

## شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش سد مخزنی نمرود

زهرا شجاعیان<sup>1\*</sup> و سید محمود کاشفی پور<sup>2</sup>

تاریخ دریافت: 90/10/17 تاریخ پذیرش: 91/09/07

<sup>1</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

<sup>2</sup> استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

\*مسئول مکاتبه: E-mail: [Z.Shojaeian64@gmail.com](mailto:Z.Shojaeian64@gmail.com)

### چکیده

وقوع پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز سدها یکی از مهمترین راههای استهلاک انرژی می‌باشد. در این تحقیق پدیده پرش هیدرولیکی به کمک نرم افزار Flow-3D با استفاده از دو نوع مدل  $k - e$  استاندارد و RNG شبیه سازی شد. ابتدا برای پیش‌بینی دقیق خصوصیات پرش هیدرولیکی، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط چانسون و چاچرو در فلوم آزمایشگاهی دو مدل آشفتگی صحت‌سنجی شدند. بررسی انجام شده نشان داد که نتایج مدل آشفتگی RNG در مقایسه با مدل  $k - e$  استاندارد بهتر می‌باشد. سپس از این مدل برای شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در مدل فیزیکی حوضچه آرامش سد مخزنی نمرود استفاده شد. مقادیر محاسبه شده فشار، توزیع سرعت و پروفیل سطح آب با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه شدند، که انطباق خوبی با هم داشتند.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، سد مخزنی، مدل آشفتگی، نرم افزار Flow-3D.

## Numerical Modeling of Hydraulic Jump in Stilling Basin of Nemrood Reservoir Dam

Z Shojaeian<sup>\*1</sup> and SM Kashefipour<sup>2</sup>

Received: 7 January 2012 Accepted: 27 November 2012

<sup>1</sup>- Ph.D Student, Dept. of Hydraulic Structures, Univ. of Shahid Chamran, Ahvaz, Iran.

<sup>2</sup>- Prof., Dept. of Hydraulic Structures, Univ. of Shahid Chamran, Ahvaz, Iran.

\*Corresponding Author E-mail: [Z.Shojaeian64@gmail.com](mailto:Z.Shojaeian64@gmail.com)

### Abstract

One of the most important ways for dissipation of excess energy in downstream of overflow dams is the occurrence of hydraulic jump. In this research the hydraulic jump phenomenon was simulated using the Flow-3D software with two different turbulence models including the standard  $k-e$  and RNG  $k-e$  models. For this type of phenomenon and most accurate predictions of hydraulic jump characteristics, these two turbulence models were first verified using the data measured in a laboratory flume by Chanson and Chacherau. It was found that the RNG turbulence model performed much better than the standard  $k-e$  turbulence model. The model was then applied for simulation of hydraulic jump in the physical model of Nemrood dam stilling basin. The computed pressure, velocity distributions and water surface profiles were compared with the corresponding experimental measured data that matched together successfully.

**Key words:** Flow-3D software, Hydraulic jump, Reservoir dam, Turbulence model.

سد ها، سرریزهای بندها، تندابها و آبشارها که در آنها جریان از سرعت زیادی برخوردار است، استفاده کنند. تاکنون تحقیقات وسیعی درباره پرش هیدرولیکی و استهلاك انرژی در حوضچه آرامش به صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی انجام شده است. این امر به بلانگر (1828) کمک نمود تا فرق بین عمل شیب ملایم و شیب تند را تشخیص دهد. وو و راجاراتنام (1996) به بررسی انتقال جریان از پرش هیدرولیکی به جریان کاملاً توسعه یافته کانال باز پرداختند. چانسون و چاپرو (2011) آزمایش های جدیدی را روی لایه برشی در حال توسعه در پرش هیدرولیکی با جریان ورودی نیمه توسعه یافته انجام دادند. در این آزمایش توزیع

### مقدمه

پرش هیدرولیکی زمانی اتفاق می افتد که جریان در قسمتی از مسیر خود بنا بر شرایط و موقعیت کانال از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تبدیل شود. در نتیجه عمق جریان در فاصله نسبتاً کوتاهی افزایش قابل ملاحظه ای یافته و ضمن کاهش انرژی به طور محسوس، از میزان سرعت به اندازه قابل توجهی کاسته می گردد. خاصیت کاهندگی شدید انرژی در این پدیده پژوهشگران را بر آن داشته که از آن به عنوان بخشی از سیستم استهلاك انرژی در پای سازه های هیدرولیکی نظیر

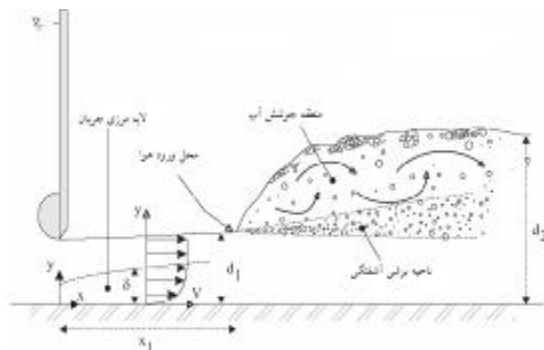
آشفته را با روش های عددی شبیه سازی کردند. نتیجه های مربوط به سرعت افقی با اندازه گیری های تجربی مقایسه شدند. گونزالس و بمباردلی (2005) با استفاده از مدل های آشفتگی  $k-e$  و RNG و گردابه های بزرگ (LES)<sup>1</sup> پرش هیدرولیکی روی یک بستر هموار را شبیه سازی کردند.

در این تحقیق پدیده پرش هیدرولیکی به کمک نرم افزار Flow-3D با استفاده از دو نوع مدل آشفتگی  $k-e$  و RNG شبیه سازی شد. هدف از این تحقیق کاربرد نرم افزار Flow-3D در شبیه سازی پارامترهای جریان در حوضچه آرامش می باشد که برای این منظور از مدل فیزیکی سرریز و حوضچه آرامش سد مخزنی نمود استفاده شد.

