University of Mosul

College of Engineering

Computational Fluid Dynamics of Turbulent Channel Flow Using Algebraic Pre-Stress Closure

M.Sc. Thesis in

Mechanical Engineering

Presented by

Jassim Mohammed Jassim Abd

Supervised by

Asst. Prof. Dr. Abdul Rahman Habbo Mohammed

Lect. Dr. Younis Mahal Najim

2023 A.D **1444 H.D**

ABSTRACT

Turbulent flow, characterized by random, chaotic and three-dimensional fluid motion, is a common occurrence in many engineering applications, such as aerospace, wind turbines, hydroelectric power plants, and chemical mixing processes. In these applications and others, the turbulent flows often involve complex geometries, multiple scales of motion, and nonlinear interactions, which make it challenging to simulate and predict turbulent flow behavior accurately. As a result, turbulence modeling plays a crucial role in these applications by providing an efficient and cost-effective way to model the complex physics of turbulent flows.

Several turbulence models have been developed and are commonly used in computational fluid dynamics (CFD) simulations to predict the behavior of turbulent flows. However, most of these models are based on the Boussinesq approximation, which assumes that the Reynolds stresses are proportional to the mean velocity gradients. The Boussinesq assumption simplifies the turbulence modeling process by allowing the Reynolds stresses to be represented by the mean velocity gradients, and the proportionality constant is known as the turbulent viscosity.

A team of researchers lead by Dr. Charles Petty at Michigan State University have recently come up with an innovative Universally, Realizable, Algebraic Pre-Stress closure called (URAPS). This new model relies on robust representation of turbulent stresses based on physical and mathematical operation while the current turbulence models are based on Relationship between Reynolds stress and velocity gradient through eddy viscosity. The model has not coupled to CFD

solver yet. This study is the first attempt to include the URAPS turbulence model into CFD solver of the turbulent channel flow as a benchmark case. In-house MATLAB code is built in this work to solve the two-dimensional, incompressible, RANS equations. The code solves the transport equations of k-ε model for validation reasons and to make sure that the solver predicts the turbulence structure before replacing the k-ε with the URAPS model. As preliminary test cases, the Reynolds number is varied from 6000 to 12000, and the turbulent kinetic energy generated by k-ε model for each case is used in the URAPS subprogram to predict the normalized Reynolds stress tensor.

The CFD solver accurately predicted the flow structure in the fully developed turbulent channel flow and for all Reynolds numbers. The velocity, pressure, turbulent kinetic energy, and turbulent dissipation are all aligned with physics and supported by literature data. The normalized Reynolds stress component $\overline{u'u'}/2k$ increases as it moves away from the channel wall during which the turbulent kinetic energy decreases while the component $\overline{v'v'}/2k$ exhibits a reverse behavior. The normal components of the Reynolds stress tensor are approaching same value of 0.333 close to channel walls which confirm that the turbulent kinetic energy become equally distributed among the three components of the fluctuating velocity at this region.

جامعة الموصل

كلية الهندسة

ديناميكية المائع الحسابية للجريان المضطرب في قناة باستخدام نموذج جبري مسبق الاجهاد

رسالة تقدم بها

جاسم محمد جاسم عبد العيسى

الى

مجلس كلية الهندسة في جامعة الموصل وهي جزء من متطلبات نيل شهادة

الماجستير علوم

في الهندسة الميكانيكية

بإشراف

أ. م. د. عبد الرحمن حبو محمد

م. د. يونس محل نجم

١٤٤٤ هـ ٢٠٢٣م

الخلاصة

يعد التدفق المضطرب، الذي يتميز بحركة السوائل العشوائية والفوضوية، أمرًا شائعًا في العديد من التطبيقات الهندسية مثل الطيران، وتوربينات الرياح، ومحطات الطاقة الكهرومائية، وعمليات الخلط الكيميائي. في هذه التطبيقات وغيرها، غالبًا ما تشتمل التدفقات المضطربة على أشكال هندسية معقدة، ومقاييس متعددة للحركة، وتفاعلات غير خطية، مما يجعل من الصعب محاكاة سلوك التدفق المضطرب والتنبؤ به بدقة. نتيجة لذلك، تلعب نمذجة الاضطراب دورًا حاسمًا في هذه التطبيقات من خلال توفير طريقة فعالة وفعالة من حيث التكلفة لنمذجة الفيزياء المعقدة للتدفقات المضطربة.

تم تطوير العديد من نماذج الاضطراب وهي شائعة الاستخدام في محاكاة ديناميكيات السوائل الحسابية (CFD) للتنبؤ بسلوك التدفقات المضطربة. ومع ذلك فإن معظم هذه النماذج تستند إلى تقريب Boussinesq، والذي يفترض أن إجهادات رينولدز تتناسب مع متوسط تدرجات السرعة. يبسط افتراض Boussinesq عملية نمذجة الاضطراب من خلال السماح بتمثيل ضغوط رينولدز بمتوسط تدرجات السرعة ويعرف ثابت التناسب باللزوجة المضطربة.

توصل مؤخرًا فريق من الباحثين بقيادة تشارلز بيتي في جامعة ولاية ميشيغان إلى إغلاق جبري مبتكر عالميًا وقابل للتحقيق قبل الإجهاد يسمى (URAPS). يعتمد هذا النموذج الجديد على التمثيل القوي للضغوط المضطربة على أساس العملية الفيزيائية والرياضية بينما تستند نماذج الاضطراب الحالية على اللزوجة الدوامية التي تربط الضغوط المضطربة بمتوسط إجهاد التدفق دون أي صلة مادية. لم يقترن النموذج بحل CFD حتى الآن. هذه الدراسة هي المحاولة الأولى لتضمين نموذج اضطراب URAPS في محلل CFD لتدفق القناة المضطربة كحالة مرجعية. تم إنشاء كود MATLAB الداخلي في هذا العمل لحل معادلات Navier-Stokes ثنائية الأبعاد وغير القابلة للضغط والمطورة بالكامل. يحل الكود معادلات النقل لنموذج k-ε لأسباب تتعلق بالتحقق من الصحة وللتأكد من أن المحلل يتوقع بنية الاضطراب قبل استبدال k-ε بنموذج URAPS. كحالات اختبار أولية، يتنوع رقم رينولدز من ٦٠٠٠ إلى ١٢٠٠٠ ويتم استخدام الطاقة الحركية المضطربة الناتجة عن نموذج k-ε لكل حالة في البرنامج الفرعي URAPS للتنبؤ بموتر إجهاد رينولدز الطبيعي.

تنبأ محلل CFD بدقة ببنية التدفق في تدفق القناة المضطرب المطور بالكامل ولجميع أرقام رينولدز. تتماشى السرعة والضغط والطاقة الحركية المضطربة والتبديد المضطرب مع الفيزياء وتدعمها بيانات الدراسات. يزيد مكون إجهاد رينولدز الطبيعي $(\overline{u'u'}/2k)$ أثناء تحركه بعيدًا عن جدار القناة الذي تنخفض خلاله الطاقة الحركية المضطربة بينما يُظهر المكون $(\overline{v'v'}/2k)$ سلوكًا عكسيًا. تقترب المكونات الطبيعية لموتّر الإجهاد رينولدز من نفس القيمة والبالغة ٠,٣٣٣ بالقرب من جدران القناة مما يؤكد أن الطاقة الحركية المضطربة تصبح موزعة بالتساوي بين المكونات الثلاثة للسرعة المتنبذبة في هذه المنطقة.