1} = 14.7 \text{ m}$$

القدرة المتاحة عند العمود،

$$P_{0/P} = \eta_0 \rho g Q H$$

الكفاءة الاجمالية،

$$\eta_0 = \eta_H \times \eta_m = 0.9 \times 0.94 = 0.846$$

$$\therefore P_{0/P} = 0.846 \times 10^3 \times 9.81 \times 60 \times 14.7 = 7320 \text{ kw}$$

السرعة المحيطية،

$$u = \frac{\pi D_0 N}{60} = 2v_1 = 2\sqrt{2gH}$$

$$\therefore N = \frac{60 \times 2 \times \sqrt{2gH}}{\pi D_0} = \frac{120\sqrt{2 \times 9.81 \times 14.7}}{\pi \times 4} = 162.2 \text{ rev/min}$$

$$N_s = \frac{N\sqrt{p(kw)}}{H^{\frac{5}{4}}} = \frac{162.2\sqrt{7320}}{(14.7)^{\frac{5}{4}}} = \frac{162.2 \times 85.557}{28.784} = 482 \text{ rev/min}$$

2.9 مثال (9): تحديد كفاءة التوربين

توربين كابلان يقوم بتوليد قدرة مقدارها 3250 kw تحت سمت مقدارها 6 m ، له أنبوب سحب بقطر مدخل مقدارها 2.8 m يتم وضعه على بعد 1.5 m فوق المُسَرَّب السفلي. إذا كان المقياس الفراغي (*vacuum gauge*) الموصَّل الى مدخل أنبوب السحب يقرأ 5 m من الماء، حدّد كفاءة التوربين. افترض كفاءة مقدارها 76% لأنبوب السحب وضغط جوي مقدارها 10.3 m من الماء.

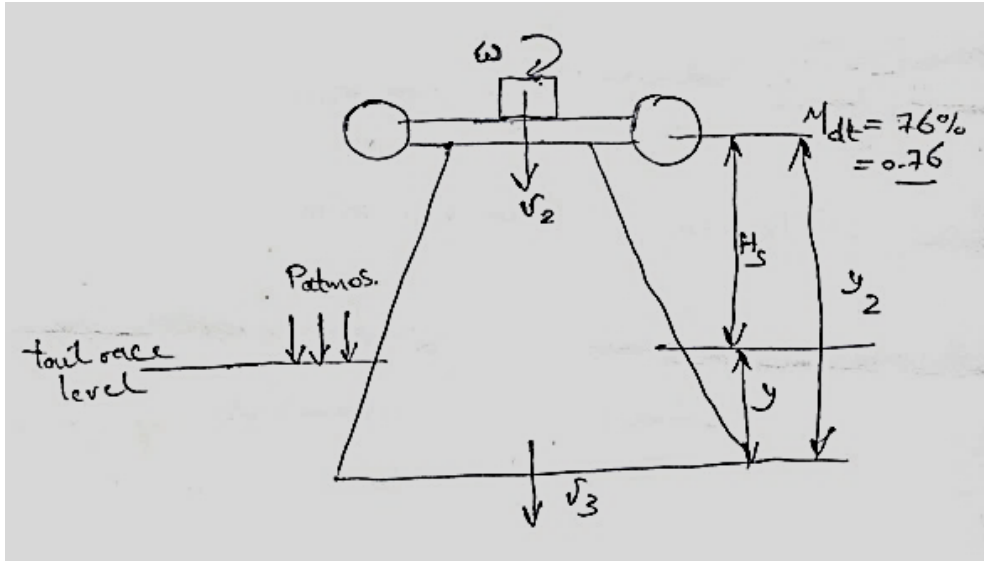
الحل:

معطى:

ضغط مدخل أنبوب السحب = 5 m ، أو (ضغط مطلق) $\frac{P_2}{\rho g} = 10.3 - 5 = 5.3$ ،

$H_s = 1.5 \text{ m}$ ، $D = 2.8 \text{ m}$ ، $H = 6 \text{ m}$ ، $P_{0/P} = 3250 \text{ kW}$

الشكل (2.3) أدناه يوضح توربين لكابلان مركب عليه أنبوب سحب.



شكل (2.3) توربين كابلان مركب عليه أنبوب سحب

الطاقة عند مخرج أنبوب السحب = الطاقة عند مخرج الدوار أو عند مدخل أنبوب السحب .

$$\frac{p_2}{\rho g} = \frac{P_{atmos}}{\rho g} - H_s - \left[\frac{(v_2^2 - v_3^2)}{2g} - H_f \right]$$

بتجاهل فقد الاحتكاك H_f في أنبوب السحب ، $H_f = 0$

$$\frac{p_2}{\rho g} = \frac{P_{atmos}}{\rho g} - H_s - \left[\frac{(v_2^2 - v_3^2)}{2g} - H_f \right] ;$$

$$5.3 = 10.3 - 1.5 - \left[\frac{(v_2^2 - v_3^2)}{2g} \right]$$

$$\therefore \left[\frac{(v_2^2 - v_3^2)}{2g} \right] = 10.3 - 1.5 - 5.3 = 3.5 \text{ m}$$

كفاءة أنبوب السحب تُعطى بـ :

$$\eta_{dt} = \frac{(v_2^2 - v_3^2)/2g}{v_2^2/2g}$$

$$0.76 = \frac{3.5}{v_2^2/2 \times 9.81}, 0.76 = \frac{3.5 \times 2 \times 9.81}{v_2^2}$$

$$\therefore v_2 = \sqrt{\frac{3.5 \times 2 \times 9.81}{0.76}} = 9.51 \text{ m/s}$$

التصريف خلال التوربين،

$$Q = \frac{\pi}{4} \times 2.8^2 \times 9.51 = 58.558 \text{ m}^3/\text{s}$$

القدرة المتاحة عند عمود التوربين،

$$P_{0/P} = \eta_0 \rho g Q H$$

$$\eta_0 = \frac{P_{0/P}}{\rho g Q H} = \frac{3250 \times 10^3}{10^3 \times 9.81 \times 58.558 \times 6} = 0.943 = 94.3\%$$

2.10 مثال (10): حساب الارتفاع الأقصى للعجلة من منسوب المُسرَّب السفلي

توربين كابلان يُؤَلد قدرة مقدارها 2250 kw تحت صافي سمت مقداره 5.5 m وبكفاءة اجمالية مقدارها 87% .
 لأنبوب السحب قطر مقداره 2.8 m عند مدخله وكفاءة مقدارها 78% . لتفادي التكهف يجب أن لا يهبط
 سمت الضغط عند مدخل أنبوب السحب أكثر من 4.5 m أسفل الضغط الجوي. أحسب الارتفاع الأقصى
 للعجلة من منسوب المُسرَّب السفلي.

الحل:

معطى:

$$D_1 = 2.8 \text{ m}, \quad \eta_0 = 87\%, \quad H = 5.5 \text{ m}, \quad P_{0/P} = 2250 \text{ kw}$$

$$\frac{P_{atmos} - p_2}{\rho g} = 4.5, \quad \eta_{dt} = 78\%$$

أوجد $H_2 = ?$

القدرة المتاحة عند عمود التوربين، $P_{0/P}$

$$P_{0/P} = \eta_0 \rho g Q H$$

مُعَدِّل السريان، Q

$$Q = \frac{P_{0/P}}{\eta_0 \rho g H} = \frac{2250 \times 10^3}{0.87 \times 10^3 \times 9.81 \times 5.5} = 47.93 \text{ m}^3/\text{s}$$

من معادلة استمرارية السريان (continuity equation)،

$$v_2 = \frac{Q}{A} = \frac{47.93}{\frac{\pi}{4} (2.8)^2} = 7.79 \text{ m/s}$$

$$\frac{p_2}{\rho g} = \frac{P_{atmos}}{\rho g} - H_s - \left[\frac{(v_2^2 - v_3^2)}{2g} - h_f \right]$$

$$\left[\frac{(v_2^2 - v_3^2)}{2g} - h_f \right] = \left[\frac{P_{atmos} - p_2}{\rho g} \right] - H_s$$

$$\frac{(v_2^2 - v_3^2)}{2g} - h_f = 4.5 - H_s$$

كفاءة أنبوب السحب تُعطى بـ :

$$\eta_{dt} = \frac{\frac{(v_2^2 - v_3^2)}{2g} - h_f}{\frac{v_2^2}{2g}} = \frac{4.5 - H_s}{(7.79)^2/2 \times 9.81} = 0.78$$

$$\Rightarrow H_s = 2.1 \text{ m}$$

أنبوب السحب:

الشكل (2.4) أدناه يوضح توربيناً لكابلان مركَّب عليه أنبوب سحب.

الطاقة عند مخرج أنبوب السحب = الطاقة عند مخرج العجلة (الدوَّار) أو عند مدخل أنبوب السحب

$$\frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + y_2 = \frac{p_3}{\rho g} + \frac{v_3^2}{2g} + 0 + h_f \quad (1)$$

ولكنَّ،

$$\frac{p_3}{\rho g} = \frac{P_{atmos}}{\rho g} + y \quad (2)$$

مقدارها 120rev/min . استخدم البيانات الموضّحة أدناه لحساب السرعة النوعية للتوربين ومن بعد قم باختيار نوع التوربين المناسب.

بيانات:

نوع التوربين	مدى السرعة النوعية
	$N_S = \frac{N p^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}}$
فرانسييس	70 – 500
دقّاع	600 – 900
كابلان	350 – 1000
متعاكس السريان	20 – 90
تيرغو	20 – 80
بلتون بنفث واحد	10 – 35
بلتون بنفثين	10 – 45

الحل:

$$N_S = \frac{N p^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} = \frac{120 \times (15000)^{0.5}}{18^{1.25}} = 396.4$$

بالتالي يمكن استخدام توربين فرانسيس أو كابلان.

