

دراسة عددية لبنية الجريان في أنبوب التصريف لعنفة كابلان عند الحمولة الجزئية

الباحثة: م . رهام ظاهر الدخّل الله

عضو هيئة تعليمية (قائم بالأعمال)

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة البعث

ملخص

يقدم هذا البحث محاكاة عددية لحقل الجريان غير المستقر داخل أنبوب التصريف لعنفة كابلان عند ظروف الحمولة الجزئية. نتيجة تقوس خطوط التيار، تفشل نماذج الاضطراب التقليدية بالتنبؤ ببنية الجريان. لذلك، استخدم نموذج معدل من نموذج نقل إجهاد القص (SST-SAS) للتعامل مع إجهادات القص. اعتبرت شفرات التوجيه، الدوار كاملاً وأنبوب التصريف لضمان تطبيق شروط حدية حقيقية عند مدخل أنبوب التصريف. افترض حد الخروج على أنه تصريف للوسط الجوي. توافقت تذبذبات الضغط الناتجة ضمن أنبوب التصريف مع البيانات التجريبية المتوافرة. بهدف البحث أكثر في تشكل خط الدوامة الدائر RVR وحركتها، تم اللجوء لمعيار λ_2 ، المتعلق بموقع نواة الدوامة وشدة القيمة الذاتية الكبرى الثانية لمتنور تدرج السرعة. تبين الطريقة المتبعة لتحديد الدوامة بنية الجريان وحركة الدوامة داخل أنبوب التصريف بدقة.

كلمات مفتاحية:

عنفة كابلان ، أنبوب التصريف ، جريان مضطرب ، ميكانيك الموائع الحسابي ، حمولة جزئية

a numerical study of flow structure in Kaplan turbine's draft tube under partial load.

Abstract :

This research presents numerical simulation of the unsteady flow field inside the draft tube of a Kaplan turbine at part load condition. Due to curvature of streamlines, the ordinary two-equations turbulence models fail to predict the flow features. Therefore, a modification of the Shear Stress Transport (SST-SAS) model is utilized to approximate the turbulent stresses. A guide vane, complete runner and draft tube are considered to insure the real boundary conditions at the draft tube inlet. The outlet boundary is assumed to discharge into the atmosphere. The obtained pressure fluctuations inside the draft tube are in good agreement with available experimental data. In order to further investigate the RVR formation and its movement, the λ_2 criterion, relating the position of the vortex core and strength to the second largest Eigen value of the velocity gradient tensor, is employed. The method used for vortex identification shows the flow structure and vortex motion inside the draft tube accurately

Key words : Kaplan turbine , draft tube, turbulent flow, CFD, partial load.

1- مقدمة:

تصمم العنفات المائية عادة للعمل عند نقطة الكفاءة العظمى BEP. لكن عدم انتظام متطلبات سوق الطاقة، والتغير في الطلب على الطاقة وزيادة مساهمة الطاقة المتجددة تدفع جميعها بالعنفات المائية للعمل عند ظروف خارج الحدود التصميمية مع تزايد في حالات العمل/التوقف. من ناحية أخرى، معظم العنفات المائية المستخدمة أصبحت قديمة وتحتاج للتجديد. يجب تحسين كل من استطاعة الخرج، الكفاءة ومجال العمل لمحطات الطاقة المائية التي يتم تجديدها نسبة للمحطات القديمة. بسبب تكاليف رأس المال لعملية الإنشاء، عادة ما يعاد تصميم شفرات الدوار وشفرات التوجيه. قد يؤدي إهمال تجديد الغلاف الحلزوني وأنبوب التصميم لحصول جريان غير مستقر، خاصة في أنبوب التصريف. يحصل الجريان غير المستقر في أنبوب التصريف غالباً عند ظروف العمل خارج النقطة التصميمية. لذلك، قد تسمح الدراسة الدقيقة للعنفات العاملة خارج حدود التصميم بإعادة تصميمها ضمن مقدرة تشغيلية أوسع [1].