## مواد و روش ها

### تئوری جریان در پرش هیدرولیکی

نظر به اینکه پرش هیدرولیکی تغییر جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی می باشد لذا برای شبیه سازی این پدیده باید هر دو حالت فوق بحرانی و زیر بحرانی را بررسی کرد. نوسانات و تداخل آب و هوا در پرش هیدرولیکی سبب شده که توزیع فشار در حوضچه آرامش هیدرواستاتیک نباشد و باعث افت انرژی زیادی گردد (شکل 1). منظور از افت انرژی، انرژی جنبشی آشفتگی و کار انجام شده به وسیله تنش های رینولدز است.



شکل 1- تشکیل پرش هیدرولیکی در پایین دست دریچه.

غلظت هوا، سرعت متوسط جریان آب - هوا و فرکانس حباب های هوا در پرش هیدرولیکی اندازه گیری شدند. پروفیل سرعت در این آزمایش ها شباهت زیادی به پروفیل سرعت جت مماسی دارد، همچنین رابطه بین میزان هوا و فرکانس حباب های هوا به شکل سهموی است. اید و راجاراتنام (2002) با در نظر گرفتن زبری بستر، پارامترهای پرش هیدرولیکی را به دست آوردند. طبق نتیجه های بدست آمده، عمق پایاب مورد نیاز برای پرش هیدرولیکی در کف کانگه دار در مقایسه با کف صاف کمتر است و در نتیجه طول پرش در این شرایط کمتر از طول پرش در کف صاف است. مینان و همکاران (2004) مطالعاتی بر روی ویژگی های آشفتگی پرش هیدرولیکی انجام دادند. طبق نتیجه های بدست آمده حداکثر شدت آشفتگی و تنش های رینولدز با دور شدن از پنجه پرش به طور خطی کاهش پیدا می کند. اندازه گردابه های تولید شده نیز در انتهای پرش بیشتر می شود.

وانگ و لیو (2000) چهار روش از احجام محدود را روی شبکه های مثلثی بی ساختار مورد بررسی قرار دادند و مسائلی چون حل دو بعدی آب های کم عمق، شکست سد به صورت دو بعدی، پرش هیدرولیکی مایل، با این چهار روش، حل شدند و نتیجه های حل عددی، سرعت محاسبات و پایداری روش های حل، با یکدیگر مقایسه شدند. اونامی و همکاران (2000) به بررسی تخمین ضرایب انتقال و پخشیدگی جریان هوادهی شده در پرش هیدرولیکی بر مبنای مسائل کنترل بهینه پرداختند. یو و همکاران (2000) به مطالعه ویژگی های میدان جریان در اطراف سد سویانگ، به صورت عددی پرداختند. در این شبیه سازی از نرم افزار Flow-3D برای حل عددی معادله های ناویر- استوکس در محیط محاسباتی استفاده شد. مقادیر محاسباتی شامل فشار، مولفه های سرعت، نرخ جریان و تراز سطح آب هستند که با اندازه گیری های آزمایشگاهی موجود مقایسه شدند. میسرا و زو (2004) پرش هیدرولیکی

<sup>1</sup> Large Eddy Simulation

## مدل عددی

مساحت در راستای  $(x, y, z)$ ،  $R$  و  $X$  مربوط به سیستم انتخابی،  $R_{dif}$  تابع دیفیوژن و  $R_{sor}$  تابع چشمه می-باشد.

در سیستم مختصات کارتزین (مستطیلی) مقادیر  $R=1$  و  $x=0$  می‌شوند.  $R_{sor}$  نیز مربوط به محیط‌های متخلخل و ورود سیال ثانویه به محیط محاسبات با مقادیر و زمان‌های تعیین شده، و یا به عبارتی مسائل با دو نوع سیال، می‌باشد. تابع دیفیوژن  $R_{dif}$  نیز به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$R_{dif} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_p A_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( v_p A_y R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_p A_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) + x \frac{p v_p A_x}{x} \quad [2]$$

در این تابع  $v_p$  ضریب ثابت که همان ویسکوزیته سینماتیکی است و برابر با  $v_p = \frac{c_p m}{R}$  که  $m$  ضریب دیفیوژن مومنتم یا به عبارتی ویسکوزیته و  $c_p$  ضریب مربوط به سیالات با دانسیته غیر یکنواخت است. به دلیل غیر قابل تراکم بودن سیال، مقدار  $R$  ثابت و یکنواخت بوده و نیز با توجه به استفاده از مختصات کارتزین و غیر متخلخل بودن مسئله، معادله پیوستگی به صورت ذیل کاهش می‌یابد:

$$\frac{\partial}{\partial x} (uA_x) + \frac{\partial}{\partial y} (vA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (wA_z) = 0 \quad [3]$$

در حالت کلی رابطه 3 به صورت زیر نوشته می-شود:

$$\nabla(V.A) = 0 \quad [4]$$

ب) معادلات مومنتم

معادلات مومنتم یا حرکت از حل معادلات ناویر-استوکس حاصل می‌شوند. معادلات ناویر-استوکس با توجه به روش‌های استفاده شده در نرم افزار به صورت زیر می‌باشند:

جهت شبیه‌سازی عددی معادلات حاکم بر این جریان‌ها از یک نرم افزار موجود بنام Flow-3D استفاده شده است. این نرم افزار توانایی محاسباتی بالائی در جریان‌های کانال باز است. نرم افزار Flow-3D معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریب‌های حجم محدود حل می‌کند. محیط جریان به شبکه‌ای با سلول‌های مستطیلی ثابت تقسیم‌بندی می‌شود که برای هر سلول مقدارهای میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد. یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول محاسبه می‌شود. در این نرم افزار از دو تکنیک عددی برای شبیه‌سازی هندسی استفاده شده است.

## 1- روش حجم سیال (VOF)

این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## 2- روش کسر مساحت - حجم مانع (FAVOR)

این روش برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد.

## معادلات حاکم بر جریان در نرم افزار Flow-3D

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله پیوستگی، معادله مومنتم و معادله پروفیل سطح آزاد می‌باشد.