2.12 مثال (12): حساب السرعة النوعية، كفاءة التوربين، نسبة السرعة ونسبة السريان

توربين كابلان يطوّر قدرة مقدارها 3000kw تحت سمت مقداره 10m وسرعة دوران مقدارها

62.5 rev/min . يكون التصريف مساوياً لـ 350 m/s . قطر طرف الدوّار 7.5 m ونسبة قطر الصُرّة

إلى الطرف 0.43 . أحسب السرعة النوعية، كفاءة التوربين، نسبة السرعة ونسبة السريان.

الحل:

تكون نسبة السرعة مؤسسة على سرعة طرف الريشة للدوّار

قطر الصّرة (diameter of hub)

$$D_h = 0.43D_t = 0.43 \times 7.5 = 3.225 \text{ m}$$

كفاءة التوربين (turbine efficiency)

$$\eta = \frac{p}{\rho g Q H} = \frac{30000 \times 10^3}{10^3 \times 9.81 \times 350 \times 10} = 0.8737 = 87.37\%$$

السرعة النوعية (specific speed)

$$N_s = \frac{N p^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} = \frac{62.5 \times (30000)^{\frac{1}{2}}}{10^{\frac{5}{4}}} = 608.75$$

$$n_s = \frac{N \left(\frac{p}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}}{(g H)^{\frac{5}{4}}} = \frac{\frac{62.5}{60} \left(\frac{30000}{1000}\right)^{\frac{1}{2}}}{(9.81 \times 10)^{\frac{5}{4}}} = 0.0193$$

سرعة طرف الدوّار (tip of the rotor speed)

$$u_t = \frac{\pi D_t N}{60} = \frac{\pi \times 7.5 \times 62.5}{60} = 24.54 \text{ m/s}$$

نسبة السرعة (speed ratio)

$$= \frac{u_t}{\sqrt{2gH}} = \frac{24.54}{\sqrt{2 \times 9.81 \times 10}} = 1.752$$

سرعة السريان (flow speed)

$$v_f = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}(D_t^2 - D_h^2)} = \frac{350}{\frac{\pi}{4}(7.5^2 - 3.225^2)} = 9.72 \text{ m/s}$$

نسبة السريان (flow ratio)

$$= \frac{v_f}{\sqrt{2gH}} = \frac{9.72}{\sqrt{2 \times 9.81 \times 10}} = 0.69$$

2.13 مثال (13): حساب زوايا الريشة عند الصّرة والطرف وعند أيّ قطر

توربين كابلان يُؤَلد قدرة مقدارها 40 mw ويعمل تحت سمت مقداره 35 m ، ويدور بسرعة 167 rev/min . يكون قطر الصُرّة مساوياً لـ 2.5 m وقطر طرف الدوّار مساوياً لـ 5 m . الكفاءة الاجمالية 87% . أحسب زوايا الريشة عند الصُرّة والطرف وأيضاً عند قطر مقداره 3.75 m . أوجد أيضاً نسبة السرعة ونسبة السريان المؤسستان على سرعة طرف الريشة. افترض $\eta_H = 90\%$.

الحل:

$$N = 167 \text{ rev/min} , \quad H = 35 \text{ m} , P_{0/P} = 40 \text{ mw}$$

$$\eta_0 = 87\% , \quad D_t = 5 \text{ m} , D_h = 2.5 \text{ m}$$

$$\beta_1 = ? , \quad \beta_2 = ?$$

عند الصُرّة وعند الطرف وعند قطر مقداره 3.75 m

مُعَدّل السريان (rate of flow)

$$Q = \frac{P_{0/P}}{\eta_0 \rho g H} = \frac{40 \times 10^6}{0.87 \times 10^3 \times 9.81 \times 35} = 133.9 \text{ m}^3/\text{s}$$

بافتراض عدم وجود اعتراض للسريان من قبل الريش ،

$$Q = A_f v_f , \quad k = 1 \text{ عامل مساحة الريشة}$$

$$v_f = \frac{Q}{A_f} = \frac{133.9}{\frac{\pi}{4} (5^2 - 2.5^2)} = 9.09 \text{ m/s}$$

سرعة طرف الريشة (speed of blade tip)

$$u_t = \frac{\pi D_t N}{60} = \frac{\pi \times 5 \times 167}{60} = 43.72 \text{ m/s}$$

سرعة الصُرّة (speed of hub)

$$u_h = \frac{\pi D_h N}{60} = \frac{\pi \times 2.5 \times 167}{60} = 21.86 \text{ m/s}$$

السرعة عند قطر متوسط مقداره 3.75 m ،

$$u_m = \frac{\pi D_m N}{60} = \frac{\pi \times 3.75 \times 167}{60} = 32.79 \text{ m/s}$$

$$\eta_H = \frac{u_1 v_{w_1}}{g H}$$

$$u_1 v_{w_1} = \eta_H g H = 0.9 \times 9.81 \times 35 = 309 \text{ m}^2/\text{s}^2 = \text{constant}$$

عند الطرف، v_{w_1} ،

$$= \frac{309}{43.72} = 7.07 \text{ m/s} , v_{w_1} = \frac{309}{u_t}$$

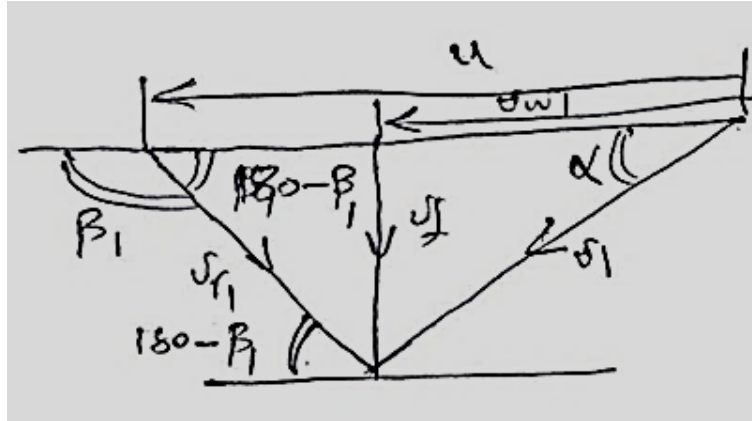
عند الصُرّة، v_{w_1} ،

$$= \frac{309}{21.86} = 14.14 \text{ m/s} , v_{w_1} = \frac{309}{u_h}$$

عند المنتصف، v_{w_1} ،

$$= \frac{309}{32.79} = 9.42 \text{ m/s} , v_{w_1} = \frac{309}{u_m}$$

في كُلِّ الحالات $u > v_w$. عليه فإنَّ مخطط السرعات للدخل يظهر كما هو موضَّح في الشكل (2.5) أدناه.



شكل (2.5) مخطط سرعات الدخل لتوربين كابلان عند $u > v_w$

$$\tan \beta_1 = \frac{v_f}{u - v_{w_1}}$$

عند الطرف،

$$\tan(180 - \beta_1) = \frac{9.09}{43.72 - 7.07} \therefore \beta_1 = 180^\circ - 13.92^\circ = 166.08^\circ$$

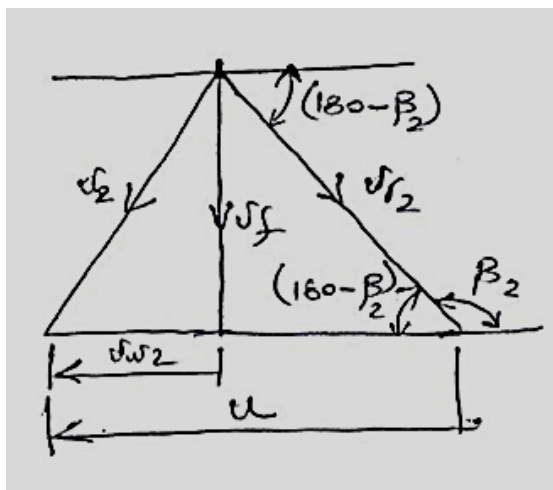
عند قطر متوسط،

$$\tan(180 - \beta_1) = \frac{9.09}{32.79 - 9.42} \therefore \beta_1 = 180 - 21.25 = 158.75^\circ$$

عند الصُّرَّة،

$$\tan(180 - \beta_1) = \frac{9.09}{21.86 - 14.14} \therefore \beta_1 = 180 - 49.66 = 130.34^\circ$$

نفس الشيء بالنسبة لمخطط سرعات الخرج كما موضَّح في الشكل (2.6) أدناه:



شكل (2.6) مخطط سرعات الخرج لتوربين كابلان عندما $u > v_w$

عندما يكون الخروج نصف قطرياً،

$$v_{w2} = 0$$

$$\therefore v_2 = v_f$$

عند الطرف،

$$\tan(180 - \beta_2) = \frac{v_f}{u} = \frac{9.09}{43.72}$$

$$\therefore \beta_2 = (180 - 11.57)^\circ$$

عند متوسط القطر،

$$\tan(180 - \beta_2) = \frac{9.09}{32.79}$$

$$\therefore \beta_2 = (180 - 15.5)^\circ$$

عند الصُّرَّة،

$$\tan(180 - \beta_2) = \frac{9.09}{21.86}$$

$$\therefore \beta_2 = (180 - 22.6)^\circ$$

عند طرف الريشة،

$$\text{نسبة السرعة} = \frac{u}{\sqrt{2gH}} = \frac{43.72}{\sqrt{2 \times 9.81 \times 35}} = 1.67$$

$$\text{نسبة السريان} = \frac{v_f}{\sqrt{2gH}} = \frac{9.09}{\sqrt{2 \times 9.81 \times 35}} = 0.35$$

السرعة النوعية، N_s

$$N_s = \frac{N p^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} = \frac{167 \sqrt{40 \times 10^3}}{35^{\frac{5}{4}}} = 392.34$$

السرعة النوعية اللابعدية، n_s

$$n_s = \frac{N(p/\rho)^{\frac{1}{2}}}{(gH)^{\frac{5}{4}}} = \frac{\frac{167}{60} (40000 \times 10^3)^{\frac{1}{2}}}{(9.81 \times 35)^{\frac{5}{4}}} = 0.012$$

2.14 مثال (14): تحديد السمات وزاوية الريشة عند منتصف نصف القطر

توربين كابلان يُولد قدرة مقدارها 30Mw ويدور بسرعة 175 rev/min . الكفاءة الاجمالية هي 85%

والكفاءة الهيدروليكية هي 91% . قطر الطرف 5 m وقطر الصُرّة 2 m . حدّد السمات، وزوايا الريشة عند

منتصف نصف القطر . مُعدّل السريان هو 140 m³/s .