يركب أنبوب التصريف عند مخرج دوار العنفة المائية لتحويل الطاقة الحركية المتبقية لطاقة ضغط. قد يحصل ما يصل إلى 50% من الضياعات في أنبوب التصريف منخفض الضغط لذلك غالباً ما تتأثر كفاءة العنفات منخفضة الارتفاع ذات الشفرات الثابتة بأداء أنبوب التصريف. تعدل كمية الدوران في مخرج الدوار لتجنب انفصال التيار عند زوايا مخروط تصل حتى 14° . عند ظروف الحمولة الجزئية، تزداد كمية الدوران عند مخرج الدوار مما يؤدي لتفكك الدوامة والذي يتصف بوجود منطقة منخفضة السرعة، والتي قد تتميز بحركة دورانية أحياناً، وذلك في المنتصف وفي خيط الدوامة الدائر RVR. تظهر تذبذبات ضغط منخفضة التردد وكبيرة المطال في أنبوب التصريف. يبدو أن RVR سيتشكل مع إجهاد قص مرتفع في السطح الفاصل بين منطقة إعادة الدوران وباقي الجريان [2-4]. لوحظ وجود نوعان من RVR في أنابيب تصريف عنفات فرنسيس [5]. يحصل النوع الحلزوني عند أقل من 60% من الحمولة الكلية. عند حمولات جزئية أعلى (حتى 85%)؛ قد تحصل ظاهرة تفكك الدوامة وقد يتغير نوع RVR الحلزوني لنوع فقاعي. يشكل النوع الفقاعي تذبذبات ضغط أكثر شدة في أنبوب التصريف

وقد يضر بكامل بنية العنفة. كذلك، يقلل وجود منطقة إعادة الدوران عند الحمل الجزئي مع RVR من أداء العنفة، مما يقلل المنطقة المتاحة للناشر ويزيد من السرعة المحورية للجريان بالقرب من الجدران. سيزيد تدرج السرعة الكبير وعدم انتظام الجريان بالقرب من الجدار من الضياعات الهيدروليكية.

تزايد استخدام ميكانيك الموائع الحسابي CFD بشكل كبير بهدف فهم حقل الجريان في العنفات المائية، وكذلك بهدف تصميم المنشآت الحديثة [9-6]. الاستقرار الهيدروليكي في مجال العمل هو أساس التصميم الجديدة.

ركزت الدراسات السابقة حول الجريان غير المستقر في أنبوب التصريف على العلاقة بين التذبذبات منخفضة التردد ودوران RVR [12-10]. درس القليل منها بنية الجريان في أنبوب التصريف بوجود RVR أو خلال تشكل RVR [5, 13-17].

درس [5] Zhang et al عدديا الجريان غير المستقر داخل أنبوب التصريف لعنفة فرنسيس خلال ظروف الحمل الجزئي. وجد أن الجريان المحوري المعكوس في مخروط الدخول هو السبب في عدم الاستقرار للجريان الدائر. استمر انعكاس الجريان على كامل مقطع الكوع. تم توضيح بنية الجريان باستعمال معيار Δ . يمكن التحكم بتذبذبات الضغط بحقن تيار من مخروط الدوار. طور [13,14] Foroutan and Yavuzkurt نموذج اضطراب بمتوسط جزئي لمعادلات نافير ستوكس PANS وبينوا أن استعمال نموذج اضطراب PANS للتنبؤ بسلوك الجريان يحسن من التنبؤ بعامل استرجاع الضغط وتذبذبات الضغط خاصة عند ظروف الحمولة الجزئية. استخدموا سطوح تساوي الضغط لبيان بنية RVR.

مؤخرا، درس [15-17] Javadi and Nilsson بنية الجريان وتذبذبات الضغط في أنبوب تصريف عنفة كابلان عند BEP، Porjus U9. تم تصوير بنية الجريان باستعمال معيار Q. بينوا أن الدوامة القسرية في مركز أنبوب التصريف محاطة بدوامة من سرة العنفة. مع أن حقل السرعة الحاصل بالقرب من الدوار كان بصورة مقاربة للقياسات التجريبية، إلا أنه لوحظ وجود انحراف بعد الدوار. يجب استخدام نموذج

RANS_LES هجين بهدف التنبؤ ببنية الجريان الرئيسي وبنية الدوامة كما أوصت هذه المحاكاة. تبين أن حقن تيار من مخروط الدوار كان فعالا للتحكم بوجود RVR.

تجري عدة أبحاث تجريبية وعددية في جامعة لوليا التقنية حول بنية الجريان، عدم الاستقرار والاهتزاز في أجزاء مختلفة من عنفة كابلان [3, 4, 18-20] Porjus U9. أجريت كامل الدراسات السابقة تثريبا عند نقطة BEP. تذبذبات الضغط في أنبوب تصريف عنفة كابلان العاملة كدوار هو الأكثر تعقيدا نتيجة التفاعل بين دوامة الطرف والجدران الساكنة حولها [19, 20]. من ناحية أخرى، تصبح تذبذبات الضغط منخفضة التردد هي المسيطرة عند ظروف الحمل الجزئية. لذلك، طبيعة وسبب تذبذب الضغط وطرق التحكم بها عند الحمل الجزئية هما العاملين الحاسمان اللذان يجب التحكم بهما.

