

شبیه‌سازی جریان لزج سه بعدی در توربین فرانسیس مختلط

ابراهیم شیرانی
محمود اشرفی زاده
سید محمدرضا سعیدی
استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان
استادیار دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان
کارشناس ارشد دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

توربین فرانسیس یکی از پرکاربردترین نوع توربین‌های هیدرولیکی در نیروگاه‌های آبی است. در این مقاله ضمن ارائه روابطی برای تعیین شکل تقریبی قسمت گردنده یک توربین فرانسیس، شبیه‌سازی و بررسی جریان در قسمت گردنده و نیز جریان در قسمت گردنده همراه با لوله خروجی^(۱) پرداخته می‌شود. ابتدا با توجه به روابط تجربی، شکل گذرگاه جریان در قسمت گردنده را به طور مقدماتی تعیین و با استفاده از اطلاعات ورودی مسئله (هد، دور محور و دبی جریان) و نیز شکل هندسی قسمت گردنده، شکل پره‌های متحرک به دست می‌آید، سپس معادلات سه بعدی جریان تلاطم و تراکم‌ناپذیر به شکل عددی حل می‌شوند. مدل تلاطم استفاده شده، مدل k-ε استاندارد است. روش حل عددی، یک روش فشار مینا است که مؤلفه‌های سرعت و فشار در آن کوپله شده و در یک شبکه هم مکان^(۲) حل می‌شوند. برنامه کامپیوتری مورد استفاده، یک نرم‌افزار تجاری می‌باشد. با استفاده از این نرم‌افزار ابتدا یک شبکه سه‌بعدی به روش جبری طراحی می‌شود، سپس جریان در قسمت گردنده با پره‌هایی که شکل آنها از روابط تجربی و تشابه به دست می‌آید مورد تجزیه و تحلیل قرار داده می‌شود. بالاخره جریان در قسمت گردنده همراه با لوله کشش مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که می‌توان از طریق این روش و برنامه حاضر، جریان در توربین‌های فرانسیس را تحلیل و مسایلی نظیر کاویتاسیون، جدایش جریان و بهینه کردن شکل قسمت گردنده را بررسی کرد.

کلمات کلیدی: توربو ماشین، حل سه بعدی جریان، توربین فرانسیس، کاویتاسیون و بهینه‌سازی

Three Dimensional Viscous Flow Simulation in a Mixed-Francis Turbine

E. Shirani, M. Ashrafizadeh and S. M. R. Saeedi
Dept. of Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran

Abstract

Francis turbines are one of the most popular turbines used in hydraulic power plants. In this paper, several relations are introduced to determine the approximate shape of the turbine runner and then the fluid flows inside the runner as well as the draft tube are numerically simulated. First, an approximate shape for the runner passage (i.e. hub and shroud profiles) is determined which is based on experimental data and then using the provided data for H, Q and N the runner blades are designed. Flow simulations are based on the 3D Solution of the Navier-Stokes equations for incompressible turbulent flows. A commercially available CFD code is used for the numerical simulation. The numerical results for flows inside the turbine runner and the draft tube indicate the capability of the code for such flow simulations and show that such utilities could be used to numerically investigate complicated phenomena such as cavitation and separation inside turbomachines. In addition, these CFD codes could be used in shape optimization for turbine blades.

Key words: Turbomachines, 3D flow simulation, Francis turbine, Cavitations, Optimization

1- Draft tube
2- Collocated grid

[]

[]

CFD

TASCFLOW

()

(i)

(e)

[]

$$\frac{y}{y_m} = 3.08 \left(1 - \frac{x}{l}\right) \sqrt{\frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right)} \quad () \quad S \quad []$$