الحل:

$$P_{0/P} = \eta_0 \rho g Q H$$

$$\therefore H = \frac{P_{0/P}}{\eta_0 \rho g Q} = \frac{30 \times 10^6}{0.85 \times 10^3 \times 9.81 \times 140} = 25.7 \text{ m}$$

$$\eta_H \times \text{القدرة المتاحة من المائع} = \text{القدرة المؤلدة}$$

عند منتصف نصف القطر، القدرة المؤلدة ،

$$= \frac{30 \times 10^6}{0.85} \times 0.93 = 32.82 \text{ Mw}$$

$$u = \frac{\pi D_m N}{60} = \frac{\pi \times 3.5 \times 175}{60} = 32.07 \text{ m/s}$$

$$\dot{m} u_1 v_{w_1} = 32.82 \times 10^6$$

$$\rho Q u_1 v_{w_1} = 32.82 \times 10^6$$

$$10^3 \times 140 \times 32.07 v_{w_1} = 32.82 \times 10^6$$

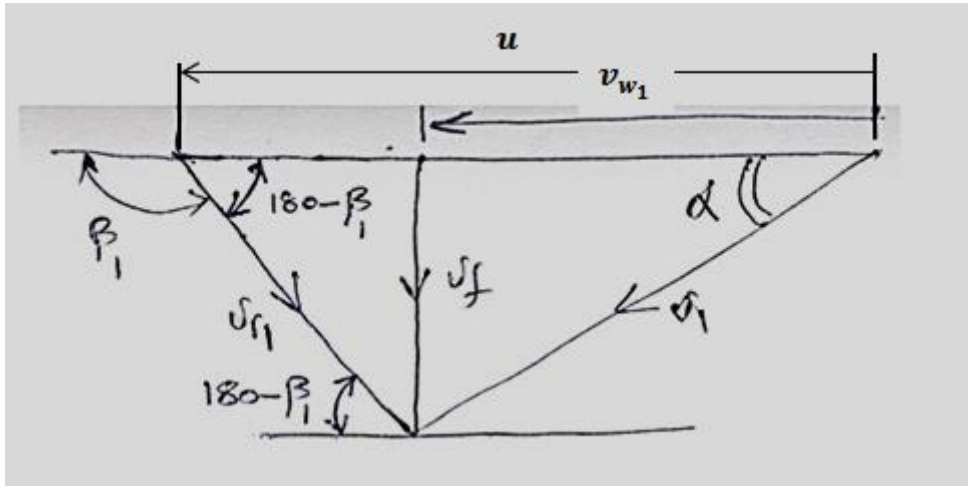
$$\therefore v_{w_1} = 7.14 \text{ m/s}$$

(note : $u_1 v_{w_1} = \text{constant at all radii}$)

$$v_f = \frac{Q}{A_f} = \frac{140}{\frac{\pi}{4}(5^2 - 2^2)} = 8.5 \text{ m/s}$$

$$v_{w_1} < u$$

∴ مخطط السرعة يعطي كما موضَّح في الشكل (2.7) أدناه.



شكل (2.7) مخطط لتوربين كابلان

$$\tan(180 - \beta_1) = \frac{v_f}{u_1 - v_{w_1}} = \frac{8.5}{32.07 - 7.14}$$

$$\therefore 180 - \beta_1 = 18.82^\circ$$

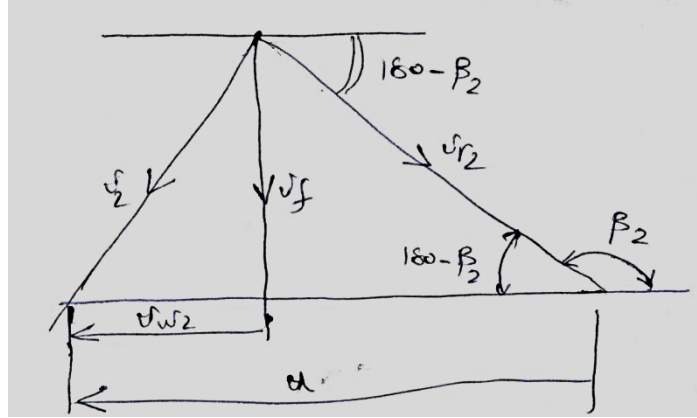
18.82° باتجاهه سالب لـ u ، 161.18° باتجاه موجب لـ u . يكون مثلث الخرج قائم الزاوية باعتبار $v_{w_2} = 0$

كما هو واضح في الشكل (2.8) أدناه.

$$\tan(180 - \beta_2) = \frac{v_f}{u} = \frac{8.5}{32.07} \therefore \beta_2 = 14.8^\circ$$

14.8° باتجاه سالب مع u و 165.2° باتجاه موجب مع u

$$\tan \alpha = \frac{v_f}{v_{w1}} \quad \therefore \alpha = \tan^{-1} \frac{8.5}{7.14} = 50^\circ$$



شكل (2.8) مخطط سرعات الخرج لتوربين كابلان

2.15 مثال (15): تحديد القدرة والسرعة النوعية البعدية واللابعدية لتوربين كابلان

توربين كابلان تحت سمت مقداره 26.5 m ، يكون مُعدّل سريان الماء مساو لـ $170 \text{ m}^3/\text{s}$. الكفاءة الاجمالية 90% . حدّد القدرة والسرعة النوعية البعدية واللابعدية. سرعة التوربين هي 150 rev/min .

الحل:

$$P_{0/P} = \eta_0 \rho g Q H$$

$$= 0.9 \times 10^3 \times 9.81 \times 170 \times 26.5 = 39.77 \times 10^6 \text{ w} = 39.77 \text{ MW}$$

السرعة النوعية البعدية، N_s ،

$$N_s = \frac{N p^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} = \frac{150 \sqrt{39.77 \times 10^3}}{(26.5)^{\frac{5}{4}}} = 497.5$$

السرعة النوعية اللابعدية، n_s ،

$$n_s = \frac{N (p/\rho)^{\frac{1}{2}}}{(g H)^{\frac{5}{4}}} = \frac{150 \left[\frac{39.77 \times 10^3}{10^3} \right]^{\frac{1}{2}}}{(9.81 \times 26.5)^{\frac{5}{4}}} = 0.0151 \text{ rev}$$

2.16 مثال (16): تحديد السرعة لتوربين كابلان

يتم اقتراح تركيب توربين كابلان في موقع مُعَيَّن بقدرة مقدارها 30 Mw وبكفاءة اجمالية مقدارها 0.89 .
 سمت المتاح 42 m . حدّد السرعة اذا كان قطر الصُّرّة إلى قطر الطرف يساوي 0.5 ونسبتا السريان والسرعة
 هما 0.5 و 1.8 .

الحل:

$$H = 42\text{ m} , \quad \eta_0 = 0.89 , \quad P_{0/P} = 30 \times 10^6\text{ W}$$

$$\frac{u}{\sqrt{2gH}} = 1.8 , \quad \frac{v_f}{\sqrt{2gH}} = 0.5 , \quad \frac{D_h}{D_t} = 0.5 , \quad N = ?$$

مُعَدِّل السريان،

$$Q = \frac{P_{0/P}}{\eta_0 \rho g H} = \frac{30 \times 10^6}{0.89 \times 10^3 \times 9.81 \times 42} = 81.81\text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{نسبة السريان} = \frac{v_f}{\sqrt{2gH}} = 0.5$$

$$\therefore v_f = 0.5\sqrt{2 \times 9.81 \times 42} = 14.35\text{ m/s}$$

$$Q = A_f v_f = \frac{\pi}{4} (D_t^2 - D_h^2) v_f$$

$$D_h = 0.5 D_t$$

$$\therefore Q = \frac{\pi}{4} (D_t^2 - (0.5 D_t)^2) v_f = \frac{\pi}{4} \times 0.75 D_t^2 v_f$$

$$D_t = \sqrt{\frac{4 Q}{\pi \times 0.75 v_f}} = \sqrt{\frac{4 \times 81.81}{\pi \times 0.75 \times 14.35}} = 3.11\text{ m}$$

$$u = 1.8\sqrt{2gH} = 1.8\sqrt{2 \times 9.81 \times 42} = 51.67\text{ m/s}$$

$$u = \frac{\pi D_t N}{60} , \quad \therefore N = \frac{60u}{\pi D_t} = \frac{60 \times 51.67}{\pi \times 3.11} = 317.3\text{ rev/min}$$

2.17 مثال (17): تحديد السرعة، زاوية مخرج ريشة التوجيه وزاوية مخرج الدوّار

توربين كابلان يُؤَلد قدرة مقدارها 10 Mw تحت سمت مقداره 25 m . قطرا الصُّرّة والطرف هما

1.2 m و 3 m . الكفاءتان الهيدروليكية والإجمالية هما 0.9 و 0.85 . إذا كان كلا مثلثي السرعة هما

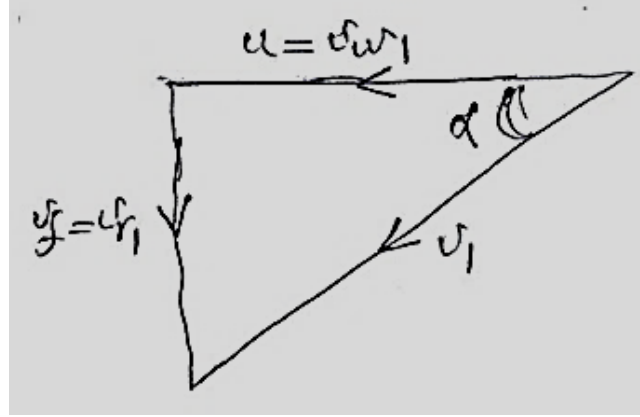
قائمي الزاوية، حدّد السرعة، زاوية مخرج ريشة التوجيه وزاوية مخرج الريشة.