لم تتمكن الدراسات السابقة حول تحديد الدوامة في أنبوب تصريف كابلان من التمييز الدقيق لبنية RVR. لذلك، حاول الباحث تحديد بنية الجريان الدوراني في أنبوب تصريف كابلان والآلية التي تدفع لتشكيل RVR. العمل الحالي هو خطوة أولى حول الدراسة العددية لأنبوب تصريف كابلان عند الحمل الجزئية وهي مخصصة للحركة غير المستقرة في RVR. تعرض الفقرة 2 المعادلات الحاكمة للجريان. تعرض الفقرات 3 و4 النموذج الفيزيائي المعتبر والطريقة العددية، على التوالي. خصصت الفقرة 5 لمناقشة نتائج المحاكاة والاستنتاجات.

2- المعادلات الحاكمة والنموذج الرياضي

معادلات النقل الرئيسية للجريان ثابت درجة الحرارة غير القابل للانضغاط هي المعادلات المعتبرة. يطبق فلتر وسطي زمني عام لمعادلات نافير ستوكس في الحالة غير المستقرة وبالتالي تكون المعادلات الناتجة هي:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \\ & = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \\ & \quad - \frac{\partial (\overline{\rho u'_i u'_j})}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (2)$$

حيث \bar{u}_i هو المتوسط الزمني للسرعة، u' هو تذبذب السرعة، ρ هو المتوسط الزمني للضغط، μ و ρ هما كثافة الجريان ولزوجته، على الترتيب. الحدود الأخيرة في الجهة اليمنى من المعادلة (2) هي تنسور إجهادات رينولدز وتحتاج لمعادلات إضافية لحلها.

يستخدم نموذج اللزوجة الدوامية في المقالة الحالية لحل تنسور إجهاد رينولدز. لذلك، يمكن كتابة المعادلة الإضافية لحل تنسور إجهاد رينولدز بالشكل التالي:

$$-\rho(\overline{u'_i u'_j}) = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

حيث μ_t هي اللزوجة الدوامية، k الطاقة الحركية الوسطية للاضطراب و S_{ij} هو تنسور الانفعال الوسطي. تعرف الطاقة الوسطية الحركية ومعدل الانفعال الوسطي بالمعادلات (4) و(5).

$$k = \frac{1}{2} \overline{(u'_i u'_i)} \quad (4)$$

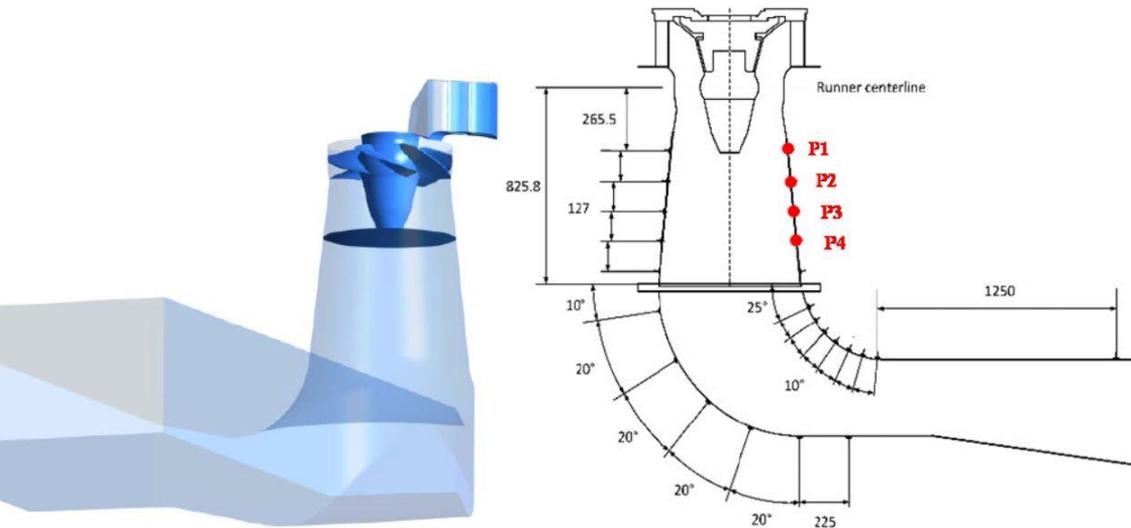
$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

