

شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار با مدل FLUENT

اکرم عباسپور^{۱*}، داود فرسادی زاده^۲، علی حسین زاده دلیر^۳ و علی اشرف صدرالدینی^۳

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش: ۸۷/۴/۳۱

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

۲-۳ به ترتیب استادیار و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبه E-mail: akabbaspour@yahoo.com

چکیده

پرش هیدرولیکی برای استهلاک انرژی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی از جمله سرریزها، تندآب‌ها و دریچه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بررسی محققین نشان می‌دهد که بستر موج دار در کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی مؤثر می‌باشد. پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار متلاطم بوده و با اختلاط آب و هوا همراه می‌باشد. در این تحقیق پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار با استفاده از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و $k-\epsilon$ RNG و بکارگیری نرم افزار دینامیک محاسباتی FLUENT به صورت دو بعدی شبیه سازی شد و سطح آزاد جریان با روش جزء حجم سیال VOF تعیین گردید. نتایج نشان داد که مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ و روش جزء حجم سیال VOF برای پیش بینی پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار مناسب بوده و خطای نسبی متوسط مقادیر سطح آب بدست آمده از مدل‌های عددی و اندازه گیری شده 2 تا 7 درصد است. بررسی تشابه پروفیل‌های سرعت در فواصل مختلف پرش هیدرولیکی نشان داد توزیع سرعت در آزمون‌های مختلف یکسان بوده و نتایج بدست آمده از مدل‌های عددی و داده‌های تجربی اید و راجارانتام تطابق خوبی دارند. همچنین تأثیر بستر موج دار بر روی خصوصیات پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف با محاسبه موقعیت سطح آب، پروفیل سرعت و تنش برشی بستر در این مدل مورد بررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: بستر موج دار، پرش هیدرولیکی، جزء حجم سیال، مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ ، معادله ناویر-استوکس

Numerical Simulation of Hydraulic Jump on Corrugated Bed Using FLUENT Model

A Abbaspour^{1*}, D Farsadizadeh², A Hosseinzadeh Dalir³ and AA Sadraddini³

Received: 12 January 2009 Accepted: 22 July 2009

¹Former PhD Student, Dept., of Water Engin., Univ. of Tabriz, Iran

^{2,3} Assist. and Assoc. Professors, Dept. of Water Engin., University of Tabriz, Iran

*Corresponding author: E-mail: akabbaspour@yahoo.com

Abstract

Hydraulic jump has been used for dissipation of kinetic energy downstream of hydraulic structures such as spillways, chutes and gates. It is found by many researches that if jumps are made to occur on a corrugated bed, tail water and length of jumps will be reduced significantly. During formation of hydraulic jump on a corrugated bed the flow is turbulent, with water and air being mixed together. In the present study numerical simulations of hydraulic jump on corrugated bed were done by the CFD's FLUENT software in two dimensions using standard k- ϵ and RNG k- ϵ models. The free surface was determined using the VOF method. The results showed that the k- ϵ turbulent models and VOF method for predicting water surface in the jump on the corrugated bed were suitable and the relative error of the predicted water surface profiles and measured values were within 2-7 %. The study of the axial velocity profiles at different sections in the jump showed that velocity profiles in different experiments were similar and the agreement between the experimental and numerical results was satisfactory. Also the effects of corrugations on the basic characteristics of the jump such as free surface location, velocity and shear stress distributions were studied for different values of Froude number.

Keywords: Corrugated bed, Hydraulic jump, K- ϵ turbulence models, Navier-Stokes equations and Volume of fluid

ایجاد مانع یا گودال در بستر به صورت محدود انجام گرفته است.

مسئله مهمی که در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر ذهن محققین را مشغول کرده این است که در بستر زبر ممکن است جدا شدگی جریان سبب کاویتاسیون گردد. در این شرایط پرش هیدرولیکی موجب تخریب بستر می‌شود. مطالعات اخیر توسط اید و همکاران (2000) در کالورت با بستر موج‌دار نشان می‌دهد که

مقدمه

پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای صاف به صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. در این بسترها، با معلوم بودن عمق و سرعت اولیه جریان و با استفاده از روابط ریاضی و تجربی موجود می‌توان عمق جریان پس از پرش و طول پرش را تعیین نمود. اما مطالعات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر و موج دار با

(2004) با استفاده از معادلات پیوستگی و مومنتم و با مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ به صورت دو بعدی بررسی شد و نتایج آن به صورت پروفیل‌های سرعت و سطح آب، محاسبه مقادیر انرژی جنبشی (k) و اتلاف انرژی (ε) در مقاطع مختلف پرش ارائه گردید. سارکر و رودز (2002) پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای صاف را به صورت تجربی بررسی نموده و سپس با استفاده از مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG و روش (VOF) شبیه‌سازی نمودند. گونزالز و بومباردلی (2005) پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف را با مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و روش گردابی LES^5 شبیه‌سازی نموده و با نتایج تجربی لیو و همکاران (2004) مقایسه نمودند.

اید و راجارتنام (2002) پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار سینوسی شکل را در بازه عدد فرود 10-4 و زبری نسبی t/y_1 (ارتفاع زبری بستر و y_1 عمق اولیه پرش) برابر 0/25، 0/43، 0/5 بررسی نمود. توکیای (2005) اثرات بستر موج دار را بر روی پرش هیدرولیکی به صورت آزمایشگاهی بررسی نمود. شیب موج t/s برابر 0/1، 0/2، 0/26 بوده و مطالعات در محدوده اعداد فرود 5 تا 12 انجام گرفت. در تحقیق دیگری ایزدجو و شفعاوی بجمستانی (2007) مشخصات پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج دار دوزنقه‌ای شکل را مطالعه نمودند. مطالعات بر روی چهار بستر موج دار در بازه عدد فرود 4 تا 12 و مقادیر t/y_1 در بازه 0/371 تا 1/733 و s/y_1 در بازه 0/971 تا 8/333 انجام گرفت. در این تحقیق تغییرات عمق ثانویه به عمق اولیه (y_2/y_1) به صورت تابعی از عدد فرود اولیه Fr_1 بررسی گردید. همچنین طول و استهلاک انرژی پرش بررسی و با داده‌های تجربی موجود بر روی بسترهای موج دار و صاف مقایسه گردید.