الحل:

$$\eta_H = 0.9, D_t = 3 \text{ m}, D_h = 1.2 \text{ m}, H = 25 \text{ m}, \eta_0 = 0.85, P_{0/P} = 10 \times 10^6 \text{ W}$$

$$\beta_2 = ?, \quad \alpha = ?, \quad N = ?$$

مثلثا سرعات الدخول والمخرج موضحتان في الأشكال (2.9) و (2.10) أدناه.



شكل (2.9) مخطط سرعات الدخول لتوربين كابلان

$$Q = \frac{P_{0/P}}{\rho g H \eta_0} = \frac{10 \times 10^6}{10^3 \times 9.81 \times 25 \times 0.85} = 47.97 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_f = \frac{Q}{A_f} = \frac{47.97}{\frac{\pi}{4}(3^2 - 1.2^2)} = 8.08 \text{ m/s}$$

القدرة المُولدة (power generated)،

$$\dot{m} u v_{w1} = \frac{P_{0/P}}{\eta_H}$$

$$\dot{m} = \rho Q = 10^3 \times 47.97 \text{ kg/s}$$

$$u = v_{w1}$$

$$\therefore u^2 = \frac{P_{0/P}}{\eta_H \dot{m}} = \frac{10 \times 10^6}{0.9 \times 10^3 \times 47.97}$$

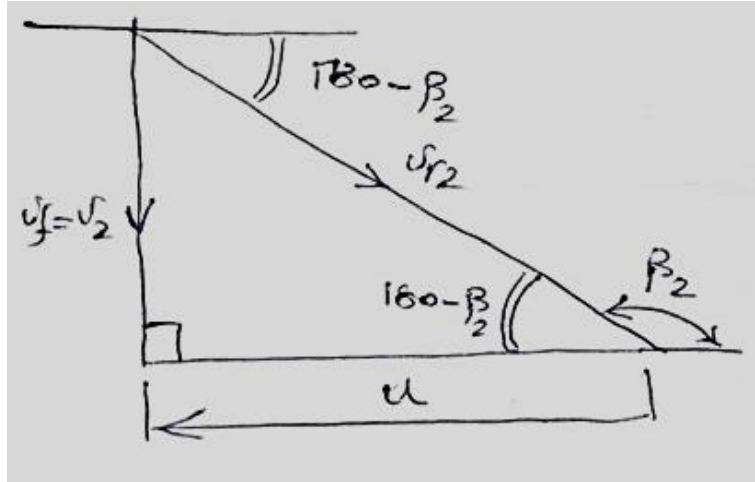
$$\therefore u = \sqrt{\frac{10 \times 10^6}{0.9 \times 10^3 \times 47.97}} = 15.22 \text{ m/s}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{v_f}{u} = \tan^{-1} \frac{8.08}{15.22} = 28^\circ$$

عند المخرج، $v_{f1} = v_{f2} = v_f$ ، $u_2 = u_1 = u$

$$\tan(180 - \beta_2)^\circ = \frac{8.08}{15.22}$$

$$\therefore 180 - \beta_2 = \tan^{-1} \frac{8.08}{15.22} = 28^\circ$$



شكل (2.10) مخطط سرعات الخرج لتوربين كابلان

$$u = \frac{\pi D_t N}{60}$$

$$\therefore N = \frac{60u}{\pi D_t} = \frac{60 \times 15.22}{\pi \times 3} = 96.9 \text{ rev/min}$$

2.18 مثال (18): تحديد الكفاءة الهيدروليكية اعتماداً على كفاءة أنبوب السحب

في محطة هيدروليكية ذات سمت منخفض حيث يكون السمت الكلي 7 m . يتم استخدام أنبوب سحب ليسترجع جزء من سمت السرعة. اذا كانت السرعة عند مخرج التوربين أو عند مدخل أنبوب السحب هي 7 m/s وتلك عند مخرج أنبوب السحب هي 5 m/s ، 7 m/s ، 5 m/s ، حدّد الكفاءة الهيدروليكية إذا كانت كفاءة أنبوب السحب هي 100% واذا كانت كفاءة أنبوب السحب لاسترجاع طاقة السرعة هي 80% . ما هي الكفاءة إذا تم فقد جميع سرعات المخرج. افترض أنه ليست هنالك فقودات أخرى.

الحل:

$$7 \text{ m} = \text{السمت الكلي}$$

سمت السرعة عند مدخل أنبوب السحب،

$$= \frac{v_2^2}{2g} = \frac{7^2}{2 \times 9.81} = 2.5 \text{ m}$$

سمت السرعة عند مخرج أنبوب السحب،

$$= \frac{v_3^2}{2g} = \frac{5^2}{2 \times 9.81} = 1.27 \text{ m}$$

عندما يتم استرجاع 100% من سمت السرعة،

$$\text{السمت المسترجع} = 2.5 - 1.27 = 1.23 \text{ m}$$

الحالة (1): الكسب الأقصى -1.23 m

$$\therefore \text{الفقد} = 2.5 - 1.23 = 1.27$$

$$\therefore \eta_H = (7 - 1.27)/7 = 0.8186 = 81.86\%$$

الحالة (2): 0.984 m = الكسب إذا تم استرجاع 80%

$$\text{السمت المفقود} = (2.5 - 0.984) = 1.516 \text{ m}$$

$$\therefore \eta_H = (7 - 1.516)/7 = 0.7834 \text{ or } 78.34\%$$

الحالة (3): إذا لم يكن هنالك استرجاع

$$\eta_H = (7 - 2.5)/7 = 0.6429 \text{ or } 64.29\%$$

2.19 مثال (19): تحديد سمت الضغط عند مخرج توربين دقّاع

في ترتيب أنبوب سحب لتوربين دقّاع يكون مُعدّل السريان $150 \text{ m}^3/\text{s}$. مساحة المدخل لأنبوب السحب هي

15 m^2 بينما مساحة المخرج هي 22.5 m^2 . يبعد الدوّار أو مدخل أنبوب السحب مسافة 0.5 m أعلى

منسوب الماء السفلي. إذا كان سمت السرعة المسترجع بواسطة أنبوب السحب هو 80% ، حدّد سمت الضغط

عند مخرج التوربين.

الحل:

باعتبار منسوب المُسرّب السفلي كمرجعية،

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \text{losses} \rightarrow (1)$$

$$v_1 = \frac{Q}{A_i} = \frac{150}{15} = 10 \text{ m/s} , \quad v_2 = \frac{Q}{A_0} = \frac{150}{22.5} = 6.67 \text{ m/s}$$

$$z_1 = -0.5 \text{ m} , z_2 = 0 , \quad h_2 = h_{atmos} = 10 \text{ m of water}$$

$$\text{الفقودات} = \frac{0.2(v_1^2 - v_2^2)}{2g}$$

بإعادة ترتيب المعادلة (1) وتعويض القيم ، فإنَّ الضغط عند مخرج التوربين يُعطى كالآتي:

$$h_1 = 10 + 0.5 + \left[\frac{6.67^2 - 10^2}{2 \times 9.81} \right] + 0.2 \left[\frac{10^2 - 6.67^2}{2 \times 9.81} \right]$$

$$h_1 = 10 + 0.5 - 2.83 + 0.57 = 8.24 \text{ m (absolute)}$$

$$= 1.76 \text{ (vacuum) أو}$$

2.20 مثال (20): تحديد الضغط عند مدخل أنبوب السحب

مدخل أنبوب السحب لتوربين رد فعلي يبعد مسافة 2.5 m فوق منسوب المُسرَّب السفلي. مساحة المخرج تُمثَّل

3 أضعاف مساحة المدخل. السرعة عند المدخل 8 m/s . يتم استرجاع 80% من سمت السرعة. معتبراً

السمت نتيجة لتأثير الضغط الجوي يُعادل 10 m من عمود الماء، حدِّد الضغط عند مدخل أنبوب السحب.