الف) معادله بقای جرم یا معادله پیوستگی

معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن معادله تعادل جرم برای یک المان سیال به دست می‌آید. به صورت کلی این معادله به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + x \frac{\rho u A_x}{x} = R_{dif} + R_{sor} \quad [1]$$

که در این معادله  $V_f$  مقدار نسبت حجم باز به جریان،  $R$  دانسیته سیال،  $(u, v, w)$  به ترتیب مقادیر سرعت در راستای  $(x, y, z)$ ،  $(A_x, A_y, A_z)$  به ترتیب مقادیر نسبت

ج) معادله پروفیل سطح آزاد

پروفیل سطح آزاد با استفاده از تابع حجم سیال  $F(x, y, z)$ ، یعنی  $(VOF)$ ، تخمین زده می‌شود. این تابع مقدار حجم سیال را در سلول محاسباتی نشان می‌دهد و به وسیله معادله زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y}(FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(FA_z w) \right] = 0 \quad [11]$$

که در این رابطه  $A$  متوسط نسبت مساحت جریان در جهت‌های  $(x, y, z)$ ،  $u$ ،  $v$  و  $w$  متوسط سرعت در جهت‌های  $(z, y, x)$ ،  $F$  تابع نسبت سیال که مقادیری بین  $[0, 1]$  دارد. اگر  $F = 1$  باشد، نشان دهنده اشغال کامل فضای سلول شبکه‌بندی توسط سیال و اگر  $F = 0$  باشد بیانگر عدم وجود سیال است. شکل 2 مثالی از مقادیر  $F$  در سلول‌های فضای شبکه‌بندی می‌باشد.

0.0	0.0	0.0	0.0
0.6	0.55	0.15	0.0
1.0	1.0	0.7	0.0
1.0	1.0	0.9	0.05

شکل 2- مقادیر  $F$  در سلول‌های شبکه‌بندی.

صحت سنجی نرم افزار برای شبیه سازی پرش هیدرولیکی ابتدا جهت صحت‌سنجی، نتایج مولفه‌های سرعت مربوط به مدل‌های آشفتگی  $k - e$  استاندارد و RNG در مدل حاضر، با نتایج آزمایشگاهی چانسون و چاچرو (2011) که در دانشگاه کوینسلند<sup>1</sup> استرالیا انجام شده بود، مقایسه شدند. آزمایشات در یک فلوم شیشه‌ای به طول 3/2 متر و عرض 0/5 متر و ارتفاع دیواره‌های 0/45 متر انجام شد. برای شبیه‌سازی، شرایط مرزی بالادست سرعت ثابت و در پایین‌دست نیز تراز سطح آب در مقطع خروجی (معادل عمق پایاب) اعمال شده است.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y V^2}{xV_f} = \quad [5]$$

$$- \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) + g_x + f_x - b_x - \frac{R_{sor}}{\rho V_f} (u - u_w - \delta u_s)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y uv}{xV_f} = \quad [6]$$

$$- \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial y} \right) + g_y + f_y - b_y - \frac{R_{sor}}{\rho V_f} (v - v_w - \delta v_s)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = \quad [7]$$

$$- \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) + g_z + f_z - b_z - \frac{R_{sor}}{\rho V_f} (w - w_w - \delta w_s)$$

که در این روابط  $(g_x, g_y, g_z)$  شتاب ثقل در جهت‌های  $(x, y, z)$ ،  $(f_x, f_y, f_z)$  شتاب لزوجتی سیال،  $(b_x, b_y, b_z)$  مقدار کاهش جریان مربوط به محیط‌های متخلخل،  $(u_w, v_w, w_w)$  سرعت حرکت مرزهای جامد و مربوط به مسائل با مسائل با مرزهای جامد متحرک،  $(u_s, v_s, w_s)$  مؤلفه‌های سرعت سیال در سطح چشمه و مربوط به مسائل با دبی متغیر،  $d$  نیز ضریب بیان کننده سرعت اولیه جریان می‌باشند.

با توجه به غیر قابل تراکم بودن سیال و نیز غیرمتخلخل بودن مسئله، ثابت بودن مرزهای جامد و انتخاب راستای  $z$  به عنوان راستای ثقل که در نتیجه تنها شتاب ثقل وارد بر جریان  $g_z$  خواهد شد، و استفاده از مختصات کارتیزین، معادلات ناویر- استوکس به صورت ذیل کاهش می‌یابند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \quad [8]$$

$$= - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

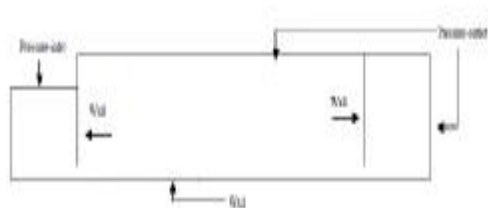
$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \quad [9]$$

$$= - \frac{1}{r} \left( \frac{\partial p}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \quad [10]$$

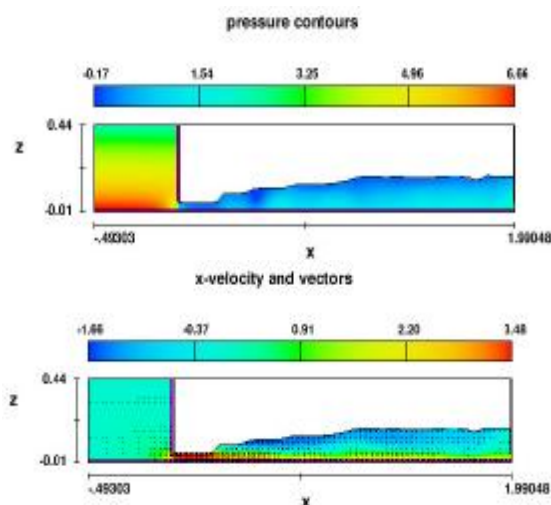
$$= - \frac{1}{r} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) + g_z$$

<sup>1</sup> Queensland



شکل 3- شرایط مرزی بکار برده شده برای مدل.

در شکل‌های 4 تا 7 مقدار سرعت افقی و فشار برای مدل RNG برای چهار عدد فرود ورودی جریان نشان داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود به علت انحنای شدید خط جریان در ناحیه پرش، توزیع فشار به صورت غیر هیدرواستاتیک است که این مطلب در شکل-ها به خوبی مشخص است. همچنین سرعت افقی منفی به علت وجود گردابه‌ها در این ناحیه نیز قابل ملاحظه است.



