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

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

تاریخ دریافت : ۸۷/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش : ۸۸/۴/۳۱ ۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب ، دانشگاه تبریز 2و3- به ترتیب استادیار و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز * مسئول مکاتبه _E-mail:<u>akabbaspour@yahoo.com</u>

چکیدہ

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 می باشد. در این تحقیق پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار با استفاده از مدلهای آشدفتگی ٤- ۲ استاندارد و ٤- RNG می باشد. در این تحقیق 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 مدل های آشفتگی ٤- ۲ 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 مدل های عددی و اندازه گیری شده 2 تا 7 درصد است. بررسی تشابه پروفیل های سرعت در فواصل مختلف پرش هیدرولیکی نشان داد توزیع سرعت در آزمون های مختلف یکسان بوده و نتایج بدست آمده از مدل های عددی و دادههای تجربی اید و راجاراتنام تطابق خوبی دارند. همچنین تأثیر بستر موج دار بر روی خصوصیات پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف با محاسبه موقعیت سطح آب، پروفیل سرعت زمد از مدل های عددی و در اعداد فرود مختلف با محاسبه موقعیت سطح آب، پروفیل سرعت و تنایج بدست آمده از مدل های عددی و در اعداد فرود مختلف با محاسبه موقعیت سطح آب، پروفیل سرعت و تنش برشی بستر در این مدل مورد بررسی قرار گرفت.

واژدهای کلیدی: بستر موجدار، پرش هیدرولیکی، جزء حجم سیال، مدلهای آشفتگی k-ɛ، 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: <u>akabbaspour@yahoo.com</u>

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 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 www.SID.ir

تنش های 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 میابد 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 مدل سازی 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 ع- ۸ استاندارد و ع-k RNG² می تواند به نتایج دقیقتری منجر شود (زائو و میسرا 2004).

شبیه سازی 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

(2004) با استفاده از معادلات پیوستگی و مومنتم و با مدل آشفتگی ٤- k به صورت دو بعدی بررسی شد و نتایج آن به صورت پروفیلهای سرعت و سطح آب، محاسبه مقادیر انرژی جنبشی (k) و اتلاف انرژی (٤) 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 ٤- k RNG و روش (VOF) شبیه سازی نمودند. گونزالز و بومباردلی (2005) پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف را با مدل آشفتگی ٤- k و روش گردابی ⁵ LES شبیه سازی 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) t/y1 ارتفاع زبری بستر و y1 عمق اوليه يرش) برابر 25/0، 0/43 و 0/5 بررسي 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 و 0/26 برده و مطالعات در محدوده اعداد فرود 5 تا 12 انجام گرفت. در تحقيق ديگري ايزدجو و شفاعي بجستاني (2007) مشخصات پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج دار ذوزنقهای شکل را مطالعه نمودند. مطالعات بر روی چهار بستر موج دار در بازه عدد فرود 4 تا 12 و مقادیر t/y₁ در بازه 0/371 تا 1/733 و s/y₁ در بازه 0/971 تا 8/333 انجام گرفت. در اين تحقيق تغييرات عمق ثانويه به عمق اوليه (y2/y1) به صورت تابعی از عدد فرود اولیه Fr₁ بررسی گردید. همچنین طول و استهلاک انرژی پرش بررسی و با دادههای تجربی موجود بر روی بسترهای موج دار و صاف مقاسىه گردىد.

اثر بستر موج دار در کاهش عموق و طول پرش هیدرولیکی و افزایش راندمان استهلاک انرژی به صورت تجربی توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی ها نشان می دهد که عوامل متعددی ازجمله عمق

⁵Large eddy simulation



شکل ۱- طرح شماتیک محدوده محاسباتی

در رابطه فوق u_i نشان دهنده مؤلفههای سرعت جریان، _ΔA و _WΔ نسبت هوا و آب و _ΔA, _φ و ρ به ترتیب جرم مخصوص هوا، آب و جرم مخصوص مخلوط آب و هوا میباشد. همچنین _ΔA, _W μ_h μ_k و μ به ترتیب لزجت هوا، آب، ویسکوزیته گردابی و ویسکوزیته مخلوط آب و هوا بوده که _Lt و μاز روابط زیر بدست میآیند.

$$m_{t} = rC_{m} \frac{k^{2}}{e}$$

$$m = a_{A}m_{A} + a_{w}m_{w}$$
[5]

روش جزء حجم سيال (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 می باشد (بینام 2006).