الحل:

يتم اعتبار منسوب المُسرَّب السفلي كمرجعية،

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \text{losses}$$

$$v_1 = 8 \text{ m/s} , \quad v_2 = 8 \times \frac{1}{3} = 2.67 \text{ m/s}$$

$$z_1 = 2.5 \text{ m} , \quad z_2 = 0 , \quad h_2 = 10 \text{ m}$$

$$\text{الفقودات} = 0.2 \left[\frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \right]$$

بتعويض القيم عاليه،

$$h_1 = 10 - 2.5 + \left[\frac{2.67^2 - 8^2}{2 \times 9.81} \right] + 0.2 \left[\frac{8^2 - 2.67^2}{2 \times 9.81} \right]$$

$$= 5.18 \text{ m (asolute) or } 4.82 \text{ m (vacuum)}$$

السمت المفقود بالاحتكاك وسرعة المخرج هو:

$$h_2 = 0.2 \left[\frac{8^2 - 2.67^2}{2 \times 9.81} \right] + \left[\frac{2.67^2}{2 \times 9.81} \right] = 0.58 + 0.36 = 0.94 \text{ m}$$

الفصل الثالث

مسائل في التوربينة الدفاعة وتوربينة كابلان باستخدام نظرية كمية الحركة

Problems in Propeller and Kaplan Turbines using Momentum Theorem

3.1 مسألة (1): حساب زوايا ريشة الدّوّار عند المدخل والمخرج لكلٍ من الطرف والصّرة

في توربين كابلان قطرا الصّرة والطرف هما 2.5 m و 5 m على التوالي. عندما يدور بسرعة 150 rev/min تحت سمت مقداره 30 m ، يقوم بتوليد قدرة مقدارها 30 Mw . الكفاءة الاجمالية 85% والكفاءة الهيدروليكية 90% . حدّد زوايا ريشة الدّوّار عند المدخل والمخرج لكلٍ من الطرف والصّرة. افترض تدويم صفري عند المخرج، ويكون حاصل ضرب سرعة التدويم وسرعة طرف الريشة ثابتاً عند كل الأقطار.

Ans. $\{14^\circ, 52.9^\circ, 11.7^\circ, 22.5^\circ\}$

3.2 مسألة (2): تحديد قطر عجلة وسرعة التوربين

يُولد توربين كابلان بكفاءة مقدارها 90% قدرة مقدارها 25 Mw ، يكون السمت المتاح مكافئاً لـ 40 m . نسبة السرعة ونسبة السريان هما 2 و 0.6 على الترتيب. نسبة الصّرة إلى الطرف هي 0.4 . حدّد قطر وسرعة التوربين.

Ans. $\{2.5\text{ m}, 428.6\text{ rev/min}\}$

3.3 مسألة (3): حساب السرعة، زاوية ريشة التوجيه وزاوية مخرج الدّوّار

توربين كابلان ينتج قدرة مقدارها 12 Mw تحت سمت مقداره 28 m . أقطار الصّرة والطرف للدّوّار هما 1.1 m و 2.9 m على الترتيب. إذا كانت الكفاءة الاجمالية 85% ومثلثا سرعات المدخل والمخرج قائما الزاوية. أحسب السرعة، زاوية ريشة التوجيه وزاوية مخرج الدّوّار. الكفاءة الهيدروليكية 94% .

3.4 مثال (4): تحديد نسبة السرعة المؤسسة على القطر الخارجي للدّوار

توربين كابلان يُؤَلد قدرة مقدارها 35000 kw عندما يدور بسرعة 240 rev/min . السرعة النوعية البعدية هي 320 . حدّد السمّت المتاح. إذا كانت الكفاءة الاجمالية هي 84.5% ونسبة قطر الصُرّة إلى قطر الطرف 0.3 . حدّد نسبة السرعة المؤسسة على القطر الخارجي. إفترض نسبة سريان مقدارها 0.35 .

Ans. {21.27 m , 2.525}

3.5 مسألة (5): حساب زاوية مخرج ريشة التوجيه وزاوية مدخل الدّوار

توربين سريان محوري بقطر طرف مقدار 4.5 m وقطر صُرّة مقدار 2.5 m . القدرة المتولدة هي 21 Mw . سرعة الدوران هي 140 rev/min . صافي السمّت هو 20 m . الكفاءتان الهايدروليكية والاجمالية هما 94% و 80% على الترتيب. أحسب زاوية مخرج ريشة التوجيه وزاوية مدخل الدّوار.

Ans. {63.2° , 22.05°}

3.6 مسألة (6): حساب سرعة وقطر التوربين

توربين سريان محوري من نوع كابلان يُؤَلد قدرة مقدارها 20 Mw عندما يعمل تحت سمّت مقدار 20 m . نسبة السرعة هي 2 ونسبة السريان هي 0.6 . قطر الصُرّة يُمثّل 35% من قطر الطرف. أحسب سرعة التوربين وقطره.

Ans. {198 rev/ min, 3.8 m}

3.7 مسألة (7): تحديد زوايا مدخل ومخرج الريشة عند الطرف

توربين كابلان يشتغل تحت صافي سمّت مقدار 20 m و يُؤَلد 16 Mw بكفاءة هايدروليكية مقدارها 90% وكفاءة إجمالية 80% . القطر الخارجي للدّوار 4.2 m قطر الصُرّة 2 m . السرعة النوعية اللابعدية هي 0.8 . حدّد زوايا مدخل ومخرج الريشة عند الطرف اذا كان $v_{w_2} = 0$.

Ans. {9.2° , 18°}

3.8 مسألة (8): تحديد قطر وسرعة الدّوار

توربين سريان محوري يُؤلد 7.5 Mw تحت سمت مقداره 5.5 m بكفاءة اجمالية 85% . قطر الضرّة هو $\frac{1}{3}$ قطر الطرف. حدّد قطر وسرعة الدّوّار .

Ans. {5.58 m , 75 rev/min}

3.9 مسألة (9): تحديد الضغط عند أعلى أنبوب السحب والسمت المفقود في أنبوب السحب

في أنبوب سحب مُثبّت إلى توربين رد فعلي قطر المدخل هو 3 m ومساحة المخرج هي 20 m^2 . السرعة عند المدخل هي 5 m/s . يبعد مخرج التوربين مسافة 5 m فوق منسوب المُسرّب السفلي. الفقد في أنبوب السحب يُمثّل 50% من سمت السرعة عند المخرج. حدّد الضغط عند أعلى أنبوب السحب. أيضاً أوجد سمت المفقود في أنبوب السحب.

Ans. {6.03 m (vacuum) , 0.08 m }

3.10 مسألة (10): تحديد الضغط الفراغي عند مخرج التوربين والقدرة الضائعة في طاقة

السرعة عند المخرج

البيانات التالية ترجع الى أنبوب سحب لتوربين فرانسيس ضخم. مساحة المدخل 25 m^2 ، المساحة عند المخرج 75 m^2 ، السرعة عند المدخل 12 m/s . المستوى فوق منسوب المُسرّب السفلي لمخرج التوربين يعادل 0.9 m . إذا كان الفقد في أنبوب السحب نتيجة للاحتكاك يُعادل 20% من طاقة السرعة عند المدخل، حدّد الضغط الفراغي عند مخرج التوربين. أوجد أيضاً القدرة الضائعة في طاقة السرعة عند المخرج.

Ans. {5.95 m (vacuum) , 2000 kw}

3.11 مسألة (11): تحديد كفاءة أنبوب السحب

قطر المدخل لأنبوب سحب 3 m . الارتفاع فوق المنسوب الأسفل 2.5 m . الضغط المقاس عند الأعلى 3.1 m فراغ . مُعدّل السريان $30 \text{ m}^3/\text{s}$. حدّد كفاءة أنبوب السحب.

Ans. {65.5%}

3.12 مسألة (12): تحديد زوايا المدخل والمخرج للريشة عند متوسط نصف القطر

توربينة محورية السريان تشتغل تحت سمت مقداره 21.8m وتنتج قدرة مقدارها 21MW عندما تدور بسرعة 140 rev/min . يكون قطر العجلة الخارجي 4.5m وقطر الصرة 2.0m . إذا كانت الكفاءة الهيدروليكية تساوي 94% والكفاءة الإجمالية هي 88% ، حدّد زوايا المدخل والمخرج للريشة عند متوسط نصف القطر .

Ans. {30°, 20° 20'}

3.13 مسألة (13): تحديد مُعدّل السريان، زاوية ريشة الدوّار عند المخرج وقدرة الخرج

توربينة ذات سريان محوري، بريش ثابتة أعلى السريان للدوّار الذي يشتغل بسرعة 250rev/min لها قطر خارجي مقداره 1.8m وقطر داخلي مقداره 0.75m . عند متوسط القطر فإنّ زاوية الخرج في الريش الثابتة هي 40° وزاوية الدوّار عند المدخل هي 30°، كلتاها مقاسة من اتجاه سرعة الريشة. حدّد الآتي:

(أ) مُعدّل السريان الذي تكون عنده زاوية السقوط للريش الدوّارة صفر مفترضاً أنّ السرعة المحورية منتظمة.

(ب) زاوية ريشة الدوّار عند المخرج إذا كانت مكونة التدويم مساوية للصفر .

(ج) قدرة الخرج إذا كان التغير في التدويم مستقل عن نصف القطر .

Ans. {12m³/s , 18.9° , 1360w}

الفصل الرابع

التوربينة الدفاعة وتوربينة كابلان مؤسستان على نظرية الجسيمات

أو الجنيحات الهوائية

Propeller and Kaplan Turbines Based on Aerofoil Theorem

4.1 مدخل (Introduction):

تتكون توربينة الدفع أو التوربينة الدفاعة من صرة محاطة بعدد من الألواح (الريش) (من 4 إلى 6)، وتكون معلقة من عمود رأسي. هنالك حلقة من ريش التوجيه مشابهة لتلك الموجودة في توربينة فرانسيس يتم استخدامها لتوجيه الماء على الريش المتحركة ولزيادة السرعة المطلقة. ريش التوجيه تجعل سريان الماء فوق الريش المتحركة موازياً لمحور الدوران. يغادر الماء الريش بدون مكونة تدويم (whirl component). يتم أيضاً استخدام أنبوب سحب لخلق ضغط سالب عند مخرج التوربينة. إذا تمت سبابة الريش المتحركة مع الصرة يتم تسمية التوربينة بتوربينة الدفع أو التوربينة الدفاعة، أما إذا كانت الريش قابلة للضبط لتوافق أو لتتناسب شروط الحمل الجزئي، فيتم تسمية التوربينة بتوربينة كابلان. تكون خصائص الحمل الجزئي لتوربينات الدفع فقيرة جداً. توربينة الدفع (التوربينة الدفاعة) أو توربينة كابلان هي توربينة رد فعلية محورية السريان.