اثر بستر موج دار در کاهش عمق و طول پرش هیدرولیکی و افزایش راندمان استهلاک انرژی به صورت تجربی توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که عوامل متعددی از جمله عمق

تنش‌های برشی رینولدز بر روی بسترهای موج دار بوجود آمده و این مسئله کاهش قابل توجهی در میدان‌های سرعت روی بستر را موجب می‌گردد. لذا این ایده بوجود آمد که به هنگام تشکیل پرش هیدرولیکی روی بستر موج دار طول و عمق ثانویه پرش کاهش می‌یابد و در صورتی که تاج سطح موج‌دار هم تراز با کف کانال باشد مشکل کاویتاسیون نیز تا حدودی برطرف می‌گردد.

بررسی دقیق پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج دار با روش‌های تحلیلی مشکل به نظر می‌رسد. با توسعه تکنیک‌های پیشرفته عددی قابلیت مدل‌سازی جریان متلاطم با مرزهای پیچیده امکان پذیر شده و از این روش‌ها برای تعیین پروفیل‌های سطح آب و سرعت و توزیع تنش برشی بستر می‌توان استفاده نمود.

مشکل بودن بررسی پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج دار با استفاده از روش‌های تحلیلی فقط به دلیل شرایط مرزی این پدیده نیست بلکه به لحاظ پیچیدگی جریان متلاطم و فرآیند پخشیدگی¹ بین جت جریان با دیواره‌ها، کف و سطح غلتان آب می‌باشد. با توجه به اینکه در پرش هیدرولیکی جریان متلاطم دو فاز آب و هوا برقرار است، شبیه‌سازی این پدیده با استفاده از مدل‌های آشفتگی مانند $k-\varepsilon$ استاندارد و $k-\varepsilon$ RNG² با در نظر گرفتن جزء حجم سیال (VOF)³ می‌تواند به نتایج دقیق‌تری منجر شود (زائو و میسرا 2004).

شبیه‌سازی عددی پرش بر روی بسترهای صاف در کانال‌های مستطیلی توسط محققین زیادی بررسی شده است. قارانجیک و چادری (1991) مدل عددی پرش هیدرولیکی را بررسی نمودند. در این تحقیق برای شبیه‌سازی جریان‌های فوق بحرانی و زیر بحرانی و پرش هیدرولیکی در بستر مستطیلی با شیب کم از معادلات بوزینسک⁴ استفاده گردید. مدل عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف توسط زائو و میسرا

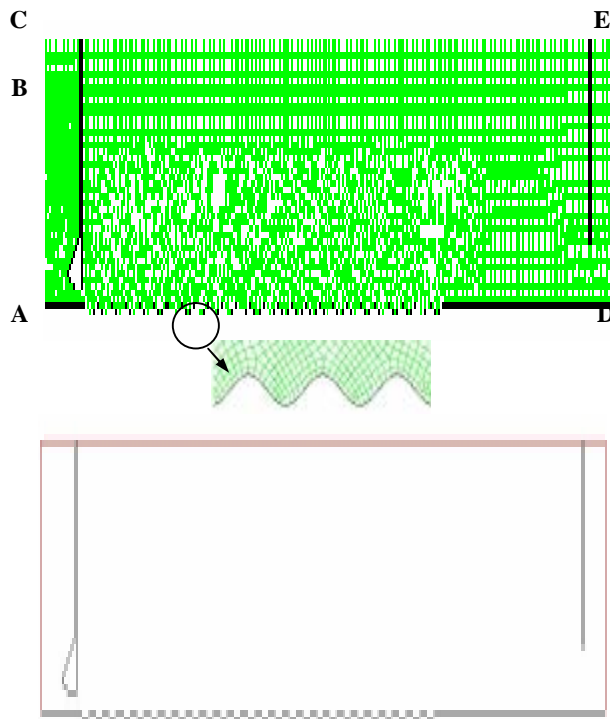
¹Diffusion process

²Re-normalisation group

³Volume of fluid

⁴Bossinesq

⁵Large eddy simulation



شکل ۱- طرح شماتیک محدوده محاسباتی

در رابطه فوق u_i نشان دهنده مؤلفه‌های سرعت جریان، α_w و α_A نسبت هوا و آب و ρ_A و ρ_w به ترتیب جرم مخصوص هوا، آب و جرم مخصوص مخلوط آب و هوا می‌باشد. همچنین μ_A ، μ_w ، μ_t و μ به ترتیب لزجت هوا، آب، ویسکوزیته گردابی و ویسکوزیته مخلوط آب و هوا بوده که μ_t و μ از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$m_t = r C_m \frac{k^2}{e} \quad [4]$$

$$m = a_A m_A + a_w m_w \quad [5]$$

روش جزء حجم سیال (VOF)

برآورد موقعیت سطح آزاد آب در پرش هیدرولیکی با استفاده از روش VOF انجام شد. در روش مذکور تابع $F(x,y,t)$ برای تعیین پروفیل سطح آب تعریف می‌شود. تابع F به شکل زیر بوده و مقدار آن بین 0 تا 1 متغیر می‌باشد (بی‌نام 2006).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad [6]$$

اولیه جریان، عدد فرود، ارتفاع و طول موج بستر در مشخصات پرش هیدرولیکی موثر می‌باشند. هدف از این تحقیق شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار و تاثیر عوامل مختلف بر روی مشخصات پرش با استفاده از مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ است. این تحقیق با استفاده از نرم افزار FLUENT و با کاربرد روش حجم محدود در حل معادلات ناویر استوکس متوسط رینولدزی انجام گرفته و سطح آزاد جریان با روش عددی جزء حجم سیال تعیین گردید.

مواد و روش ها

مدل عددی

در این تحقیق پرش هیدرولیکی بر روی بستر موجی (سینوسی) شکل در اعداد فرود مختلف با استفاده از مدل های آشفتگی جریان دو فاز و با بکارگیری روش های عددی مورد بررسی قرار گرفت. طرح شماتیک محدوده محاسباتی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار در شکل 1 نشان داده شده است.