) S (

(

$$e \quad i \quad 1 \quad y_m$$

n_s

[]

$$b_o = 0.8(2 - n_s)n_s$$

[]

$$r_{oi} = y_{mi} = 0.7 + \frac{0.5}{n_s + 0.8}$$

[]

$$r_{oe} = \frac{0.493}{n_s^{\frac{2}{3}}} \quad n_s < 0.275$$

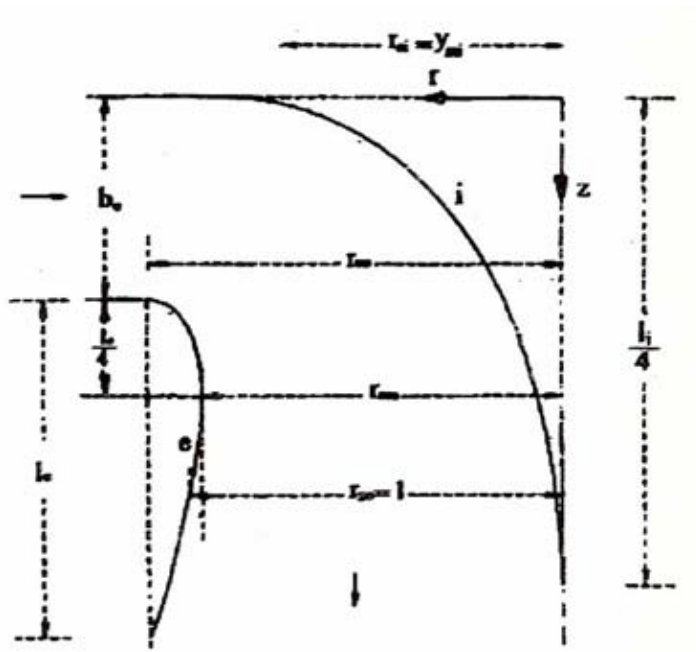
$$r_{oe} = 1.255 - 0.3n_s \quad n_s > 0.275$$

[]

$$l_i = 3.2 + 3.2(2 - n_s)n_s$$

$$l_e = 2.4 - q(2 - n_s)n_s$$

$$\begin{aligned} y_{2e} &= r_{oe} - 1 \\ x_{2e} &= 0.5 \end{aligned} \quad ()$$



r_{2e}

$$r_{2e} = \left(\frac{Q}{\pi} \frac{1}{NQ_{2e}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad ()$$

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad ()$$

Q

Q_{2e}

N

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} + S_{ui} \end{aligned} \quad ()$$

(α)

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_\tau \quad ()$$

$$\mu_\tau = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad ()$$

$$d_i = \frac{\nabla_i}{a_{pi}} \quad () \quad \varepsilon \quad k \quad \varepsilon \quad k \quad S_{ui}$$

: e ()

$$u_e = d_e \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_e + \hat{u}_e \quad ()$$

d u

:

$$\hat{u}_e = \frac{1}{2}(\hat{u}_i + \hat{u}_{i+1}) \quad ()$$

W, P, E
w, p, e

p i

$$d_e = \frac{1}{2}(d_i + d_{i+1}) \quad ()$$

:

$$\left(\sum_{np} \rho_{np} u_{np} \cdot A_{np} \right)_i = 0 \quad \rho A u_e - \rho A u_w = 0 \quad ()$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_e = \frac{P_{i+1} - P_i}{\Delta x_e} \quad ()$$

np A u ρ

: ()

w e

$$u_e = \frac{1}{2}(\hat{u}_i + \hat{u}_{i+1}) + \frac{1}{2}(d_i + d_{i+1}) \left(\frac{P_{i+1} + P_i}{\Delta x_e} \right) \quad ()$$

$$(a_p u)_i = \left(\sum_{nb} a_{nb} u_{nb} \right)_i - \nabla_i \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_i + b_i \quad ()$$

: () u

∇_i b p i a

$$u_e = \frac{1}{2}(u_i + u_{i+1}) + \frac{1}{2}(d_i + d_{i+1}) \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_e \quad ()$$

a_p

$$- \frac{1}{2} \left[d_i \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i + d_{i+1} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{i+1} \right] \quad ()$$

u_i

$$u_i = d_i \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_i + \hat{u}_i \quad ()$$

$$u_e = \frac{1}{2}(u_i + u_{i+1}) + \frac{1}{2}(d_i + d_{i+1})\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_e$$

$$\left\{ -\frac{1}{2}\left[d_i\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_i + d_{i+1}\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{i+1} \right] \right\} \quad ()$$