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

اولیه جریان، عدد فرود، ارتفاع و طول موج بستر در مشخصات پرش هیدرولیکی موثر می باشند. 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 ٤-٤ 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 مدلهای آشفتگی جریان دو فاز و با بکارگیری روشهای عددی مورد بررسی قرار گرفت. طرح شماتیک محدوده محاسباتی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار در شکل 1 نشان داده شده است.

معادلات حاكم

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).

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(ru_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(ru_iu_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \qquad [2]$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\mathbf{m} + \mathbf{m}_i) (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) + rg_j$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{a}_A \mathbf{r}_A + \mathbf{a}_w \mathbf{r}_w$$
[3]

برای حل معادله فوق در سلولی که پر از آب است مقدار تابع F برابر یک می باشد. در سلول خالی (یر از هوا) مقدار تابع برابر صفر است و در سطول هایی که سطح آب وجود دارد این مقدار بین صفر و یک می باشد. معادله جزء حجم سيال با روشهاى مختلف حل می شود که در این تحقیق از روش بازسـازی هندسـی¹ استفاده شده است. در روش بازسازی هندسی سطح مشترک جریان بین دو فاز به روش خطوط جزء بدست می آید که در شبکهبندی 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 شيب دار بوده و جابجایی سيال در سلولها با توجه به شکل خطوط بدست می آید. در شـکل 2 فصل مشترک دو فاز آب و هوا در شرایط واقعی و روش بازسازی هندسی نمایش داده شده است (ببی نام .(2006

مدل های آشفتگی

در این تحقیق از مدل های آشفتگی دو معادله ای ³k استاندارد و RNG k-E استفاده گردید.

در مدل های آشفتگی k-ɛ روابط زیـر برقـرار اسـت (پاپیجوراکیس و آسنیس 1999).

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

$$r\frac{De}{Dt} = \frac{e}{k}(Ce_1P - Ce_2re) - rR + [8]$$
$$+ Ce_3re\nabla u + \frac{\partial}{\partial x_i}(ma_e\frac{\partial e}{\partial x_i})$$

¹Geometric reconstruction

²Unstructured meshing

www.SID.ir





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

در این روابط k انرژی جنبشی آشفتگی، ٤ نرخ اتـلاف
انرژی و P تولید انرژی که از رابطه زیر بدست میآید.
$$P = 2C_m r \frac{k^2}{e} [S_{ij}S_{ij} - \frac{1}{3} (\nabla .U)^2] - \frac{2}{3} r k \nabla .U$$
[9]

در معادلههای 7، 8 و 9 ضرایب تجربی مدل استاندارد Cε₁=1/44 ،R=0 ،α_ε=0/77 ،α_k=1 ، C_m k- ε=0/09 و Cε₂=1/68 میباشند. همچنین:

$$R_{RNG} = \frac{C_{m}h^{3}(1-h_{h_{0}})}{1+bh^{3}}\frac{e^{2}}{k}$$
 [10]

$$Ch = \frac{h(1 - h_0)}{1 + bh^3}$$
[11]
-1+2Ce -3m(n -1)+(-1)^d $\sqrt{6CC}h$

$$Ce_{_{3RNG}} = \frac{-1 + 2Ce_1 - 3m_1(n_1 - 1) + (-1) + 0C_m C_h \Pi}{3}$$
[12]

ضرایب تجربی در مدل RNG k- ϵ به ترتیب $C\epsilon_2=1/68$. $C\epsilon_1=1/42$. $\alpha_k=\alpha_{\epsilon}=1/39$. $c_m=0/084$ $n_0=4/38$. $\beta=0/012$

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 شبکه های نامنظم استفاده گردید. با توجه به کوچک بودن ارتفاع موج های بستر اندازه شبکه ها در امتداد دو محور مختصات 5 تا 7 میلیمتر در نظرگرفته شد. مطابق شکل 1 شرایط مرزی بصورت سرعت ورودی جریان آب (AB)، فشار هیدرواستاتیک ورودی (BC) و خروجی (DE) برابر صفر و دیواره ها (بستر کانال و دریچه ها) 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 می باشد.