بهدف حساب اللزوجة الدوامية استخدم نموذج الاضطراب SST-SAS وهو نقل إجهاد القص – محاكاة تكيفية المقياس [21]. في نموذج SST-SAS، تحل معادلتان لكل من k و ω (معدل التبدد النوعي) مع حد مصدر إضافي في معادلة ω . يبنى تطوير SAS لنموذج SST على استخدام مقياس الطول لفون كارمان كمقياس طول

للاضطراب وهذا ما يعطي المقدرة على نمذجة عدم الاستقرار في نموذج SST تقليدي. يقدم استعمال SAS للجريان غير المستقر تحسناً في النتائج بالمقارنة مع الطرق القديمة [22]. يمكن الحصول على صياغة SST_SAS في [21, 22].

3- النموذج الفيزيائي

بني نموذج بمقياس 1:3.1 من عنفة كابلان Porjus U9 في معهد Vattenfall ومنشأة التطوير VRE في Alvkarleby، السويد. للعنفة النموذج قطر بقيمة 0.5m. الارتفاع التشغيلي، التصريف وزوايا التوجيه للعنفة عند الحمل الجزئي هي 7.5m، $0.62\text{m}^3/\text{s}$ ، و 20° ، على الترتيب. سرعة الدوار ثابتة عند $N=696.3\text{rpm}$. أجريت قياسات السرعة باستعمال جهاز دوبلر ليزري بمركبتين LDA من Dantec. ركبت العنفة بين خزائين مضغوطين، مما أعطى مقدرة الحصول على ارتفاعات تشغيلية مختلفة. تفاصيل القياسات ومحطة الاختبار موجودة في [3, 4, 18]. يوضح الشكل 1 مواقع القياسات والشكل المستخدم لأنبوب تصريف U9.



الشكل 1 الشكل المعتبر، القرص أسفل الدوار يمثل الدوار نفسه - التماس مع أنبوب التصريف. استخدمت قياسات الضغط في هذه المقالة هي أول 4 من جانب مخروط أنبوب التصريف.

4 الطريقة العددية

4.1 الشكل الهندسي والشبكة

باتباع عمل [23] Melot et al، تكون الشكل الهندسي المعتبر في النمذجة من شفرة ثابتة واحدة، شفرة توجيه واحدة، الدوار كاملا وأنبوب التصريف. بهدف المحاكاة الدقيقة للجريان بالقرب من مخروط الدوار، امتد نطاق الدوار لتحت مخروط الدوار. الدوار ممثل بالقرص أسفله – التماس مع أنبوب التصريف.

ولدت الشبكة باستعمال برنامج ANSYS – ICEM. استخدمت العناصر سداسية الوجوه لضمان المحاكاة الدقيقة للجريان الدوراني المضطرب، خاصة بالقرب من جدران أنبوب التصريف.

كان العدد الإجمالي لخلايا الشبكة كاملة 2.6×10^6 . عدد خلايا الشفرة الثابتة وشفرة التوجيه، الدوار وأنبوب التصريف هو 0.3×10^6 ، 1.3×10^6 ، و 1×10^6 ، على الترتيب. للشبكة سطحي تماس بين النطاقات الثابتة (شفرة ثابتة/شفرة توجيه وأنبوب التصريف) والنطاق الدوار (الدوار). بهدف المحاكاة الدقيقة للجريان غير المستقر بين النطاقات، تعامل التماس العام للشبكة GGI مع الربط بينها. خلال المحاكاة، تنزلق المنطقة الدوارة للخلايا نسبة للمنطقة الثابتة، وتحسب تدفقات التماس بناء على الخليتين المجاورتين.

4.2 الشروط الحدية

استنتج الشرط الحدي للدخول عند الشفرة الثابتة من المحاكاة الدورانية الكلية. تم ضبط التدفق وزاوية الجريان مع قيمة 5% لشدة الاضطراب عند المدخل. طبق شرط عدم الانزلاق أيضا على الشروط الحدية للجدران. قيمت قيم الاضطراب بالقرب من الجدران باستعمال تابع الجدار القياسي. اعتبر ضغط صفري عند مخرج أنبوب التصريف باعتباره مفتوحا.