معادلات حاکم

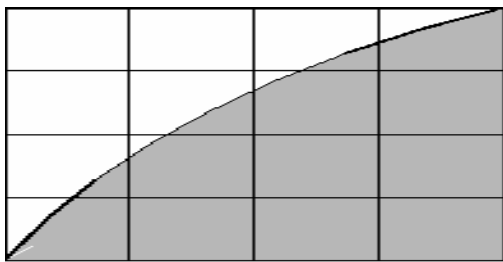
معادلات پیوستگی و مومنتم ناویر - استوکس متوسط رینولدزی در مدل مورد استفاده برای هر یک از فازهای جریان (آب و هوا) در پرش هیدرولیکی به فرم زیر در نظر گرفته می‌شوند (لیو و همکاران 2002).

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (r u_i) = 0 \quad [1]$$

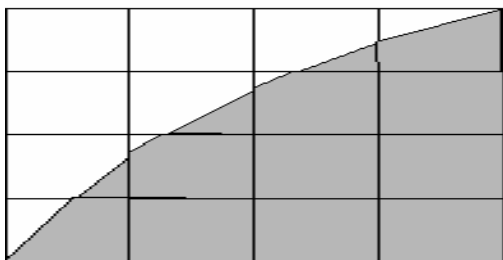
$$\frac{\partial}{\partial t} (r u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (r u_i u_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \quad [2]$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (m + m_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + r g_j$$

$$r = a_A r_A + a_w r_w \quad [3]$$



الف



ب

شکل ۲- فصل مشترک دو سیال در شرایط واقعی (الف) و با روش بازسازی هندسی (ب)

برای حل معادله فوق در سلولی که پر از آب است مقدار تابع F برابر یک می باشد. در سلول خالی (پر از هوا) مقدار تابع برابر صفر است و در سلول هایی که سطح آب وجود دارد این مقدار بین صفر و یک می باشد. معادله جزء حجم سیال با روشهای مختلف حل می شود که در این تحقیق از روش بازسازی هندسی¹ استفاده شده است. در روش بازسازی هندسی سطح مشترک جریان بین دو فاز به روش خطوط جزء بدست می آید که در شبکه بندی نامنظم² متداول بوده و از دقت بیشتری برخوردار است. در روش بازسازی هندسی فرض می شود که فصل مشترک دو سیال در هر سلول بصورت خط شیب دار بوده و جابجایی سیال در سلولها با توجه به شکل خطوط بدست می آید. در شکل 2 فصل مشترک دو فاز آب و هوا در شرایط واقعی و روش بازسازی هندسی نمایش داده شده است (بی نام 2006).

در این روابط k انرژی جنبشی آشفتگی، ε نرخ اتلاف انرژی و P تولید انرژی که از رابطه زیر بدست می آید.

$$P = 2C_m r \frac{k^2}{e} [S_{ij} S_{ij} - \frac{1}{3} (\nabla \cdot U)^2] - \frac{2}{3} r k \nabla U \quad [9]$$

در معادله های 7، 8 و 9 ضرایب تجربی مدل استاندارد

$$C_{\varepsilon 1} = 1/44, R = 0, \alpha_{\varepsilon} = 0/77, \alpha_k = 1, C_m = k - \varepsilon = 0/09 \\ C_{\varepsilon 2} = 1/68 \text{ و } C_{\varepsilon 3} = -1 \text{ می باشند.}$$

همچنین:

$$R_{RNG} = \frac{C_m h^3 (1 - \frac{h}{h_0}) e^2}{1 + bh^3} \frac{1}{k} \quad [10]$$

$$Ch = \frac{h(1 - \frac{h}{h_0})}{1 + bh^3} \quad [11]$$

$$C_{\varepsilon 3RNG} = \frac{-1 + 2C_{\varepsilon 1} - 3m_1(n_1 - 1) + (-1)^d \sqrt{6} C_m Ch}{3} \quad [12]$$

مدل های آشفتگی

در این تحقیق از مدل های آشفتگی دو معادله ای $k - \varepsilon$ استاندارد و $k - \varepsilon$ RNG استفاده گردید.

در مدل های آشفتگی $k - \varepsilon$ روابط زیر برقرار است (پاپیجوراکیس و آسنیس 1999).

$$r \frac{DK}{Dt} = P - re + \frac{\partial}{\partial x_i} (m a_k \frac{\partial k}{\partial x_i}) \quad [7]$$

$$r \frac{De}{Dt} = \frac{e}{k} (C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} re) - rR + \\ + C_{\varepsilon 3} re \nabla \cdot u + \frac{\partial}{\partial x_i} (m a_e \frac{\partial e}{\partial x_i}) \quad [8]$$

¹Geometric reconstruction

²Unstructured meshing

صرف نظر کردن از اثر لزجت با توجه به عدد رینولدز بالا رابطه به صورت زیر ساده می‌گردد.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_3 \left(Fr_1, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1} \right) \quad [15]$$

داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده

در این تحقیق از داده‌های تجربی آید و راجارتنام (2002) برای ارزیابی روش شبیه سازی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار با مدل‌های آشفتگی استفاده شده است. آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی به عرض 0/446 متر ارتفاع 0/6 متر و طول 7/6 متر انجام گرفته است. برای ایجاد جریان فوق بحرانی و عمق اولیه پرش y_1 از یک دریچه کشویی قابل تنظیم استفاده شده است. بسترهای موج دار از جنس آلومینیم با ارتفاع موج‌های (t) 13 و 22 و طول موج (s) 68 میلیمتری ساخته شده و برای کنترل کاویتاسیون تاج سطح موج‌دار هم تراز با کف کانال در نظر گرفته شده است. عمق پایاب در فلوم نیز با استفاده از دریچه کشویی کنترل می‌گردد و دریچه طوری تنظیم می‌شود که پرش هیدرولیکی در ابتدای بستر موج دار تشکیل گردد. مشخصات پرش هیدرولیکی در آزمون‌های تجربی مختلف در جدول 1 ارائه شده است.