شکل 4- مقدار محاسبه شده فشار ( $KPa$ ) و سرعت افقی ( $m/s$ ) توسط نرم افزار با مدل RNG در  $F_{r1} = 5.1$  و  $Q = 0.0627(m^3/s)$ .

این آزمایش‌ها برای چهار عدد فرود به شرح جدول 1 انجام شد.

جدول 1- داده‌های آزمایشگاهی تحقیق چانسون و چاچرو (2011).

$Q(m^3/s)$	$F_{r1}$	$d_1(m)$	$NO$
0.0627	5/10	0.395	1
0.0545	4/43	0.395	2
0.0490	3/84	0.405	3
0.0446	3/08	0.441	4

برای شبیه‌سازی هندسه مدل از نرم افزار GAMBIT استفاده شد. هندسه مدل کاملاً شبیه مدل آزمایشگاهی ساخته شد. جهت تسریع در حل عددی مدل از ریز کردن شبکه محاسباتی در قسمت‌هایی که از حساسیت کمتری برخوردار است مانند بعد از حوضچه و در ارتفاعات بالای کانال که جریان آب به آنجا نمی‌رسد، خودداری شد. این شبکه‌بندی که پس از اطمینان از صحت نتایج و آزمون استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی صورت گرفت، در نهایت دارای 34442 گره است.

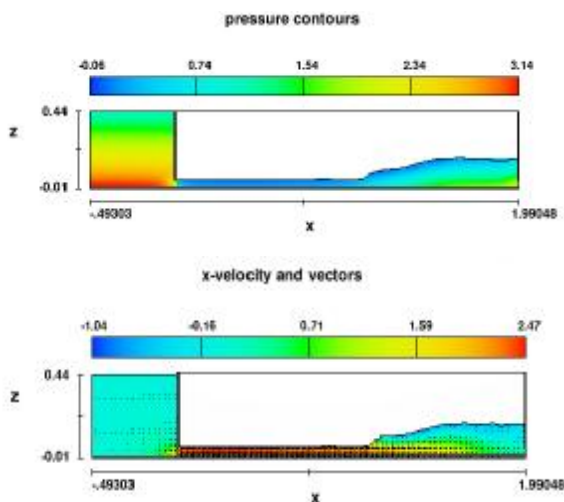
#### شرایط مرزی

شرایط مرزی اعمال شده در شکل 3 نشان داده شده است. در شبیه‌سازی مخزن، سطح بالای آن مرز فشار ورودی<sup>1</sup> در نظر گرفته شد و فشارها در آنجا فشار اتمسفر تنظیم شده است. برای دیواره‌های مخزن، بستر کانال و همچنین دریچه‌ها شرط مرزی دیواره<sup>2</sup> در نظر گرفته شد. همچنین شرط مرزی فشار خروجی<sup>3</sup> برای سقف و خروجی کانال در نظر گرفته شد.

<sup>1</sup> pressure-inlet

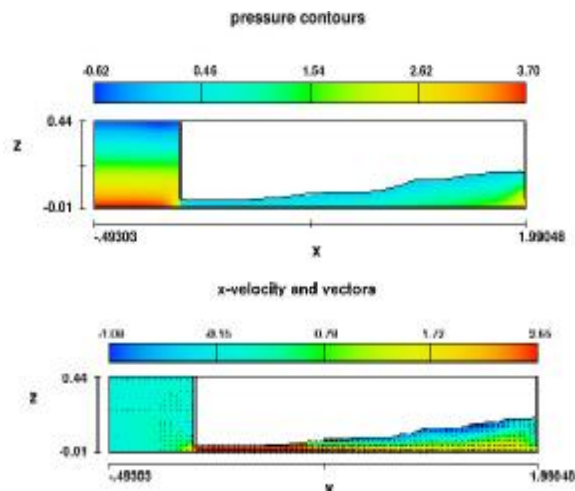
<sup>2</sup> wall

<sup>3</sup> pressure-outlet

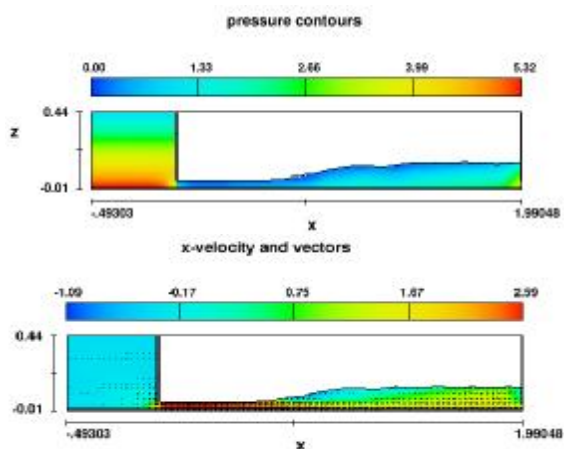


شکل 7- مقدار محاسبه شده فشار (KPa) و سرعت افقی  
توسط نرم افزار با مدل RNG در  
 $F_{r1} = 3.08$  و  $Q = 0.0446(m^3/s)$

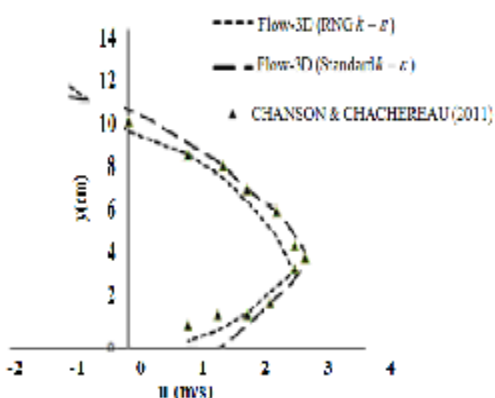
در ادامه پروفیل سرعت محاسبه شده با دو مدل  
RNG و  $k-e$  استاندارد در مقایسه با مقدارهای اندازه-  
گیری شده در شکل‌های 8 تا 11 ارائه گردیده است.  
پروفیل‌های سرعت ایجاد شده در لبه بالایی جریان  
پراکندگی بیشتری را نشان می‌دهند که این موضوع  
بواسطه رفتار غیر دائمی جریان در این ناحیه می‌باشد.  
همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است، مقدارهای  
پیش بینی شده برای پروفیل سرعت توسط مدل آشفتگی  
RNG نسبت به مدل آشفتگی  $k-e$  استاندارد بهتر  
می‌باشد. نرم افزار با بالا رفتن عدد فرود ورودی  
توانسته است پیش‌بینی بهتری داشته باشد.