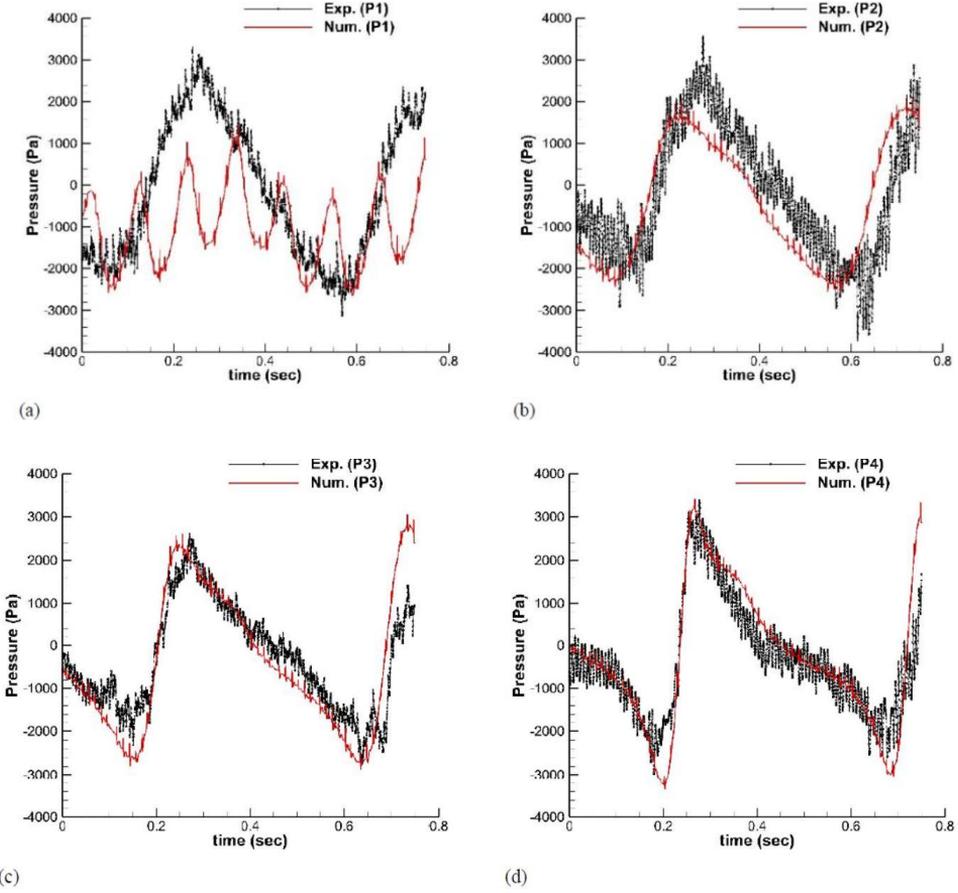
4.3 منهجية الحل

استخدم البرنامج التجاري ANSYS-CFX لحل الجريان غير المستقر. أجريت المحاكاة غير المستقرة بخطوة زمنية بقيمة 3×10^{-4} s. قطعت حدود الحمل والانتشار باستعمال التباين المرتفع high resolution وطريقة التفريق المركزي central difference، على الترتيب. بهدف التحكم بكميات الاضطراب خلال المحاكاة، استخدمت طريقة upwind لتقطيع معادلات الاضطراب. كان زمن المحاكاة الكامل 8.5s. كانت قيم الجذر الوسطي التربيعي RMS للرواسب في مرحلة التقارب في كل خطوة زمنية أقل من 10^{-5} .

5 النتائج والمناقشة

5.1 التحقق

بهدف التحقق من المحاكاة العددية للجريان الدوراني داخل أنبوب التصريف، تمت مقارنة الضغط مع القياسات التجريبية عند أربع نقاط خلال دور واحد من RVR. المقارنة موضحة في الشكل 2 (a) حتى (d). التوافق بين النتائج العددية والقياسات التجريبية ضعيف عند أول مقياس للضغط. يتوضع مقياس الضغط هذا فوق سطح التماس بين الدوار - أنبوب التصريف، حيث تخدم تذبذبات الضغط في أنبوب التصريف. يظهر سطح التماس في الشكل 1. فوق سطح التماس، يكون النطاق هو النطاق الدوار في حين يعتبر النطاق أسفل السطح هو النطاق الثابت. استخدم التماس المنزلق كشرط حدي بين النطاقين. يجب أن ينتقل تذبذب الضغط لأنبوب التصريف من النطاق الثابت للنطاق الدوار. خلال الانتقال، تخدم تذبذبات الضغط في أنبوب التصريف. تغيرات الضغط الأخرى متوافقة مع النتائج التجريبية. حددت فترة RVR تجريبيا بقيمة 0.492s. كانت النتيجة الحاصلة عدديا 0.488s.