نتایج و بحث

با شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار مشخصات پرش شامل پروفیل سطح آب، طول پرش، پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف پرش و تنش برشی بستر تعیین گردید.

پروفیل سطح آب

پروفیل‌های سطح آب در طول پرش هیدرولیکی با مدل‌های آشفتگی k-ε استاندارد و RNG k-ε تعیین گردید.

ضرایب تجربی در مدل RNG k-ε به ترتیب $C\epsilon_2=1/68$, $C\epsilon_1=1/42$, $\alpha_k=\alpha_\epsilon=1/39$, $c_m=0/084$ و $\eta_0=4/38$, $\beta=0/012$ می‌باشند.

مشخصات عددی مدل و شرایط مرزی و اولیه

برای شبیه سازی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار ابتدا محدوده هندسی مدل در محیط Gambit ایجاد و شبکه بندی شد. برای شبکه بندی محدوده هندسی از شبکه‌های نامنظم استفاده گردید. با توجه به کوچک بودن ارتفاع موج‌های بستر اندازه شبکه‌ها در امتداد دو محور مختصات 5 تا 7 میلیمتر در نظر گرفته شد. مطابق شکل 1 شرایط مرزی بصورت سرعت ورودی جریان آب (AB)، فشار هیدرواستاتیک ورودی (BC) و خروجی (DE) برابر صفر و دیواره‌ها (بستر کانال و دریچه‌ها) تعریف شد. روش حل مدل عددی پرش هیدرولیکی غیر ماندگار است. شرایط اولیه در همه سلولهای بالادست دریچه تا بالای مرز ورودی سرعت، سیال آب بوده و تابع F برابر یک می‌باشد.

تحلیل ابعادی

پارامترهای موثر در پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار را به صورت تابع زیر می‌توان نشان داد (توکای 2005).

$$y_2 = f_1(y_1, u_1, t, s, g, \mu, \rho) \quad [13]$$

با استفاده از تئوری با کینگهام تابع زیر را می‌توان بدست آورد.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2 \left(Re, Fr_1 = \frac{u_1}{\sqrt{gy_1}}, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1} \right) \quad [14]$$

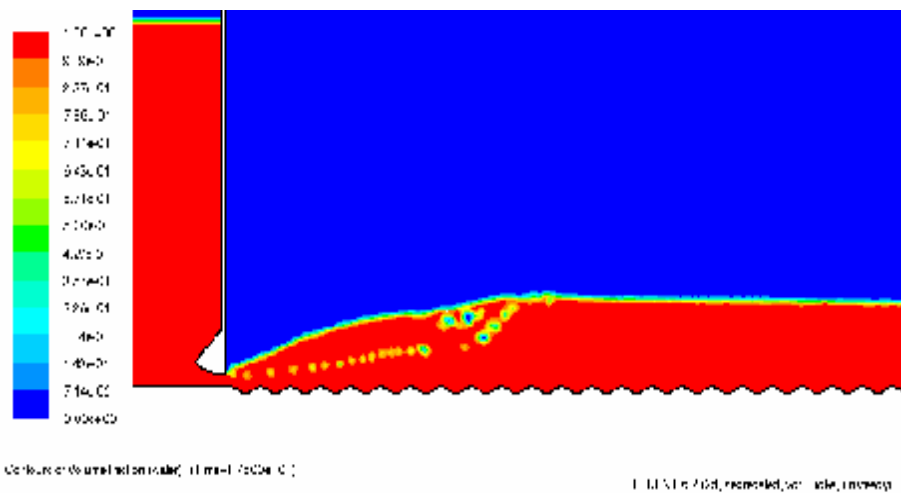
در رابطه فوق y_2 عمق ثانویه پرش، y_1 عمق اولیه جریان، Fr_1 عدد فرود اولیه، Re عدد رینولدز جریان، t ارتفاع موج و s طول موج بستر موج دار می‌باشد. با