() ()
:

$$u_{i+1} - u_{i-1} - \frac{A}{2m}(-p_{i-2} + 4p_{i-1} - 6p_i + 4p_{i+1} - p_{i+2}) = 0$$

()

$$\Delta x^4 \frac{\partial^4 p}{\partial x^4}$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i + \frac{\Delta x^3}{4m} \frac{\partial^4 p}{\partial x^4} = 0 \quad ()$$

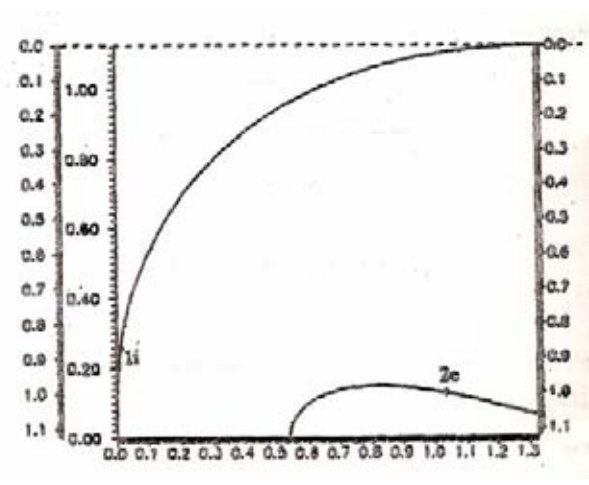
$H = 71.5 m$

$N = 300 rpm$

$Q = 30.5 m^3 / sec$

Δx^3

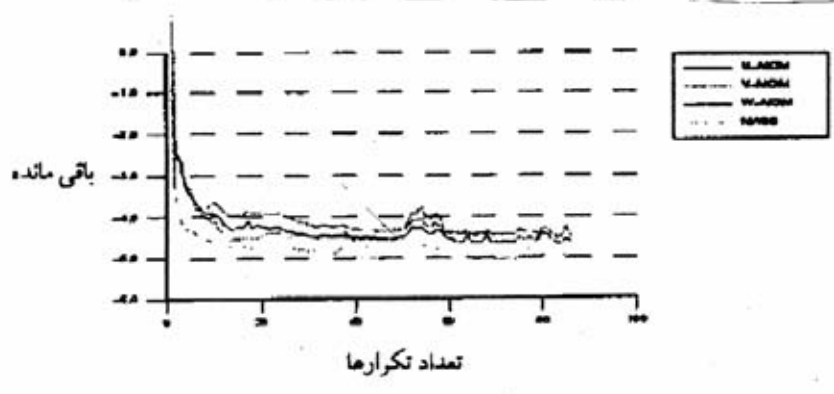
() () ()
()

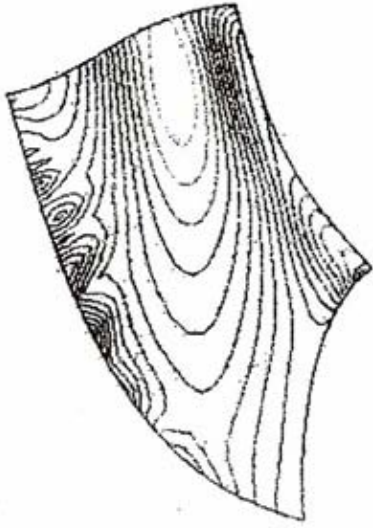


* *



()
 ()

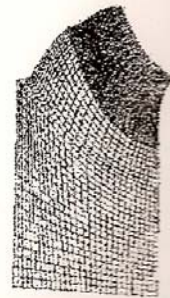
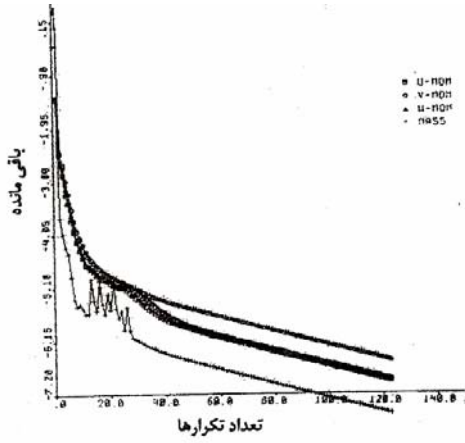