الشكل 2 مقارنة تذبذبات الضغط عند مواقع مختلفة في أنبوب التصريف، (a) النقطة 1، (b) النقطة 2، (c) النقطة 3، (d) النقطة 4.

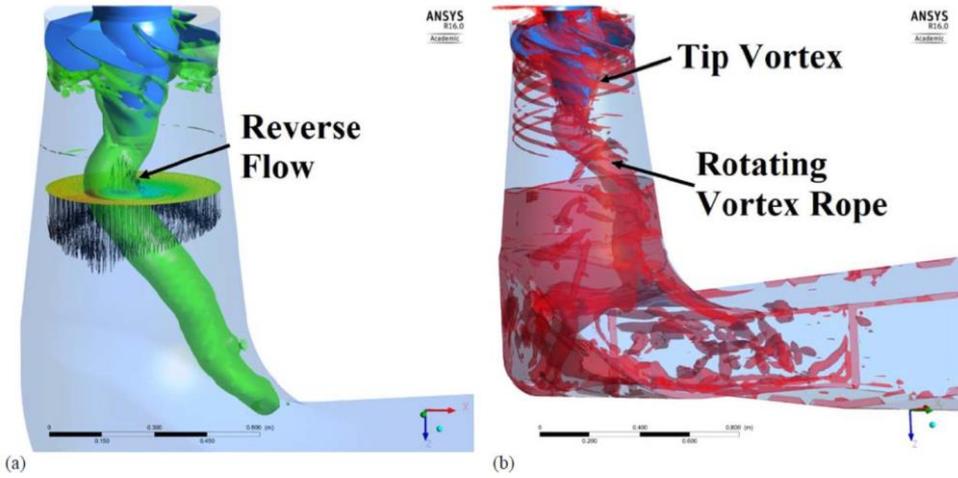
5.2 بنية الجريان

استخدمت ثلاثة معايير معروفة، معيار Q ، معيار Δ ، ومعيار λ_2 لإظهار البنية الدورانية للجريان [24-26]. في العمل الحالي استخدم معيار λ_2 لمقدرته على تحديد نواة الدوامة. يبنى معيار λ_2 على القيمة الذاتية الكبرى الثانية للنتسور $S^2 + \Omega^2$ حيث S و Ω هي الأجزاء المتناظرة وغير المتناظرة لنتسور تدرج السرعة. ترتبط القيمة السالبة للمعيار λ_2 بمنطقة نواة الدوامة.

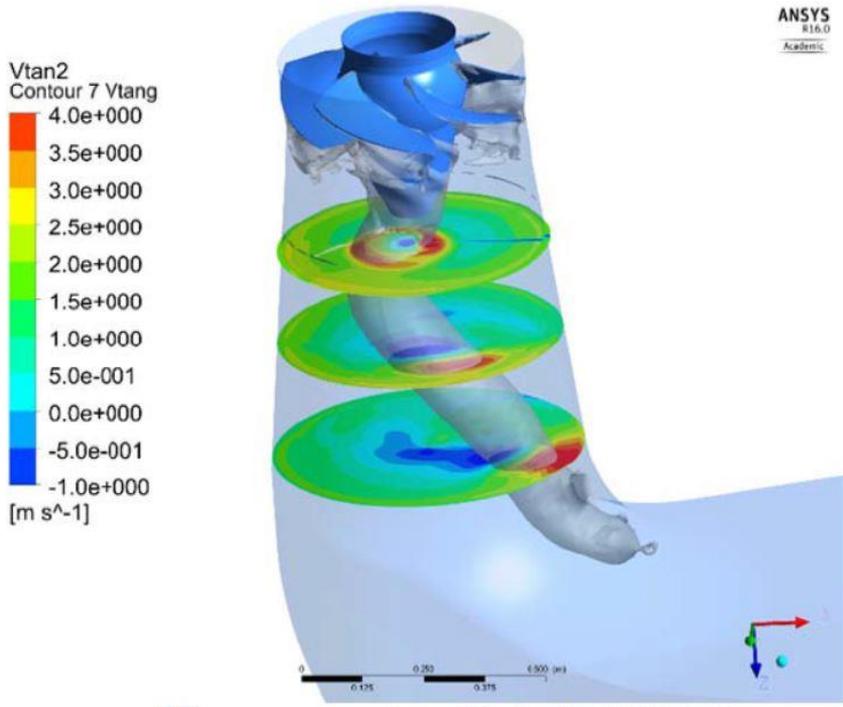
تقدم الأشكال 3(a) و 3(b) تحديد بنية الجريان الدوراني داخل أنبوب التصريف باستعمال معيار الضغط الأدنى ومعيار λ_2 ، على الترتيب. مع أن معيار الضغط الأدنى يحدد بنية RVR، إلا أن الطريقة ليست قادرة على التمييز بين مختلف الدوامات داخل أنبوب التصريف. يمكن ملاحظة بنيتين دواميتين في الشكل 3(b). دوامة الطرف والتي تتشكل نتيجة دوران الدوار وبنية RVR. لدوامة الطرف تردد الدوار وتشكل مطال صغير لتذبذبات الضغط (الشكل 2(a))، لكن RVR لها تردد صغير وتشكل تذبذبات ضغط أكبر (الشكل 2(d)). محور الدوران وامتداد RVR لقسم الكوع موضحة جيدا في معيار λ_2 . تجدر الإشارة إلى أن البنية واضحة في هذه الطريقة بما يتفق مع طرق الإظهار باستعمال حقن الهواء [4].