جدول ۱- مشخصات پرش هیدرولیکی در آزمون‌های تجربی روی بسترهای موج دار

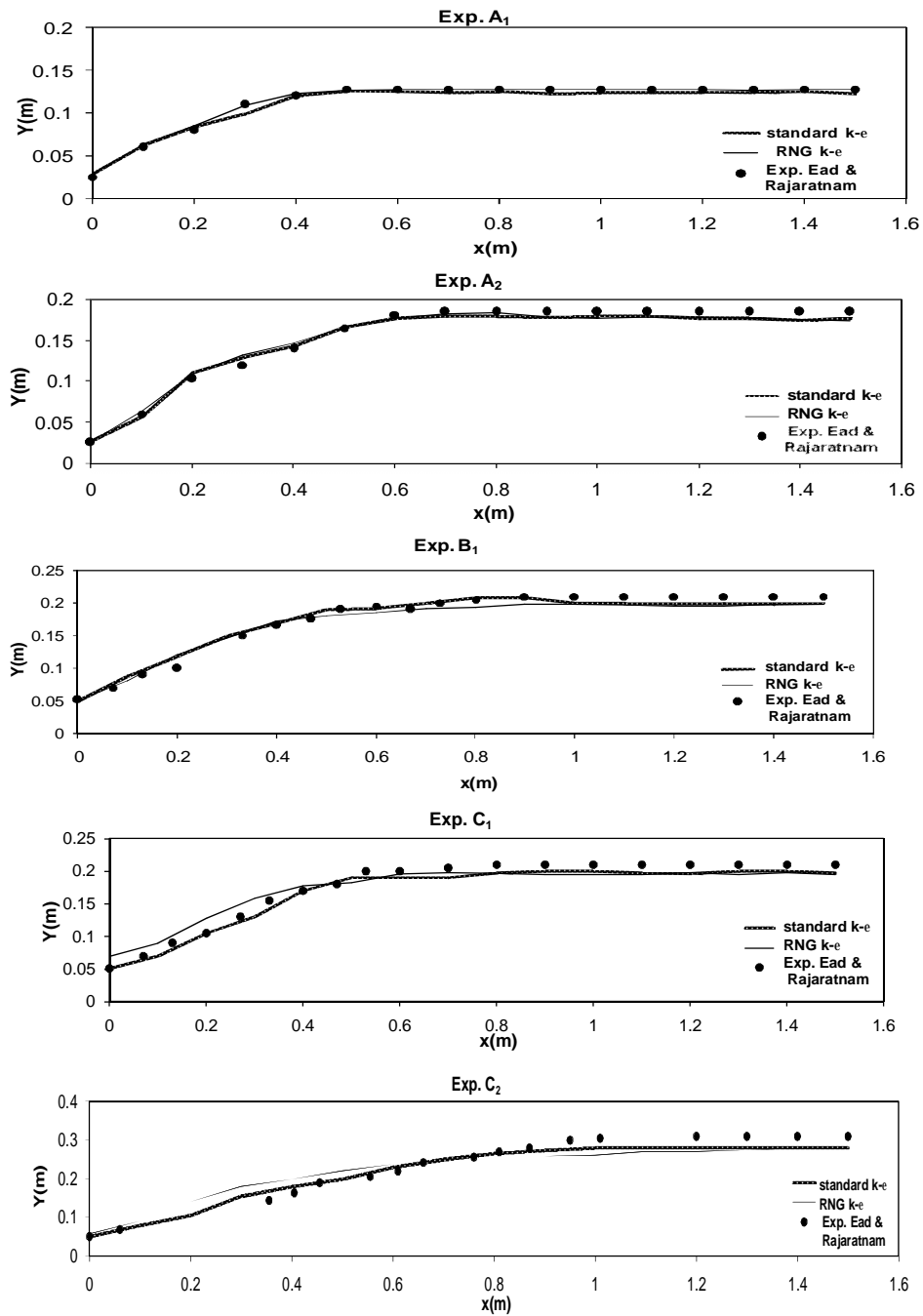
آزمون	نوع بستر	s (mm)	t (mm)	Fr ₁	Re	q (m ² /s ⁻¹)	u ₁ (m/s)	y ₁ (mm)	y ₂ (m)	L _j (m)
A ₁	I	۶۸	۱۳	۵/۰	۶۳۵۰۰	۰/۰۶۳	۲/۵۰	۲۵/۴	۰/۱۲۸	۰/۴۸
A ₂	I	۶۸	۱۳	۷/۰	۸۸۶۴۶	۰/۰۸۹	۳/۴۹	۲۵/۴	۰/۱۸۸	۰/۷۵
B ₁	I	۶۸	۱۳	۴/۰	۱۴۳۲۵۶	۰/۱۴۳	۲/۸۲	۵۰/۸	۰/۲۱۰	۰/۸۸
B ₂	I	۶۸	۱۳	۵/۸	۲۰۶۷۵۶	۰/۲۰۷	۴/۰۷	۵۰/۸	۰/۳۱۰	۱/۲۹
C ₁	II	۶۸	۲۲	۴/۰	۱۴۳۲۵۶	۰/۱۴۳	۲/۸۲	۵۰/۸	۰/۲۱۰	۰/۸۲
C ₂	II	۶۸	۲۲	۵/۸	۲۰۶۷۵۶	۰/۲۰۷	۴/۰۷	۵۰/۸	۰/۳۱۰	۱/۲۹

داده‌های تجربی اید و راجارتنام (2002) مقایسه شده است. خطای نسبی متوسط مقادیر سطح آب بدست آمده از مدل‌های عددی و اندازه‌گیری شده 2 تا 7 درصد می‌باشد.

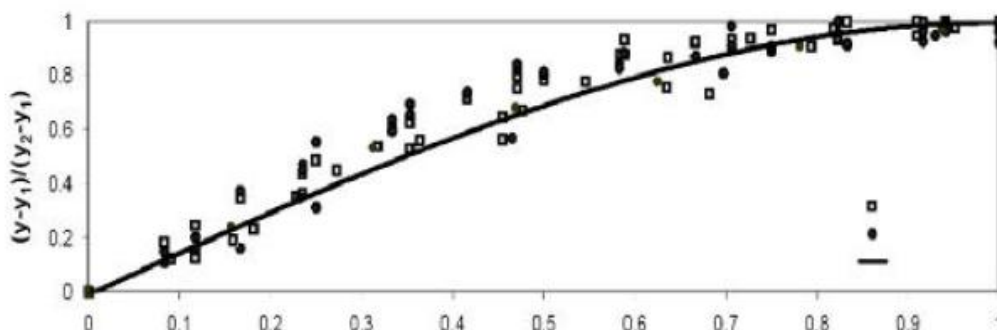
در شکل 3 پروفیل سطح آزاد آب بدست آمده از مدل آشفتگی k-ε استاندارد و جزء حجم سیال VOF برای آزمون A₂ نشان داده شده است در شکل 4 پروفیل‌های سطح آب بدست آمده از مدل‌های عددی با داده‌های



شکل ۳- شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF)



شکل ۴- مقایسه پروفیل های سطح آب بدست آمده از مدل های آشفتگی و داده های تجربی



شکل ۵- مقایسه پروفیل‌های بدون بعد سطح آب در پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار

مدل‌های عددی و داده‌های تجربی آید و راجارتنام (2002) تطابق خوبی دارند.

همچنین جهت بررسی تشابه پروفیل‌های سرعت در طول پرش، تغییرات سرعت طولی ماکزیم u_m و مقیاس عمقی b در طول پرش هیدرولیکی بررسی گردید. مقدار سرعت اولیه جریان u_1 در محدوده $1/8$ تا $4/07$ متر بر ثانیه قرار دارد. سرعت طولی ماکزیم u_m در انتهای پرش هیدرولیکی از $0/45$ تا $1/14$ متر بر ثانیه تغییر می‌نماید. شکل 7 تغییرات $\frac{b}{y_1}$ بدست آمده از مدل‌های

عددی در فواصل مختلف پرش هیدرولیکی را نشان می‌دهد. مطابق شکل پروفیل‌های سرعت در امتداد پرش هیدرولیکی مشابه می‌باشند. روابط رگرسیونی زیر برای تعیین مقیاس عمقی b بترتیب در مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و $RNG\ k-\varepsilon$ و داده‌های تجربی به دست آمده است.