تحليل ابعادى

پارامترهای موثر در پرش هیدرولیکی بر روی بـستر موج دار را بـه صـورت تـابع زیـر مـی تـوان نـشان داد (توکیای 2005).

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

با استفاده از تئوری با کینگهام تابع زیر را می توان بدست آورد.

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

در رابطه فوق y₂ عمق ثانویه پـرش، y₁ عمـق اولیـه t جریان، *Fr*₁ عدد فرود اولیه، Re عدد رینولدز جریـان، ارتفاع موج و s طول موج بـستر مـوج دار مـیباشـد. بـا

صرفنظرکردن از اثر لزوجت با توجه به عدد رینولدز بالا رابطه به صورت زیر ساده میگردد.

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

دادههای آزمایشگاهی مورد استفاده

در این تحقیق از داده های تجربی اید و راجارتنام (2002) برای ارزیابی روش شبیه سازی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار با مدل های 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 اا از یک دریچـه کـشویی قابـل تنظـیم اسـتفاده شـده اسـت. بسترهای موج دار از جنس آلومینیم با ارتفاع موج های (t) او 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 می گردد و دریچه طوری تنظیم می شود که پرش هیدرولیکی در ابتدای بستر موج دار تشکیل گردد. مشخصات پرش هیدرولیکی در آزمون های تجربی مختلف در جدول 1 ارائه شده است.

نتايج و بحث

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

پروفیل سطح آب

پروفیل های سطح آب در طول پرش هیدرولیکی با مدل های آشفتگی k-۶ استاندارد و RNG k-۶ تعیین گردید.

		<u> </u>								
L _j (m)	y ₂ (m)	y ₁ (mm)	u ₁ (m/s)	q (m ² /s ⁻¹)	Re	Fr ₁	t (mm)	s (mm)	نوع بستر	آزمون
•/۴٨	•/١٢٨	۲۵/۴	۲/۵۰	•/•۶٣	۶۳۵۰۰	۵/۰	١٣	۶۸	Ι	A_1
•/٧۵	•/١٨٨	۲۵/۴	٣/۴٩	•/•∧٩	AA949	√/•	١٣	۶۸	Ι	A_2
•/^	•/٢١•	۵./٨	r/ar	•/14٣	148709	۴/ .	١٣	۶۸	Ι	\mathbf{B}_1
١/٢٩	•/٣١•	۵۰/۸	¥/•V	•/٢•٧	7.9009	Δ/Λ	١٣	۶۸	Ι	\mathbf{B}_2
•/٨٢	•/٢١•	۵۰/۸	r/ar	•/14٣	148709	۴/۰	22	۶۸	П	C_1
١/٢٩	•/٣١•	۵./٨	4/•V	•/٢•٧	7.9009	۵/۸	77	۶۸	П	C_2

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

در شکل 3 پروفیل سطح آزاد آب بدست آمده از مدل آشفتگی k-٤ استاندارد و جزء حجم سیال VOF برای آزمون A2 نشان داده شده است در شکل 4 پروفیل های سطح آب بدست آمده از مدل های عددی با دادههای

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



شکل۳- شبیه سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF)





در شکل 5 پروفیلهای بی بعد سطح آب با استفاده از دو مدل آشفتگی ٤-k استاندارد و ٤-kNG نمایش داده شده است. نتایج مدل عددی با منحنی متوسط بیبعد سطح آب بدست آمده از بررسی های تجربی اید و راجارتنام (2002) تطابق خوبی را نشان می دهد.

طول پرش ہیدرولیکی

با توجه به نمودارهای پروفیل سطح آب (شکل 4) طول پرش هیدرولیکی در آزمون های مختلف را می توان تعیین نمود به طوریکه طول پرش در آزمون های B1 ،A2 ،A1 و C1 تقریبا با مقادیر تجربی اید و راجارتنام (2002) یکسان بوده ولی در آزمون های B2 و C2اختلاف اندکی وجود دارد.

پروفیل های سرعت

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

برای بررسی تشابه پروفیلهای سرعت در مقاطع مختلف ماکزیمم سرعت طولی u_m تعیین گردید و مقدار مقیاس عمقی d برابر عمق نظیر $u=0/5u_m$ و $0>\frac{\partial u}{\partial y}$ 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

مدل های عددی و داده های تجربی اید و راجارتنام (2002) تطابق خوبی دارند.