تظهر أشعة السرعة في قسم مخروط الدخول. يمكن ملاحظة إعادة التدوير المتشكلة بسبب RVR بالقرب من محور دوران RVR. تخفف مناطق إعادة الدوران من تأثير الناشر وتقلل من كفاءة أنبوب التصريف الإجمالية.

تظهر سطوح السرعة المماسية عند مقاطع عرضية محورية مختلفة في الشكل 4. يشكل دوران RVR قمم ودينا في السرعة المماسية. تصبح السرعة المماسية في منطقة السرعة الدنيا سالبة في حين يكون للسرعة المماسية في الجريان الكلي قيمة موجبة. لذلك، تكون سرعة دوران RVR مختلفة عن كامل الجريان. يعمل RVR كالدوار يتحرك على صفيحة دوارة. تعتمد حركة RVR على التفاعل بين جريانيين دوارين (أي RVR والجريان الإجمالي). يجب على طرق التحكم في RVR أن تقرب مركز الدوار لمركز دوران الصفيحة الدوارة أو مزامنة سرعتي الدوران.



الشكل 3 بنية الجريان داخل أنبوب التصريف محددة من خلال (a) سطوح تساوي الضغط (b) سطوح تساوي λ_2



الشكل 4 سطوح السرعة الزاوية عند مقاطع مختلفة من أنبوب التصريف، موضع RVR من خلال سطوح تساوي الضغط.

6 الاستنتاجات

أجري تحليل غير مستقر بالحالة العابرة للجريان الدوار ضمن أنبوب تصريف عنفة كابلان U9 باستعمال المحاكاة العددية. نتائج المحاكاة العددية متوافقة مع القياسات التجريبية خاصة بعد الدوار. لذلك، المحاكاة باستعمال النمط غير المستقر بنموذج SST معدل قادرة على التنبؤ بعدم الاستقرار في الجريان ضمن أنبوب التصريف ويمكن استخدامها للدراسة الإضافية للعنفة عند الحمولة الجزئية. تظهر النتائج العددية أن حركة RVR في أنبوب التصريف تشكل تذبذبات ضغط منخفضة التردد ضمن أنبوب تصريف كابلان بشكل مماثل لأنبوب تصريف فرنسيس. حددت بنية RVR بواسطة معيار λ_2 ويبدو أن RVR قد يمتد لما بعد كوع أنبوب التصريف. كذلك، ظهرت دوامة الطرف المتشكلة نتيجة التفاعل بين الدوار والفراغ. تتبدد دوامة الطرف بعد الدوار ويتحكم RVR بالجريان الدوراني داخل أنبوب التصريف. أي تغيرات في بنية الجريان التي تتحكم بحركة RVR الدورانية، قادرة على تخفيض التذبذبات منخفضة التردد في الضغط. يجب أن يكون التعديل بتقديم المياه من دوار كابلان والذي سيتم اعتباره كدراسة لاحقة.