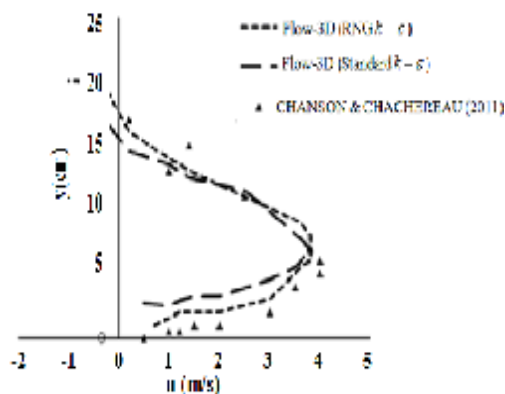
شکل 5- مقدار محاسبه شده فشار (KPa) و سرعت افقی  
توسط نرم افزار با مدل RNG در  $Q = 0.0545(m^3/s)$   
و  $F_{r1} = 4.43$



شکل 6- مقدار محاسبه شده فشار (KPa) و سرعت  
افقی توسط نرم افزار با مدل  
RNG در  $F_{r1} = 3.84$  و  $Q = 0.0490(m^3/s)$



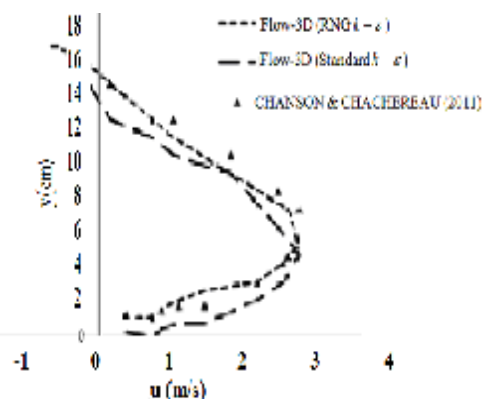
شکل 11- مقایسه پروفیل سرعت ( $m/s$ ) محاسبه شده با دو مدل و مقادیر اندازه گیری شده در فاصله 0/15 متر از پنجه پرش  $Q=0.0446(m^3/s)$  و  $F_{r1}=3.08$ .



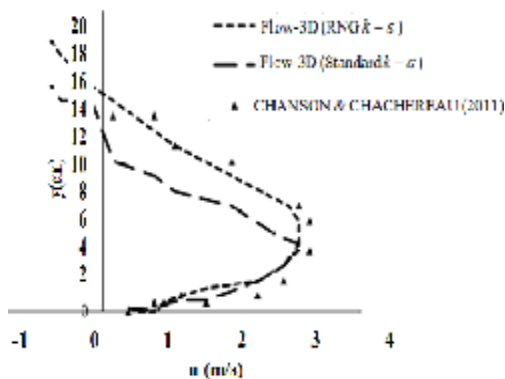
شکل 8- مقایسه پروفیل سرعت ( $m/s$ ) محاسبه شده با دو مدل و مقادیر اندازه گیری شده در فاصله 0/15 متر از پنجه پرش  $Q=0.0627(m^3/s)$  و  $F_{r1}=5.1$ .

#### شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی سد نمرود

به منظور کاربرد نرم افزار از نتایج مدل فیزیکی سرریز و حوضچه آرامش سد مخزنی نمرود استفاده شد. این مدل در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی مؤسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو با استفاده از مصالح پلکسی گلاس ساخته و نصب گردید. سد مخزنی نمرود بر روی رودخانه نمرود واقع شده‌است. این رودخانه دارای حوزه آبریز حدود 561 کیلومتر مربع بوده و در جنوب جاده تهران فیروزکوه و در نزدیکی روستای خنده تغییر جهت داده و به سوی جنوب باختری می‌رود. این رود به رودخانه فیروزکوه پیوسته و به اسم حبله رود به سوی گرمسار حرکت کرده و دشت گرمسار را آبیاری می‌کند. شهر فیروزکوه در 18 کیلومتری محل طرح نزدیکترین شهر به محل سد است. اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی سرریز سد نمرود از منابع منتشر شده تهیه گردیده است (کمایی رستمی 1388). این اطلاعات عبارتند از پروفیل طولی از مقاطع سرریز و حوضچه آرامش سد، اطلاعات هیدرولوژیکی شامل ظرفیت عبوردهی رودخانه، حداکثر دبی‌های 10000 ساله و PMF و تراز سطح آب در مخزن در هر کدام از سیلاب‌های ذکر شده و نقشه‌های پلان و پروفیل و

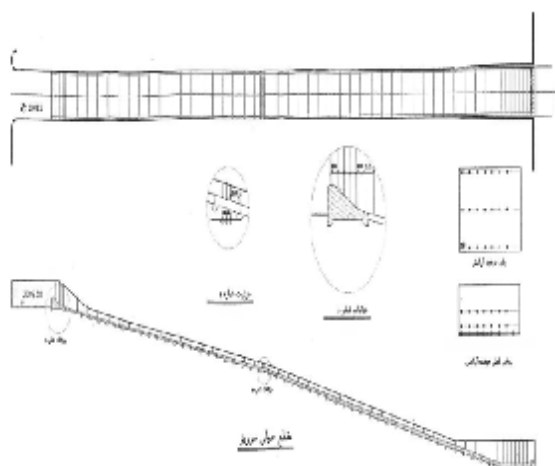


شکل 9- مقایسه پروفیل سرعت ( $m/s$ ) محاسبه شده با دو مدل و مقادیر اندازه گیری شده در فاصله 0/15 متر از پنجه پرش  $Q=0.0545(m^3/s)$  و  $F_{r1}=4.43$ .