يتطلب هذا النوع من التوربينات سمناً يقل عن 60m مقارنة بتوربينات فرانسيس التي تتطلب سمناً أقل من 370m وتوربينات عجلة بلتون التي تتطلب سمناً أكبر من 370m.

تصميم الريش يمكن أن يكون مؤسساً إما على نظرية كمية الحركة (momentum theorem) التي تم شرحها في الفقرة (3.1) أعلاه أو على نظرية الجسيمات الهوائية (aerofoil theorem).

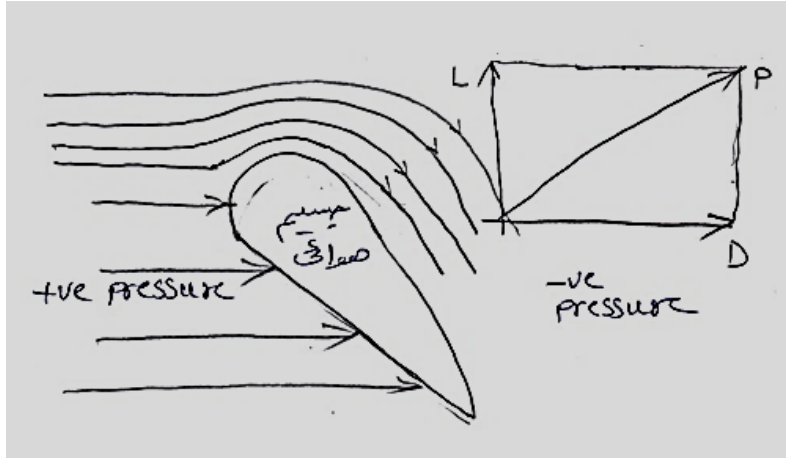
الشكل (4.1) أدناه يوضح الأجزاء الرئيسية للتوربينة الدفاعة أو توربينة كابلان.

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_{dt}^2 - d_b^2) v_f \cdot k \quad (iv)$$

تكون مساحة السريان قابلة للضبط بالتالي فإنَّ المعادلة (iv) عاليه يجب أن لا يتم استخدامها ما لم تكون الريش مفتوحة بالكامل.

2/ إذا كان تصميم الريش مؤسساً على نظرية الجسيمات الهوائية:

الشكل (4.2) أدناه يوضِّح خطوط السريان أعلى وأسفل جسيم هوائي.



شكل (4.2) خطوط السريان أعلى وأسفل جسيم هوائي

خطوط السريان حول الجسيم الهوائي تنصرف كما موضح في الشكل (4.2) عاليه، مسببة في خفض الضغط فوق السطح العلوي وفي زيادة الضغط على السطح السفلي.

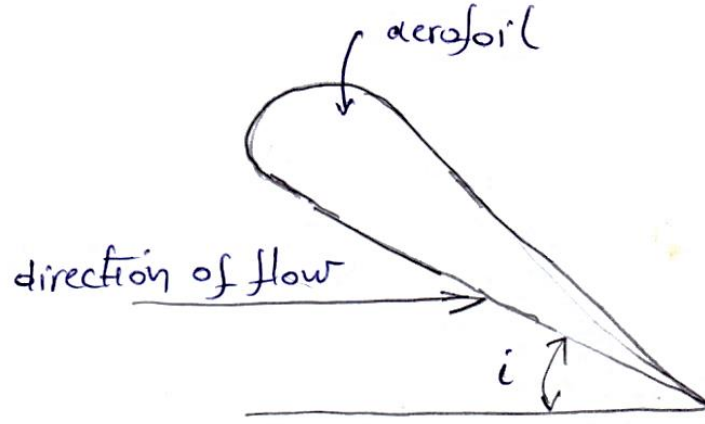
محصلة القوة على الجسيم الهوائي (القوة P) يمكن تحليلها في اتجاه مواز لاتجاه خطوط السريان معطياً قوة السحب D، وفي اتجاه متعامد مع خطوط السريان معطياً قوة الرفع L . هاتين القوتين يتم الحصول عليهما مختبرياً باستخدام نفق الهواء أو الرياح (wind tunnel).

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho A v_r^2 \quad , \quad \text{قوة الرفع}$$

$$L = \frac{1}{2} C_D \rho A v_r^2 \quad , \quad \text{قوة السحب}$$

الشكل (4.3) أدناه يوضِّح إتجاه السريان (stream orientation) وزاوية السقوط أو الهجوم

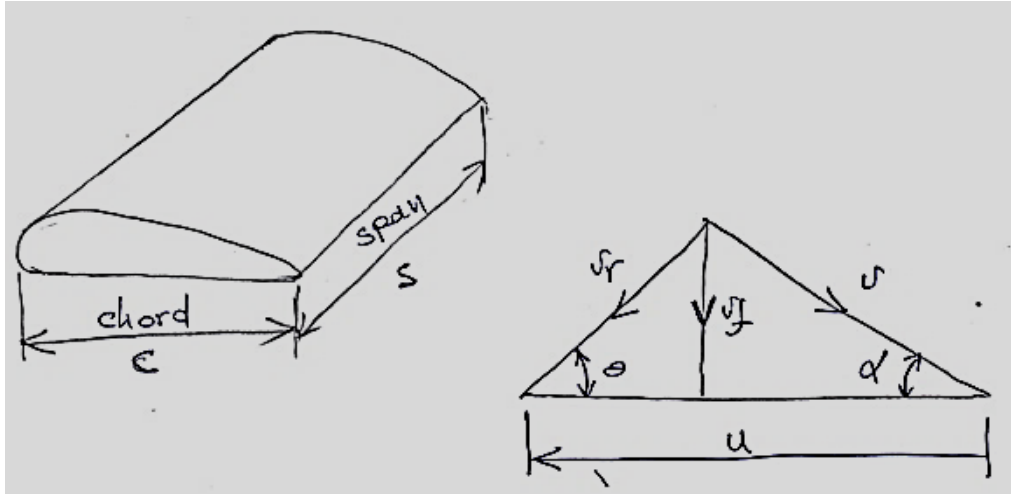
.(angle of incidence or angle of attack)



شكل (4.3) إتجاه السريان وزاوية السقوط أو الهجوم

حيث i = زاوية السقوط أو زاوية الهجوم (angle of incidence or angle of attack).

الأشكال (4.4) و (4.5) يمثلان على الترتيب مخطط السرعات لجسيم هوائي ووتره ونطاق جسيم هوائي.



شكل (4.4) مخطط السرعات لجسيم هوائي شكل (4.5) وتره ونطاق جسيم هوائي

يتم إعطاء القوة المماسية F_t والقوة المحورية F_a لجسيم هوائي كما يلي:

$$F_t = \frac{1}{2} \rho A v_r^2 (C_L \sin \theta - C_D \cos \theta)$$

$$F_a = \frac{1}{2} \rho A v_r^2 (C_L \cos \theta - C_D \sin \theta)$$

$$\text{القدرة المنتجة} = F_t \times u$$

$$\text{القدرة المولدة الكلية} = Z \times F_t \times u$$

حيث ، $Z =$ عدد ريش الجسيم الهوائي

4.2 أمثلة ومسابائل محلولة في التوربينة الدفاعة وتوربينة كابلان مؤسستان على نظرية

الجسيمات أو الجنيحات الهوائية

مثال (1):

توربينة مائية رد فعلية من نوع السريان المحوري، مركب عليها 5 ريش جسيمات هوائية وسرعتها 180 rev/min . متوسط نصف قطر دائرة الريشة أو العجلة هو 1.45 m ، وطول الريشة في اتجاه نصف قطري هو 380 mm . وترة الجسيم الهوائي تكون مائلة بزاوية 12° على اتجاه الحركة وطول الوتر 1.2 m . زاوية ريش التوجيه هي 22° . قيم معاملات الرفع C_L والسحب C_D لزاوية السقوط المستخدمة هما 0.76 و 0.04 على الترتيب.

يتم إمداد التوربينة تحت سمت مقداره 10.8 m ويكون عامل مساحة الريشة مساوياً لـ 0.9 . افترض سرعة سريان مقدارها 4.8 m/s . أحسب الآتي:

- زاوية السقوط لهذا الوضع (الضبط).
- القدرة المنتجة بواسطة هذه التوربينة.
- الكفاءة النظرية.

الحل:

$z = 5$ ، $N = 180 \text{ rev/min}$ ، $R = 1.45 \text{ m}$ ، متوسط نصف قطر دائرة العجلة.

$s = 0.38 \text{ m}$ ، النطاق (طول الريشة في اتجاه نصف قطري).

$C = 1.2 \text{ m}$ ، طول وتر الجسيم الهوائي.

وترة الجسيم الهوائي تكون بزاوية 12° مع اتجاه الحركة.