$$\frac{b}{y_1} = 0.176 \frac{x}{y_1} + 1.1 \quad [16]$$

$$\frac{b}{y_1} = 0.169 \frac{x}{y_1} + 0.6 \quad [17]$$

$$\frac{b}{y_1} = 0.17 \frac{x}{y_1} + 0.5 \quad [18]$$

در شکل 5 پروفیل‌های بی بعد سطح آب با استفاده از دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و $RNG\ k-\varepsilon$ نمایش داده شده است. نتایج مدل عددی با منحنی متوسط بی بعد سطح آب بدست آمده از بررسی‌های تجربی آید و راجارتنام (2002) تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

طول پرش هیدرولیکی

با توجه به نمودارهای پروفیل سطح آب (شکل 4) طول پرش هیدرولیکی در آزمون‌های مختلف را می‌توان تعیین نمود به طوریکه طول پرش در آزمون‌های A_1, A_2, B_1 و C_1 تقریباً با مقادیر تجربی آید و راجارتنام (2002) یکسان بوده ولی در آزمون‌های B_2 و C_2 اختلاف اندکی وجود دارد.

پروفیل‌های سرعت

در شکل 6 پروفیل‌های سرعت بدست آمده از مدل‌های آشفتگی و داده‌های تجربی در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی نمایش داده شده است.

برای بررسی تشابه پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف ماکزیم سرعت طولی u_m تعیین گردید و مقدار مقیاس عمقی b برابر عمق نظیر $u=0/5u_m$ و $\frac{\partial u}{\partial y} < 0$ در فواصل مختلف پرش هیدرولیکی بدست آمد. با توجه به شکل 6 می‌توان نتیجه گرفت که توزیع سرعت در آزمون‌های B_2 و C_2 یکسان بوده و نتایج بدست آمده از

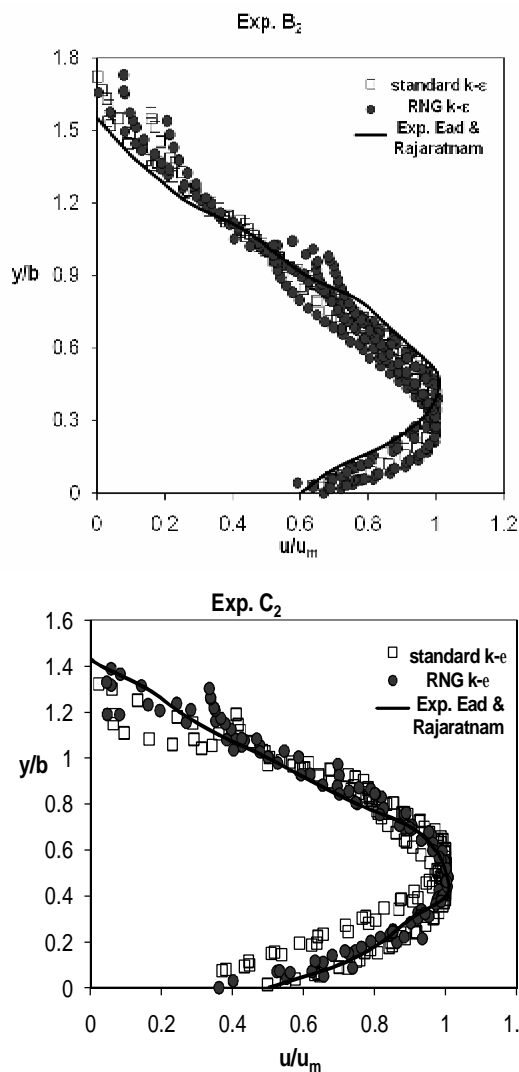
با مقایسه روابط 16 و 17 با رابطه 18 می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر مقیاس عمقی b بدست آمده از مدل RNG k- ϵ با نمودار تجربی اید و راجارتنام (2002) تطابق بیشتری دارد.

شکل 8 میدان سرعت شبیه سازی شده با مدل آشفتگی را نشان می‌دهد. از این نتایج می‌توان سرعت جریان در نواحی مختلف پرش را به دست آورد. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر سرعت در ابتدا و در ناحیه چرخشی پرش بوده و حداقل سرعت در نزدیکی سطح آب و بستر موج دار دیده می‌شود. در پایین دست پرش گرادیان سرعت ها رفته رفته کاهش می‌یابد. همچنین سرعت های منفی (آبی پررنگ) در نزدیکی سطح آب و در فرو رفتگی ها وجود دارد.

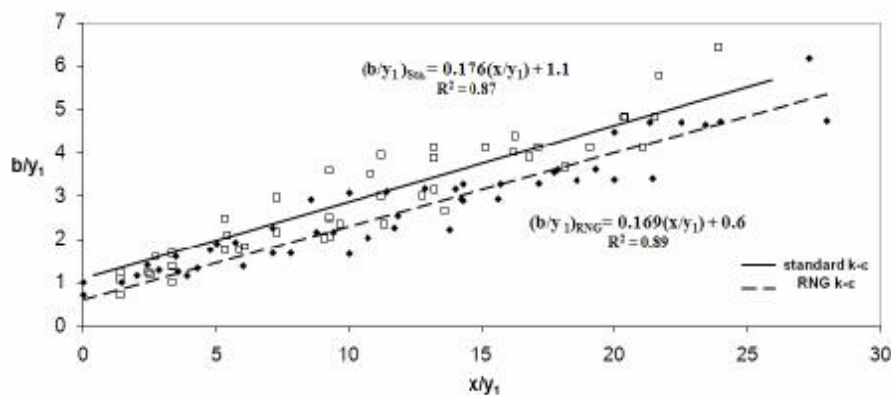
4- تنش برشی بستر

تنش برشی بستر در پرش هیدرولیکی روی بستر موج دار با استفاده از رابطه مومنتم تعیین می‌گردد. با انتگرال گیری از معادلات رینولدزی در امتداد محور x (امتداد جریان) معادله مومنتم را به فرم زیر می‌توان نوشت.