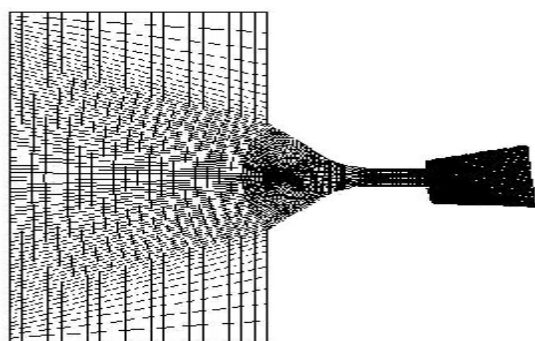


شکل 10- مقایسه پروفیل سرعت ( $m/s$ ) محاسبه شده با دو مدل و مقادیر اندازه گیری شده در فاصله 0/15 متر از پنجه پرش  $Q=0.0490(m^3/s)$  و  $F_{r1}=3.84$ .





شکل 12- پلان و مقطع طولی سرریز و حوضچه آرامش.



شکل 13- شبکه بندی محدوده محاسباتی برای سرریز و حوضچه آرامش توسط نرم افزار GAMBIT.

### نتایج و بحث

با توجه به نتایجی که از مدل سازی پرش- هیدرولیکی در بخش قبل حاصل شد، در شبیه سازی جریان در حوضچه آرامش از مدل آشفتگی RNG استفاده شد. در شکل 14 تغییرات عمق جریان نسبت به دبی عبوری از روی سرریز در دو حالت استفاده از داده های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی نرم افزار Flow-3D مقایسه شده است. همانطور که از نمودار مشخص است تراز سطح آب بر روی سرریز تابعی از دبی عبوری می باشد و نرم افزار به خوبی این تغییرات را شبیه سازی کرده است.

جزئیات سرریز و حوضچه آرامش سد نمرود (شکل 12) می باشند. در ضمن مدل آزمایشگاهی آن با نسبت 1:40 اجرا شده است. لازم به ذکر است که شبیه سازی برای سیلاب های 10000 ساله و PMF انجام شده و شرایط مرزی بالادست در جدول 2 ارائه شده است. برای توضیحات بیشتر به مرجع کمایی رستمی (1388) مراجعه شود.

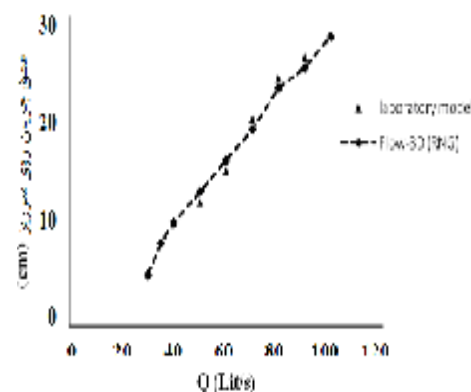
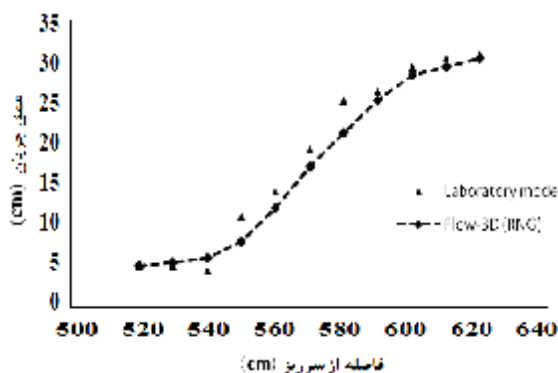
جدول 2- شرایط مرزی بالادست حوضچه آرامش.

دوره بازگشت (سال)	آبگذری ( $m^3/s$ )	آبگذری معادل در مدل با مقیاس 1:40 ( $lit/s$ )
10000	482/7	47/7
PMF	1017/45	100/55

### شرایط لازم برای شبیه سازی توسط مدل Flow-3D

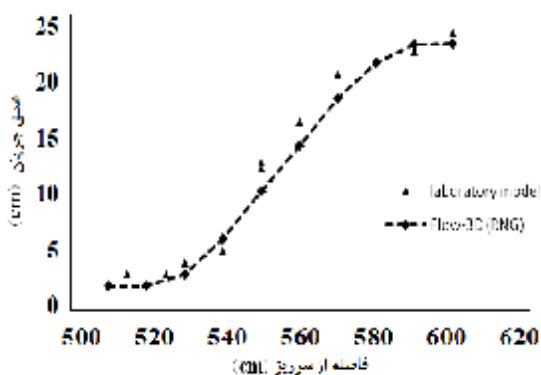
برای شبیه سازی سه بعدی سرریز و حوضچه آرامش از یک شبکه سه بعدی استفاده شد. با توجه به استفاده نرم افزار Flow-3D از روش FAVOR برای مدل سازی موانع و برای در نظر گرفتن بلوک های حوضچه به وسیله نرم افزار، ناگزیر می بایست از یک شبکه با دقت کافی استفاده کرد. برای ساخت هندسه مدل از نرم افزار GAMBIT استفاده شد. از آنجایی که از یک شبکه مکعب مستطیلی استفاده می شود و ریز کردن سلول ها در یک جهت باعث بروز خطا در انجام محاسبات می شود، لذا ابعاد سلول ها در همه ابعاد بطور یکسان و برابر 0/03 متر در نظر گرفته شد. شکل 13 شبکه بندی صورت گرفته برای سرریز و حوضچه آرامش توسط نرم افزار GAMBIT را نشان می دهد همچنین پلان و مقطع طولی سرریز و حوضچه آرامش در شکل 12 ارائه شده است.

دارد ولی این اختلاف در انتهای پرش به علت کاهش تلاطم جریان، کاهش می‌یابد.



شکل 14- تغییرات عمق جریان نسبت به دبی عبوری از روی سرریز.

شکل 15- تغییرات عمق جریان در پرش هیدرولیکی ایجاد شده در دبی 100/55 لیتر بر ثانیه در عمق پایاب 30/74 cm.