$\alpha = 22^\circ$ ، زاوية ريشة التوجيه.

$$C_D = 0.04 , \quad C_L = 0.76$$

$$v_f = 4.8 \text{ m/s} , \quad k = 0.9 , \quad H = 10.8 \text{ m}$$

/i ، زاوية السقوط

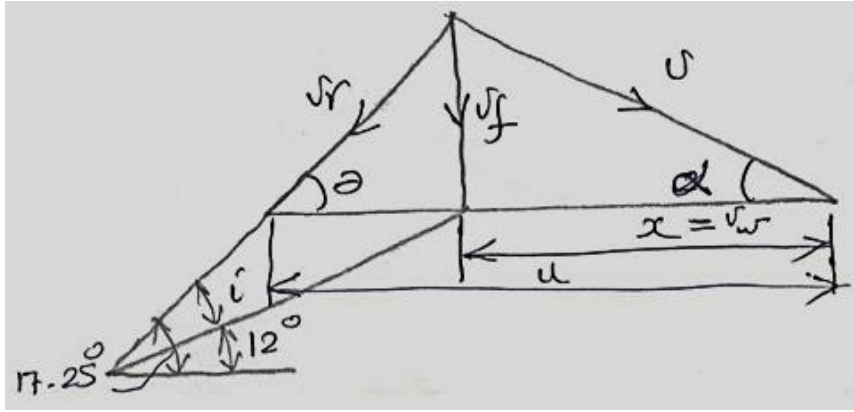
من الشكل (4.6) أدناه،

$$\tan \alpha = \frac{v_f}{x = v_w}$$

$$\therefore x \text{ or } v_w = \frac{v_f}{\tan \alpha} = \frac{4.8}{\tan 22^\circ} = 11.88 \text{ m/s}$$

$$\tan \theta = \frac{v_f}{u - x}$$

$$\therefore u = \frac{2\pi R_m N}{60}$$



شكل (4.6) مخطط السرعات لجسيم هوائي

$$\therefore u = \frac{2\pi \times 1.45 \times 180}{60} = 27.33 \text{ m/s}$$

$$\therefore \theta = \tan^{-1} \frac{v_f}{u - v_w} = \tan^{-1} \frac{4.8}{27.33 - 11.88} = \tan^{-1} \frac{4.8}{15.45} = 17.25^\circ$$

الزاوية المحصورة بين v_r ووتر الريشة = زاوية السقوط

$$i = 17.25 - 12 = 5.25^\circ$$

/ii القدرة المنتجة بواسطة هذه التوربينة = ؟

$$F_t = \frac{1}{2} \rho A v_r^2 (C_L \sin \theta - C_D \cos \theta)$$

$$v_r = \sqrt{v_f^2 + (u - v_w)^2} = \sqrt{4.8^2 + 15.45^2} = 16.17 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \therefore F_t &= \frac{1}{2} \times 10^3 (1.2 \times 0.38) \times 16.17^2 (0.76 \sin 17.25 - 0.04 \cos 17.25) \\ &= 11158.17 \text{ N} = 11.16 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{القدرة المنتجة } P = zuF_t = 5 \times 27.33 \times 11.16 = 1525 \text{ kW}$$

الكفاءة النظرية = ؟

$$P_{i/p} = \rho g Q H \text{ ، القدرة التي يتم إمدادها إلى التوربينة (قدرة الدخل)}$$

$$= \rho g k A_f v_f H$$

$$A_f = \frac{\pi}{4} (D_{dt}^2 - d_b^2)$$

$$D_m = 2R_m = d_b + s$$

$$d_b = 2R_m - s = 2 \times 1.45 - 0.38 = 2.52 \text{ m}$$

$$D_{dt} = d_b + 2s = 2.52 + 2 \times 0.38 = 3.28 \text{ m}$$

$$\therefore P_{i/p} = 10^3 \times 9.81 \times 0.9 \times \frac{\pi}{4} (3.28^2 - 2.52^2) \times 4.8 \times 10.8$$

$$= 1584.6 \times 10^3 \text{ W} = 1584.6 \text{ kW}$$

$$\eta_H = \frac{P_{o/p}}{P_{i/p}} = \frac{1525}{1584.6} = 0.9624 \simeq 96.24\%$$

السرعة النوعية لهذا النوع من التوربينات تتراوح بين 400 و 1600 .

مثال (2):

توربين كابلان مُركَّب عليه 4 ريش من نوع الجنيّحات الهوائية. سرعة التوربين 200 rev/min ، متوسط نصف قطر دائرة الريشة أو العجلة هو 1.0 m ، وطول الريشة في إتجاه نصف قطري هو 0.4 m . وتيرة الجسيّم الهوائي تكون مائلة بزاوية مقدارها 16° في إتجاه الحركة، وطول الوتره هو 1.5 m . زاوية ريش التوجيه هي 25° . قيّم معاملات الرفع C_L والسحب C_D لزاوية السقوط (الهجوم) المستخدمة هما 0.8 و 0.04 على الترتيب.

يتم إمداد التوربين بماء تحت سمت ضغط مقداره 12 m ويكون عامل مساحة الريشة مساوٍ لـ 0.85 . إفترض سرعة سريان مقدارها 5 m/s . أحسب الآتي:

أ/ زاوية السقوط أو الهجوم لهذا الوضع.

ب/ القوة المماسية المنتجة بواسطة هذا التوربين.

ج/ القدرة المنتجة بواسطة هذا التوربين.

د/ الكفاءة النظرية.

الحل:

$z = 4$ ، $N = 200\text{ rev/min}$ ، $R = 1.0\text{ m}$ ، $s = 0.4\text{ m}$ (طول الريشة في اتجاه نصف

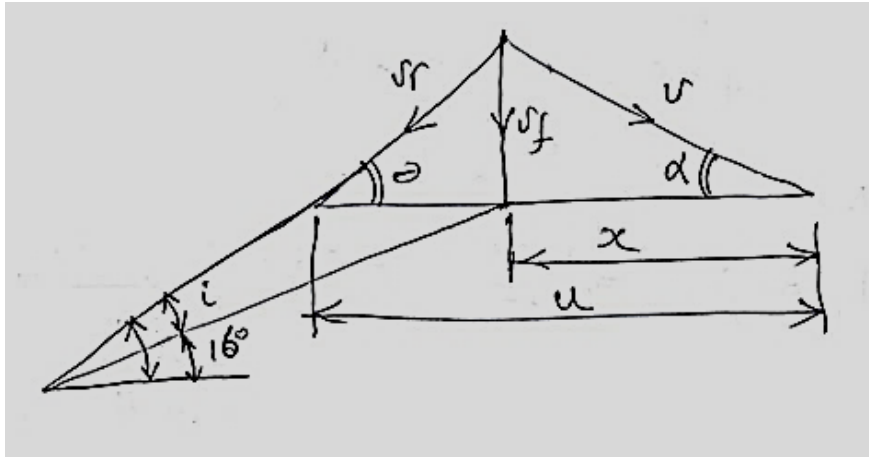
قطري)، $c = 1.5\text{ m}$ طول وتره الجسيم الهوائي ، $\alpha = 25^\circ$ زاوية ريشة التوجه.

$$c_D = 0.04 \text{ ، } c_L = 0.8$$

$$v_f = 5\text{ m/s} \text{ ، } k = 0.85 \text{ ، } H = 12\text{ m}$$

أ/ $i = ?$ زاوية السقوط

الشكل (4.7) أدناه يوضح مخططات السرعة لتوربينة سريان محوري مؤسسة على نظرية الجسيمات الهوائية.



شكل (4.7) مخططات السرعة لتوربينة سريان محوري

$$\tan \alpha = \frac{v_f}{x} \quad \therefore x = \frac{v_f}{\tan \alpha} = \frac{5}{\tan 25^\circ} = 10.723\text{ m/s}$$

$$\tan \theta = \frac{v_f}{u - x}$$

$$u = \frac{2\pi R_m N}{60}, \therefore u = \frac{2\pi \times 1.0 \times 200}{60} = 20.944 \text{ m/s}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v_f}{u - x} = \tan^{-1} \frac{5}{20.944 - 10.723} = 26^\circ$$

زاوية السقوط : هي الزاوية المحصورة بين v_r ووتر الريشة،

$$i = \theta - 10^\circ = 26 - 16^\circ = 10$$

ب/ القوة المماسية المنتجة بواسطة هذا التوربين = ؟

$$\text{القدرة المولدة الكلية} = z \times f_t \times u$$

$$F_t = \frac{1}{2} \rho A v_r^2 (C_L \sin \theta - C_D \cos \theta) \text{ ، القوة المماسية على الريشة}$$

$$v_r = \sqrt{v_f^2 + (u - x)^2} = \sqrt{5^2 + (10.221)^2} = 11.378 \text{ m/s}$$

$$\therefore F_t = \frac{1}{2} \times 10^3 \times (0.4 \times 1.5) \times 11.378 (0.8 \sin 26 - 0.04 \cos 26)$$

$$\therefore F_t = 12.224 \times 10^3 \text{ N}$$

$$= 12.224 \text{ kN}$$

ج/ القدرة المنتجة بواسطة هذا التوربين = ؟

$$P_{o/P} = z u F_t = 4 \times 20.944 \times 12.224 = 1024 \text{ kw}$$

د/ $\eta_{th} = ?$ ، الكفاءة النظرية

$$P_{i/P} = \rho g Q H \text{ القدرة التي يتم امدادها الى التوربينة}$$

$$= \rho g k A_f v_f H$$

$$A_f = \frac{\pi}{4} (D_{dt}^2 - d_b^2)$$

$$D_m = 2R_m = d_b + s$$

$$d_b = 2R_m - s \text{ ؛ } d_b = 2 \times 1.0 - 0.4 = 1.6 \text{ m}$$

$$\therefore P_{i/P} = 10^3 \times 9.81 \times 0.80 \times \frac{\pi}{4} (2.4^2 - 1.6^2) \times 5 \times 12 = 1183.5 \text{ kw}$$

$$\therefore \eta_{th} = \frac{P_{o/P}}{P_{i/P}} = \frac{1024}{1183.5} = 0.865 \cong 86.5\%$$

مسألة (1):

يتم إمداد دوار توربين كابلان بماء تحت سمت ضغط مقداره 45 m بمعدل سريان حجمي مقداره $1.8\text{ m}^3/\text{s}$.
يتم تزويد الدوار بأربع ريش من نوع الجسيمات أو الجنيحات الهوائية كُلِّ بنطاق مقداره 2.2 m وبوترة مقداره 1.2 m . وُجِد من خلال التجارب أن زاوية سقوط مقدارها 3° تنتج معاملات رفع وسحب مقدارهما 0.2 , 1.4 على الترتيب.