المراجع

- [1] S. Mauri, "Numerical simulation and flow analysis of an elbow diffuser," 2002.
- [2] U. Andersson, *An experimental study of the flow in a sharp-heel Kaplan draft tube*: Luleå tekniska universitet, 2009.
- [3] P. Jonsson, *Flow and pressure measurements in low-head hydraulic turbines*: Luleå tekniska universitet, 2011.
- [4] B. Mulu, "An experimental and numerical investigation of a Kaplan turbine model," 2012.
- [5] R.-k. Zhang, F. Mao, J.-Z. Wu, S.-Y. Chen, Y.-L. Wu, and S.-H. Liu, "Characteristics and control of the draft-tube flow in part-load Francis turbine," *Journal of fluids engineering*, vol. 131, p. 021101, 2009.
- [6] P. Drtina and M. Sallaberger, "Hydraulic turbines—basic principles and state-of-the-art computational fluid dynamics applications," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 213, pp. 85–102, 1999.
- [7] A. Ruprecht, M. Heitele, T. Helmrich, W. Moser, and T. Aschenbrenner, "Numerical simulation of a complete Francis turbine including unsteady rotor/stator interactions," in *Proceedings*

of the 20th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2000, pp. 1–8.

[8] A. Ruprecht, T. Helmrich, T. Aschenbrenner, and T. Scherer, "Simulation of vortex rope in a turbine draft tube," in *Proceedings of 22nd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, 2002, pp. 9–12.

[9] P. Ko and S. Kurosawa, "Numerical simulation of turbulence flow in a Kaplan turbine–Evaluation on turbine performance prediction accuracy," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014., p. 022006.

[10] R. Susan–Resiga, G. D. Ciocan, I. Anton, and F. Avellan, "Analysis of the swirling flow downstream a Francis turbine runner," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 128, pp. 177–189, 2006.

[11] S. Liu, S. Li, and Y. Wu, "Pressure fluctuation prediction of a model Kaplan turbine by unsteady turbulent flow simulation," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 131, p. 101102, 2009.

[12] Y. Wu, S. Liu, H.–S. Dou, S. Wu, and T. Chen, "Numerical prediction and similarity study of pressure fluctuation in a prototype Kaplan turbine and the model turbine," *Computers & Fluids*, vol. 56, pp. 128–142, 2012.

[13] H. Foroutan and S. Yavuzkurt, "A partially–averaged Navier–Stokes model for the simulation of turbulent swirling flow with vortex breakdown," *International Journal of Heat and Fluid Flow*,

vol. 50, pp. 402–416, 2014. 28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems (IAHR2016) IOP Publishing IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 49 (2016) 022008 doi:10.1088/1755–1315/49/2/0220087

[14] H. Foroutan and S. Yavuzkurt, "Unsteady Numerical Simulation of Flow in Draft Tube of a Hydroturbine Operating Under Various Conditions Using a Partially Averaged Navier–Stokes Model," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 137, p. 061101, 2015.

[15] A. Javadi and H. Nilsson, "Unsteady numerical simulation of the flow in the U9 Kaplan turbine model," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, p.022001.

[16] A. Javadi and H. Nilsson, "Active Flow Control of Vortex Rope in a Conical Diffuser," in *IAHR WG Meeting on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems*, 2015.

[17] A. Javadi and H. Nilsson, "Time–accurate numerical simulations of swirling flow with rotorstator interaction," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 95, pp. 755–774, 2015.

[18] K. Amiri, "An experimental investigation of flow in a Kaplan runner steady–state and transient," 2014.

[19] B. Mulu, P. Jonsson, and M. Cervantes, "Experimental investigation of a Kaplan draft tube– Part I: Best efficiency point," *Applied Energy*, vol. 93, pp. 695–706, 2012.

- [20] P. Jonsson, B. Mulu, and M. Cervantes, "Experimental investigation of a Kaplan draft tube– Part II: Off–design conditions," *Applied Energy*, vol. 94, pp. 71–83, 2012.
- [21] F. Menter and Y. Egorov, "A scale–adaptive simulation model using two–equation models," *AIAA paper*, vol. 1095, p. 2005, 2005.
- [22] Y. Egorov and F. Menter, "Development and application of SST–SAS turbulence model in the DESIDER project," in *Advances in Hybrid RANS–LES Modelling*, ed: Springer, 2008, pp. 261–270.
- [23] M. Melot, B. Nennemann, and N. Désy, "Draft tube pressure pulsation predictions in Francis turbines with transient Computational Fluid Dynamics methodology," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014.
- [24] J. C. Hunt, A. Wray, and P. Moin, "Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows," 1988.
- [25] M. Chong, A. E. Perry, and B. Cantwell, "A general classification of three- dimensional flow fields," *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989–1993)*, vol. 2, pp. 765–777, 1990.
- [26] J. Jeong and F. Hussain, "On the identification of a vortex," *Journal of fluid mechanics*, vol. 285, pp. 69–94, 1995. 28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems (IAHR2016) IOP Publishing IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 49 (2016) 022008 doi:10.1088/1755–1315/49/2/0220088