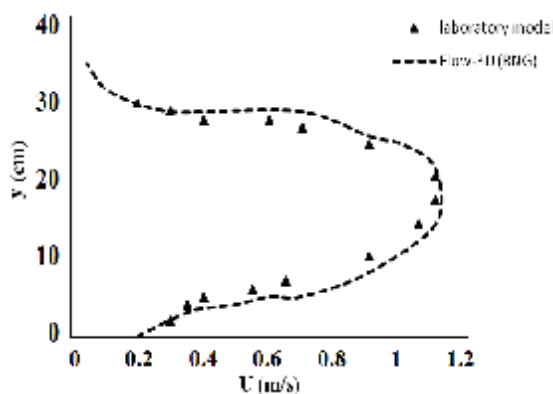
شکل 16- تغییرات عمق جریان در پرش هیدرولیکی ایجاد شده در دبی 47/7 لیتر بر ثانیه در عمق پایاب 24/3 cm.

#### بررسی تغییرات فشار در کف حوضچه آرامش

در شکل‌های 17 و 18 روند تغییرات فشار در کف حوضچه آرامش در یک عمق پایاب ثابت، توسط نرم-افزار شبیه سازی و با مقادیر مدل آزمایشگاهی مقایسه شد. در این اشکال فشار در اطراف موانع ابتدایی و انتهای حوضچه دارای مقدار بالایی است که این پدیده به علت برخورد جریان با این موانع بوجود می‌آید. لازم به ذکر است که توزیع فشار در حوضچه‌ها به دلیل آشفتگی و انحناى جریان به صورت غیر هیدرواستاتیک است. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، نرم افزار

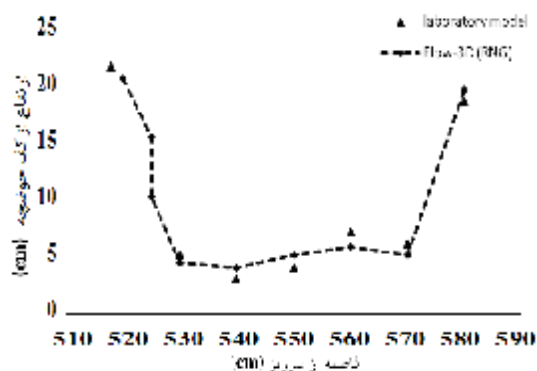
بررسی تغییرات تراز سطح آب در حوضچه آرامش.

در بررسی پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی، در یک عمق پایاب ثابت روند تغییرات عمق برای دو دبی 100 /55 و 47/7 لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری گردید جریان به صورت فوق بحرانی و با اعداد فرود بالا وارد حوضچه آرامش می‌شود و در صورت عملکرد مناسب حوضچه، پس از استهلاك انرژی توسط پرش هیدرولیکی با سرعت کمتر و به صورت زیر بحرانی از حوضچه خارج می‌شود. برای شبیه‌سازی جریان فوق بحرانی 1 متر از انتهای تنداب نیز در مدل حوضچه شبیه‌سازی شده است. شرایط مرزی بالادست، با اعمال تراز سطح آب و سرعت به نرم افزار معرفی شده است. برای مرز پایین‌دست نیز فقط تراز پایاب به مدل اعمال می‌شود. شکل‌های 15 و 16 روند تغییرات عمق جریان را در پرش هیدرولیکی برای عمق پایاب ثابت در مدل آزمایشگاهی و نرم افزار برای سیلاب‌های 10000 ساله و PMF نشان می‌دهد. همان‌طور که از روی نمودارها مشخص است، نرم افزار نتایج خوبی را در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها در مدل آزمایشگاهی، پیش‌بینی کرده است، به‌خصوص تراز سطح آب بعد از پرش هیدرولیکی تطابق خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. در منطقه پرش-هیدرولیکی، به علت تلاطم و آشفتگی زیاد جریان، مقادیر محاسبه شده اندکی با مقادیر اندازه‌گیری شده تفاوت

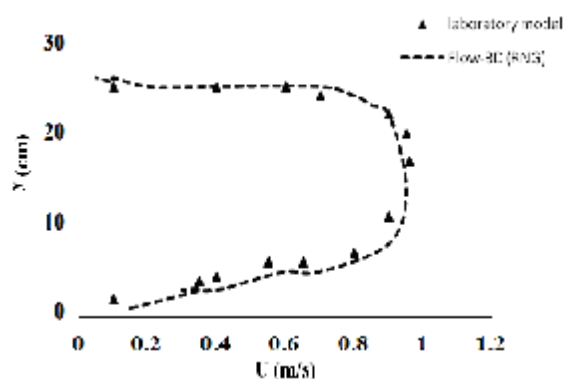


شکل 19- مقایسه پروفیل سرعت اندازه گیری و پیش-بینی شده در حوضچه در دبی 100/55 لیتر بر ثانیه در عمق پایاب 30/74 cm.

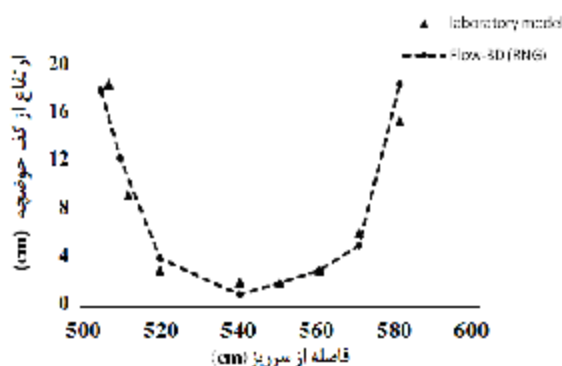
نتایج خوبی را در مقایسه با اندازه گیری ها ، پیش بینی کرده است.



شکل 17- تغییرات فشار کف حوضچه در دبی 100/55 لیتر بر ثانیه در عمق پایاب 30/74 cm.



شکل 20- مقایسه پروفیل سرعت اندازه گیری و پیش-بینی شده در حوضچه در دبی 47/7 لیتر بر ثانیه در عمق پایاب 24/3 cm.