يغادر الماء جهاز التوجيه بسرعة مطلقة مقدارها 25 m/s تصنع زاوية مقدارها 28° مع اتجاه الحركة. قطر الصُرّة مقداره 800 mm ويدور الدوار بسرعة 240 rev/min ، أحسب الآتي:

- i. قوة الإدارة على كل ريشة.
- ii. القوة المحورية الكلية على الدوار.
- iii. القدرة المنتجة بواسطة هذا التوربين.
- iv. الكفاءة الإجمالية.
- v. زاوية ضبط الريش.
- vi. رقم الشكل للماكينة مؤسساً على القدرة المتولّدة.

الكتب والمراجع

الكتب والمراجع العربية :

1. دكتور أسامة محمد المرضي سليمان خيال، "مذكرة محاضرات آلات هايدروليكية (1)"، جامعة وادي النيل، كلية الهندسة والتقنية، قسم الهندسة الميكانيكية، (1995م).
2. دكتور فتح الرحمن أحمد الماحي، "مذكرة محاضرات آلات هايدروليكية (1)"، جامعة وادي النيل، كلية الهندسة والتقنية، قسم الهندسة الميكانيكية، (1997م).
3. دكتور أسامة محمد المرضي سليمان خيال، "مذكرة محاضرات ميكانيكا الموائع (B3)"، جامعة وادي النيل، كلية الهندسة والتقنية، قسم الهندسة الميكانيكية، (1995م).
4. دكتور محمد هاشم صديق، "ميكانيكا الموائع"، الإصدار الكتابية، (2016م).
5. المهندس محمد خليل مدور، "دليل المهندس في مشاريع مياه الشرب"، (2014م).
6. دكتور محمد عصام محمد عبد الماجد، "ميكانيكا الموائع"، (2015م).
7. عبد الرحمن العذبة، "ميكانيكا الموائع التطبيقية"، (2010م).
8. دكتور عصام محمد عبد الماجد، صابر محمد صالح إبراهيم، "الموائع"، الدار السودانية للكتب، الخرطوم، السودان، (2001م).
9. بشير عبد السلام، "ميكانيكا الموائع"، بيروت، (1988م).
10. محمد بشير المنجد، "الهايدروليك (1)"، جامعة دمشق، (1980م).
11. دكتور أسامة محمد المرضي سليمان خيال، "مذكرة محاضرات آلات هايدروليكية (2)"، جامعة وادي النيل، كلية الهندسة والتقنية، قسم الهندسة الميكانيكية، (1997م).
12. دكتور فتح الرحمن أحمد الماحي، "مذكرة محاضرات آلات هايدروليكية (2)"، جامعة وادي النيل، كلية الهندسة والتقنية، قسم الهندسة الميكانيكية، (1997م).

1. Bernard Massey, "Mechanics of Fluid ", Eighth edition, Taylor and Francis Publisher, (2006).
2. S.L. Dixon, "Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbo machinery "5th edition, (2004).
3. Zueb Husain , Zulkifly Abdullah, Zainal Alimuddin , " Basic Fluid Mechanics and Hydraulic Machines " , BS Publications , Hyderabad , India , (2008).
4. Jyh- cherng shieh, Department of Bio – Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, " Fundamentals of Fluid Mechanics, chapter (12) Pumps and Turbines ", (2014).
5. Colin Caprani, "Fluid Mechanics, 2nd year, Civil and Structural Engineering", (2007).
6. Csaba Hos, "Fluid Machinery lecture notes", may (2014).
7. Frank M. White, University of Rhode Island, "Fluid Mechanics", Seventh edition, McGraw Hill Publishers, (2009).
8. Bruce Hunt, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, " Fluid Mechanics for Civil Engineers ", (1995).
9. Dr. Osama Mohammed Elmardi Suleiman Khayal, "Fluid Mechanics Examples and Answers", (2016).
10. Jack B. Evett, and cheng Liu, "2500 Solved problems in fluid Mechanics and Hydraulics", McGraw Hill Publishers, New York, (1989).
11. Goswami D. Y. and et. al., "Energy Conversion", CRC Press LLC, (1999).
12. Dr. Osama Mohammed Elmardi, "Further Experimental Research Work on Water Current Turbines", Lambert Academic Publishing, (2015).
13. Rama S. R. Gorla, Aijaz A. khan, "Turbo machinery – Design and theory", Marcel Dekker, (2003).
14. John F. Douglas and et. al, "Fluid Mechanics" Fifth Edition, Ashford Color Press Ltd, Gosport, (2005).
15. Andrew Sleigh, "An Introduction to Fluid Mechanics", May 2001.

16. M. Bahrami, "Introduction and Properties of Fluids", Simon Fraser University, (2009).
17. Fred Stern, "Fluid Mechanics", (2013).
18. John F. Douglas, R. D. Mathews, "Solving Problems in Fluid Mechanics – Volume (2)", Prentice Hall Publisher, (1996).
19. T. Al-Shemmeri, "Engineering Fluid Mechanics", Al-Shemmeri and Ventus Publishing, (2012).
20. Zhang Z., "Pelton Turbines", ISBN: 978 – 3 – 319 – 31908 – 7, <http://www.springer.com/978-3-319-31908-7>, (2016).
21. Sayers A.T., "Hydraulic and Compressible Flow Turbo machines", (1990).
22. Jeremy Thake, "The Micro – Hydro Pelton Turbine Manual: Design, Manufacture and Installation for Small – Scale Hydro – Power", Amazon Publishers and Distributors, (2001).
23. Loice K. Gudukeya, and Shepherd Misi, "Strategies of Improving Turbine Efficiency in Micro – Hydro Power Plants: Pelton Wheel and Cross – Flow Turbine", Amazon Publishers and Distributors, (2001).
24. Felix Meinikheim, Harry Langhome, and John McGeorge, "Alternative Sources of Energy", Amazon Publishers and Distributors, (1977).
25. Paul Hodges, "Test of Thirty Samson Turbine", Amazon Publishers and Distributors, (2015).
26. Bachelor, G. K., "An introduction to fluid dynamics", Cambridge University Press, 1967.
27. S. Gahin, Moustafa M. Elsayed, Mohammed A. Ghazi, "Introduction to engineering mechanics", King Abdul-Aziz University, Jeddah, Saudi Arabia, 1985.
28. Garman P., "Water current turbines", a fluid worker's guide, II Publications, London, 1986.
29. Robert W. Shortidge, "Viktor Kaplan and the Adjustable – Blade Propeller Turbine", Hydro Review, December 1989.

30. Michele Manno, "Hydraulic Turbines and Hydroelectric Power Plants", Energy Systems Course, Lecture Notes, Department of Industrial Engineering, University of Rome, May 2013.
31. Arne Kjolle, "Mechanical Equipment", Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, December 2001.
32. Grant Ingram, "Basic Concepts in Turbo Machinery", ISBN 978-87-7681-435-9, 2009.
33. Hermod Brekke, "Design, performance and maintenance of Francis turbines", Global Journal of Researches in Engineering, Mechanical and Mechanics Engineering, USA, Volume 13, issue 5, version 1.0, (2013).
34. Dixon, "Theory of turbo – machinery", Hydraulic Turbines, chapter 9.
35. Zhenmu Chen, Patrick M. Singh and Young – Do Choi, "Francis turbine blade design on the basis of port area loss and loss analysis", Energies, 9, 164, doi: 10.3390/en 9030164, (2016), pp. (1 – 12).
36. Peter Joachim Gogstad, "Hydraulic design of Francis turbine exposed to sediment erosion", Master of energy and environmental engineering thesis, Norwegian University of Science and Technology, January (2012).
37. Joule Center Annual Conference, "Small hydro – power schemes in the north west of England: Overcoming the Barriers", Rheged Center, 3rd April (2008).
38. Miriam Flores, Gustavo Urquiza, Jose Maria Rodriguez, "A fatigue analysis of a hydraulic Francis turbine runner", World Journal of Mechanics, 2, (2012), pp. (28 – 34).

نبذة عن المؤلف:



دكتور أسامة محمد المرضي سليمان خيال وُلِدَ بمدينة عطبرة بالسودان في العام 1966م. حاز على دبلوم هندسة ميكانيكية من كلية الهندسة الميكانيكية - عطبرة في العام 1990م. تحصّل أيضاً على درجة البكالوريوس في الهندسة الميكانيكية من جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا - الخرطوم في العام 1998م ، كما حاز على

درجة الماجستير في تخصص ميكانيكا المواد من جامعة وادي النيل - عطبرة في العام 2003م ودرجة الدكتوراه من جامعة وادي النيل في العام 2017م. قام بالتدريس في العديد من الجامعات داخل السودان، بالإضافة لتأليفه لأكثر من أربعين كتابا باللغة العربية ولعشرين كتابا باللغة الإنجليزية بالإضافة لمائة ورقة علمية منشورة في دور نشر ومجلات عالمية إلى جانب إشرافه على أكثر من ثلاثمائة بحث تخرج لكل من طلاب الماجستير، الدبلوم العالي، البكالوريوس، والدبلوم العام. يشغل الآن وظيفة أستاذ مشارك بقسم الميكانيكا بكلية الهندسة والتقنية - جامعة وادي النيل وأيضا عميدا لكلية الهندسة. بالإضافة لعمله كاستشاري لبعض الورش الهندسية بالمنطقة الصناعية عطبرة. هذا بجانب عمله كمدير فني لمجموعة ورش الكمالي الهندسية لخرطة أعمدة المرافق واسطوانات السيارات والخرطة العامة وكبس خراطيش الهيدروليك.