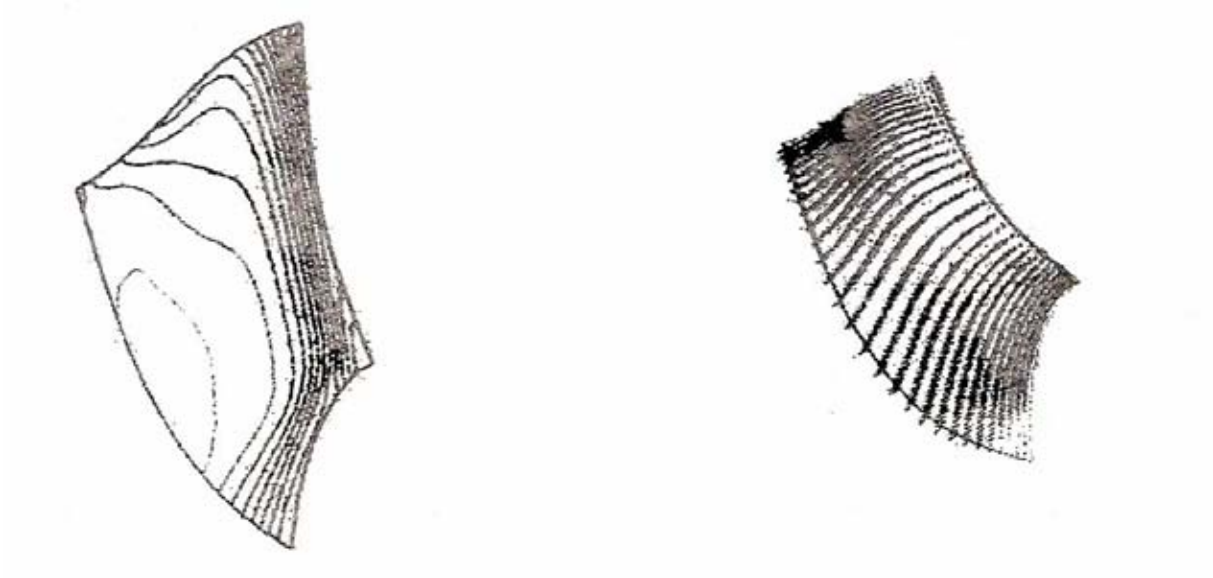


()

()

* *





A
b,r, *l*
d
k
np
p
Q_{2e}
x,y
a
C_μ
H
N
n_s

()

<p>Flow Simulation of a Runner for Francis Hydraulic Turbines Using Pseudo-Compressibility,” Journal of Fluid Engineering, Vol. 118, pp. 285-291, June 1996.</p> <p>[6] Sallaberger M.J., “Quasi-Three-Dimensional and Three-Dimensional Flow Calculation in an Francis Turbine”, ASME paper 96-GT-38, 1996.</p>	<p>Q</p> <p>u</p> <p>α</p> <p>Δx</p> <p>ρ</p> <p>μ_t</p> <p>ε</p> <p>μ</p>
<p>[8] Wilcox D.C., “Reassessment of the Scale-Determining Equations of Advanced Turbulence Models,” AIAA Journal, Vol. 26, No. 11, pp. 1299-1310, 1988.</p>	<p>[1] Wu C. H., “A General Theory of Three-Dimensional Flow in Subsonic and Supersonic Turbomachine in Radial, Axial and Mixed Flow Types,” NACA TN 2604, 1952.</p> <p>[2] Bovet T. “Contribution to the Steady of Francis Turbine Runner Design,” ASME 61-WA-155, 1961.</p> <p>[3] Gode G. and Cuenod, R., “Numerical Simulation of Flow in a Hydraulic Turbine” J. Chemical Engineerign, pp. 35-41, August 1990.</p> <p>[4] Vu T.C., Shyy W., “Performance Prediction by Viscous Flow Analysis For Francis Turbine Runner”, Journal of Fluids Engineering, Vol. 116, pp. 116-120, March 1994.</p> <p>[5] Arkawa C., Qian Y., Kubota T., “Turbulent</p>