شکل 18- تغییرات فشار کف حوضچه در دبی 47/7 لیتر بر ثانیه در عمق پایاب 24/3 cm.

به منظور تعیین میزان متوسط خطای نسبی بین مقادیر محاسبه شده توسط نرم افزار و مقادیر مدل آزمایشگاهی از روش های آماری که در زیر ارائه شده اند استفاده گردید:

درصد خطا ( $E\%$ ) که بصورت زیر تعریف می شود:

$$E\% = \frac{\sum_{i=1}^N |C_{mi} - C_{pi}|}{\sum_{i=1}^N C_{mi}} \times 100 \quad [12]$$

متوسط مجذور مربعات خطا (RMSE) که به صورت زیر تعریف شده است:

بررسی تغییرات پروفیل سرعت در حوضچه آرامش شکل های 19 و 20 تغییرات پروفیل سرعت اندازه گیری شده در آزمایشگاه و پیش بینی شده توسط نرم افزار را در دبی های مشخص در حوضچه آرامش نشان می دهد. در این مرحله نیز نرم افزار توزیع عمقی سرعت جریان را در مقایسه با اندازه گیری های آزمایشگاهی به خوبی محاسبه کرده است.

مقدار خطای بالاتری نسبت به دو مشخصه دیگر برآورد می‌کند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_{mi} - C_{pi})^2}{N}} \quad [13]$$

### نتیجه گیری کلی

در این تحقیق شرایط جریان در حوضچه آرامش سد مخزنی نمرود به کمک نرم افزار Flow-3D شبیه‌سازی شد. ابتدا برای صحت‌سنجی نرم‌افزار در پیش‌بینی خصوصیات هیدرولیکی پرش هیدرولیکی از مدل آزمایشگاهی حوضچه آرامش چانسون و چاپرو (2011) استفاده شد و پرش هیدرولیکی با استفاده از دو نوع مدل آشفتگی  $k - e$  و RNG شبیه‌سازی شد. سپس از مدل فیزیکی حوضچه آرامش سد مخزنی نمرود استفاده شد و نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های مدل آزمایشگاهی مربوطه مقایسه شد. مقایسه نتایج نشان داد که نرم افزار قادر به پیش‌بینی توزیع عمقی سرعت در پرش هیدرولیکی می‌باشد. مقدارهای محاسباتی شامل توزیع فشار، توزیع عمقی سرعت و پروفیل سطح آب هستند که در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی از دقت قابل قبولی برخوردارند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های تجربی دارای انطباق خوبی است. همچنین نرم افزار مقدار فشار، حول موانع موجود در حوضچه را محاسبه کرده است و در مناطقی که انتظار می‌رود به علت برخورد جریان با این موانع فشار افزایش یابد این مسئله دیده می‌شود. بنابراین از این نرم افزار برای شبیه‌سازی جریان در ابعاد واقعی حوضچه می‌توان استفاده کرد.

که در این روابط،  $N =$  تعداد داده‌ها،  $C_m =$  مقادیر مشخصه هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و  $C_p =$  مقادیر مشخصه هیدرولیکی برآورد شده توسط مدل Flow-3D می‌باشد.

نتایج آماری حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و محاسبه شده توسط مدل برای مشخصات هیدرولیکی مورد نظر برای دبی 100/55 لیتر بر ثانیه بررسی و نتایج حاصل از آنها در جدول 3 آمده است.

### جدول 3- نتایج حاصل از تحلیل آماری مدل برای

مشخصات هیدرولیکی مورد نظر برای دبی 100/55 لیتر بر ثانیه

مشخصه هیدرولیکی	%E	RMSE
تغییرات تراز سطح آب در حوضچه آرامش	4/29	0/02
تغییرات فشاردرکف حوضچه آرامش	4/94	0/04
تغییرات پروفیل سرعت در حوضچه آرامش	8/58	0/06

با توجه به جدول مشاهده می‌گردد که مدل در برآورد تغییرات تراز سطح آب در حوضچه آرامش دارای خطای کمتری نسبت به سایر مشخصات هیدرولیکی می‌باشد. از طرف دیگر مشاهده می‌شود که مدل تغییرات پروفیل سرعت در حوضچه آرامش را با

### منابع مورد استفاده

- کمانی رستمی ع، 1388. بررسی تغییر شکل شوت بلوک و عمق آب پایین‌دست روی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- Bélanger, JB, 1828. Essay on Digital Solution Jcielques Problems Related to Movement Pertmanent Water Current. Carilian-Goeury, Paris, France (in French).

- Chanson H and Chacherau Y, 2011. Bubbly flow measurements in hydraulic jumps with small inflow Froude Numbers. *International Journal of Multiphase Flow*, 37(6): 555-564.
- Ead S and Rajaratnam N, 2002. Hydraulic jumps on corrugated bed. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 128(7) : 656-663.
- Gonzalez A and Bombardelli F, 2005. Two-Phase flow theory and numerical models for hydraulic jumps, including air entrainment. Pp.28-29. *Proceeding of the Congress- International Association for Hydraulic Research*.
- Minnan L, Nallamuthu R and Zhu DZ, 2004. Turbulence structure of hydraulic jumps of low Froude Numbers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*130(6): 511-520.
- Misra SK and Zhao Q, 2004. Numerical study of a turbulent hydraulic jump. 17<sup>th</sup> ASCE Engineering mechanics Conference, 13-16 June, University of Delaware, Newark, DE. JUNE.
- Unami K, Kawachi T, Munir B M and Itagaki H, 2000. Estimate of diffusion and convection coefficients in an aerated hydraulic jump. *Advances in Water Resources* 23(4): 475-481.
- Wang J and Liu R, 2000. A comparative study of finite volume methods on unstructured meshes for simulation of 2D shallow water wave problems. *Mathematics and Computers in Simulation* 53(5): 171-184.
- Wu S and Rajaratnam N, 1996. Transition from hydraulic jump to open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 122(9): 526-528.
- Yoo M, Chen Y and Zhou Q, 2000. Case study of an s-shape spillway using physical and numerical models. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 132(9): 892-898.