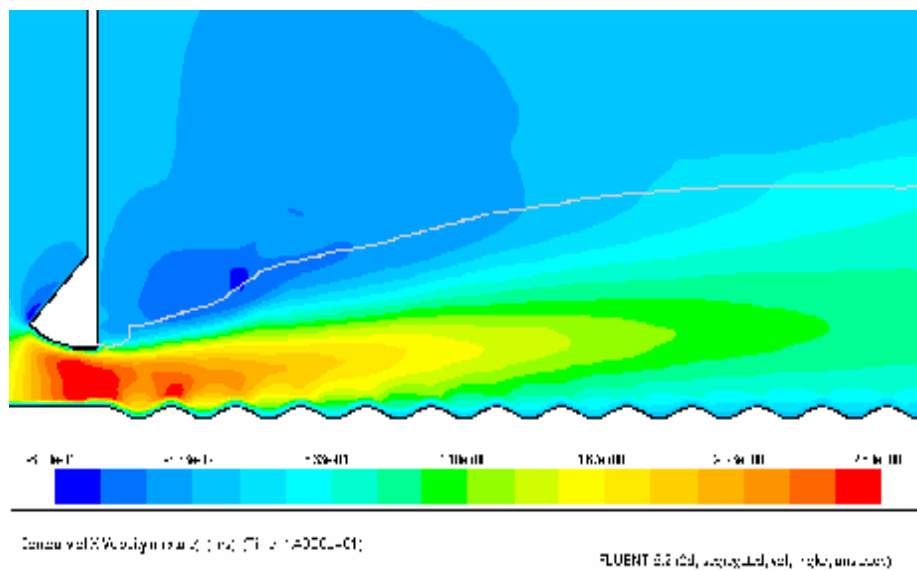
$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^y ru^2 dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^y pdz - \frac{\partial}{\partial x} \int_0^y s_x dz = -t_b \quad [19]$$



شکل ۶- پروفیل های سرعت در طول پرش هیدرولیکی مربوط به آزمون های B_2 و C_2



شکل ۷ - تغییرات $\frac{b}{y_1}$ بدست آمده از مدل های آشفتگی در فواصل مختلف پرش هیدرولیکی



شکل ۸ - شبیه سازی دو بعدی میدان های سرعت جریان با استفاده از مدل آشفتگی RNG k-ε مربوط به آزمون B₁

ضریب نیروی برشی ε با استفاده از نتایج مدل های آشفتگی k-ε استاندارد و RNG k-ε و بکارگیری روابط 21 و 22 محاسبه گردید و نمودار آن به ازای اعداد فرود اولیه بصورت شکل 9 نمایش داده شده است. با توجه به این شکل می توان نتیجه گرفت که نتایج مدل های آشفتگی و اید و راجاراتنام اختلاف ناچیزی با یکدیگر دارند.

همچنین تنش برشی بستر در فواصل مختلف از ابتدای پرش با استفاده از مدل های آشفتگی k-ε استاندارد و RNG k-ε برای همه آزمون ها بدست آمد که بصورت شکل (10) نمایش داده شده است. با افزایش فاصله نسبت به ابتدای پرش ($x=0$) مقدار تنش برشی بستر کاهش می یابد و ماکزیم تنش های برشی بستر تقریباً در فاصله 0/1 متری از ابتدای پرش هیدرولیکی دیده می شود.

در معادله فوق ρ جرم مخصوص آب، p فشار هیدرواستاتیک، σ_x تنش نرمال رینولدزی و τ_b تنش برشی بستر است. در بازه ابتدا و انتهای پرش هیدرولیکی معادله به فرم زیر ساده می گردد.

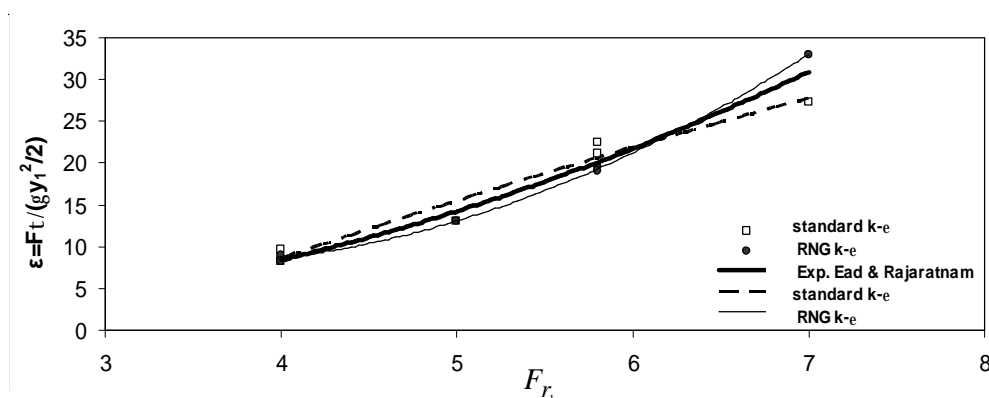
$$(M_2 + P_2 - S_2) = (M_1 + P_1 - S_1) - \int_{x_1}^{x_2} t_b dx \quad [20]$$

در این رابطه P_1, P_2, M_1, M_2, S_1 و S_2 به ترتیب نیروهای فشاری، مومنتم و نیروهای تنش نرمال در واحد طول در مقاطع قبل و بعد از پرش هیدرولیکی است. با صرفنظر نمودن از نیروهای تنش نرمال رابطه 20، مجموع نیروهای برشی بستر با استفاده از رابطه زیر به دست می آید (خان و اشتفلا، 1996).