همچنین جهت بررسی تشابه پروفیل های سرعت در طول پرش، تغییرات سرعت طولی ماکزیمم سu و مقیاس عمقی d در طول پرش هیدرولیکی بررسی گردید. مقدار سرعت اولیه جریان u در محدوده 1/8 تا 4/07 متر بر ثانیه قرار دارد. سرعت طولی ماکزیمم u در انتهای پرش هیدرولیکی از 20/0 تا 1/14 متر بر ثانیه تغییر می نماید. شکل 7 تغییرات <u>d</u> بدست آمده از مدلهای می نماید. شکل 7 تغییرات J بدست آمده از مدلهای می دهد. مطابق شکل پروفیلهای سرعت در امتداد پرش هیدرولیکی مشابه میباشند. روابط رگرسیونی زیر برای تعیین مقیاس عمقی d بترتیب در مدل های آشفتگی ع-k استاندارد و ع-RNG k و داده های تجربی به دست آمده است.

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

^b = 0.169 ^x + 0.6
[17]

$$\frac{-1}{y_1} = 0.109 \frac{-1}{y_1} + 0.0$$

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



گرفت که مقادیر مقیاس عمقی b بدست آمده از مدل RNG k-E با نمودار تجربی اید و راجارتنام (2002)

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

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 می توان

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{0}^{y} \mathbf{r} u^{2} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{0}^{y} p dz - \frac{\partial}{\partial x} \int_{0}^{y} \mathbf{S}_{x} dz = -\mathbf{t}_{b}$$
[19]



www.SID.ir



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

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 $P_{1} P_{2} P_{1} P_{2} P_{1} P_{2}$ و $S_{2} P_{1} P_{2} P_{2} P_{1}$ 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 اشتفلر، 1996).

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

مقدار ضریب نیروی برشی ٤ در بستر موج دار از رابطه زیر قابل برآورد است (اید و راجاراتنام 2002).

$$e = \frac{F_t}{g y_1^2 / 2}$$
 [22]

ضریب نیروی برشی ٤ با استفاده از نتایج مدل های آشفتگی ٤-k استاندارد و ٤-k RNG 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 ٤-استاندارد و RNG k-٤ 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 ماکزیمم تنش های برشی بستر تقریبا در فاصله 0/1 متری از ابتدای پرش هیدرولیکی دیده می شود.



شکل ۱۰- تغییرات تنش برشی بستر بدست آمده از مدل های آشفنگی k-٤ استاندارد وRNG k-٤

بحث

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 ٤-k استاندارد و RNG k-٤ انجام گرفته و با نتایج بررسی تجربی اید و راجاراتنام (2002) مقایسه گردید. نتایج حاصله به بصورت خلاصه در زیر ارائه می گردد.

مدل های آشفتگی ٤-k و روش جزء حجم سیال
 (VOF) برای پیش بینی پروفیل سلح آب در
 پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار مناسب

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

- مقایسه نتایج ارائه شده نشان می دهد که پروفیل های سطح آب بدست آمده از دو مدل
 آشفتگی ٤-۶ استاندارد و RNG k-٤ اختلاف
 ناچیزی دارند. فقط مدل RNG k-٤ کمی سریعتر
 از ٤-۶ استاندارد همگرا می گردد.
- 5- توزیع دو بعدی سرعت با استفاده از مدل های آشفتگی k-٤ استاندارد وRNG k-٤ با دادههای تجربی مطالعات پرش هیدرولیکی توسط اید و راجاراتنام (2002) مقایسه گردید. پروفیل های سرعت در امتداد پرش هیدرولیکی میشابه

می باشند. همچنین پروفیل هـای سـرعت بدسـت آمده از مدل عددی و دادههای تجربی بـا یکـدیگر مطابقت دارند.

- 4- با توجه به شکل و مقایسه روابط تعیین شده،
 مقادیر مقیاس عمقی b بدست آمده از مدل RNG
 ها 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 چرکشی 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.

6- مقادیر ضریب نیروی برشی ٤ 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.

ایت مقالیه میستخرج از گزارش نهایی طرح پژوهیشی شیماره 27/1236 میورخ 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.

تشکر و قدردانی

- 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 liner 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.