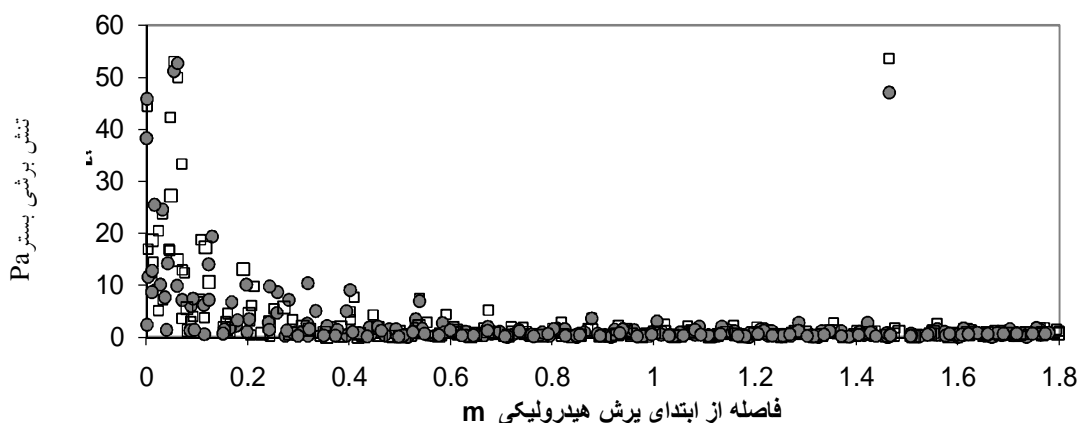
$$F_t = (P_1 - P_2) + M_1 - M_2 \quad [21]$$

مقدار ضریب نیروی برشی ε در بستر موج دار از رابطه زیر قابل برآورد است (اید و راجاراتنام 2002).

$$e = \frac{F_t}{\rho v_1^2 / 2} \quad [22]$$



شکل ۹- مقایسه تغییرات ضریب نیروی برشی ε بدست آمده از مدل های آشفتگی و نتایج تجربی



شکل ۱۰- تغییرات تنش برشی بستر بدست آمده از مدل های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و $k-\varepsilon$ RNG

بحث

بوده و با دقت 2 تا 7 درصد پروفیل سطح آب شبیه سازی می گردد.

2- مقایسه نتایج ارائه شده نشان می دهد که پروفیل های سطح آب بدست آمده از دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و $k-\varepsilon$ RNG اختلاف ناچیزی دارند. فقط مدل $k-\varepsilon$ RNG کمی سریعتر از $k-\varepsilon$ استاندارد همگرا می گردد.

3- توزیع دو بعدی سرعت با استفاده از مدل های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و $k-\varepsilon$ RNG با داده های تجربی مطالعات پرش هیدرولیکی توسط اید و راجاراتنام (2002) مقایسه گردید. پروفیل های سرعت در امتداد پرش هیدرولیکی مشابه

در این تحقیق شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار با بکار بردن نرم افزار دینامیک محاسباتی FLUENT و با استفاده از مدل های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و $k-\varepsilon$ RNG انجام گرفته و با نتایج بررسی تجربی اید و راجاراتنام (2002) مقایسه گردید. نتایج حاصله به بصورت خلاصه در زیر ارائه می گردد.

1- مدل های آشفتگی $k-\varepsilon$ و روش جزء حجم سیال (VOF) برای پیش بینی پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار مناسب

- 6- مقادیر ضریب نیروی برشی ε بدست آمده از مدل عددی و نتایج تجربی اید و راجاراتنام (2002) تطابق خوبی با هم دارند.
- 7- با افزایش فاصله نسبت به ابتدای پرش ($x=0$) مقدار تنش برشی بستر کاهش می یابد و در فاصله 0/1 متری از ابتدای پرش هیدرولیکی تنش های برشی بستر ماکزیمم است.
- 4- با توجه به شکل و مقایسه روابط تعیین شده، مقادیر مقیاس عمقی b بدست آمده از مدل RNG $k-\varepsilon$ با نتایج تجربی اید و راجاراتنام (2002) تطابق بیشتری دارد.
- 5- بررسی کنتورهای سرعت شبیه سازی شده نشان می دهد که حداکثر سرعت در ابتدا و ناحیه چرخشی پرش بوده و سرعت های منفی در نزدیکی سطح آب و فرورفتگی های بستر موج دار دیده می شود. همچنین در پایین دست پرش گرادیان های سرعت کاهش می یابد.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از گزارش نهایی طرح پژوهشی شماره 27/1236/ مورخ 87/2/31 می باشد که از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه اجرا شده است. بدین وسیله از حمایت مالی دانشگاه تبریز تشکر و قدردانی می گردد.

منابع مورد استفاده

- Anonymous, 2006. Fluent 6.3 User's Guide. Chap. 23, Fluent Incorporated, Lebanon.
- Ead SA, Rajaratnam N, Katopodis C and Ade F, 2000. Turbulent open-channel flow in circular corrugated culverts. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 126: 750-757.
- Ead SA and Rajaratnam N, 2002. Hydraulic jumps on corrugated bed. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 128: 656-663.
- Gharangik AM and Chaudhry MH, 1991. Numerical model of hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 117: 1195-1209.
- Gonzalez A and Bombardelli F, 2005. Two-phase flow theory and numerical models for hydraulic jumps, including air entrainment, pp.15-24 , *In: Proc. XXXI IAHR Congress, Seoul, Korea.*
- Izadjo F and, Shafai-Bejestan M, 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Journal of Applied Sciences ANSI* 7: 1164-1169.
- Khan AA and Steffler PM, 1996. Physically based hydraulic jump model for depth-averaged computation. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 122: 540-548.
- Liu CR, Ma WJ and HuHe AD, 2002. Numerical investigation of flow over a weir. *Journal. of Acta Mechanica Sinica* 18: 594-602.
- Liu M, Rajaratnam N and Zhu D, 2004. Turbulence structure of hydraulic jumps of low Froude numbers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 130: 511-520

Papageorgakis GC and Assanis DN, 1999. Comparison of linear and nonlinear RNG-based models for incompressible turbulent flows. *Journal of Numerical Heat Transfer*, 35: 1-22.

Sarker MA and Rhodes DG, 2002. Physical modeling and CFD applied to hydraulic jumps. Cranfield University Report, Institute of Technology , Bangladesh.

Tokyay ND, 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. pp. 408-416, *Impacts of Global Climate Change Conference Proceeding Paper*, EWRI, Anchorage, Alaska, USA.

Zhao Q and Misra SK, 2004. Numerical study of a turbulent hydraulic jump. pp.78-85, 17th *Engineering Mechanics Conference*, University of Delaware, New York.