

کاربری آموزشی نرم افزار *Flow-3D* در بررسی مدل آشفته‌گی شبیه‌سازی جریان سه‌بُعدی در حوضچه پرش هیدرولیکی با موانع بتنی

سعیدرضا صباغ یزدی^۱، حمید شاملو^۲، فاطمه رستمی^۳

چکیده

در این مقاله پدیده پرش هیدرولیکی که یکی از مهمترین راههای استهلاک انرژی جریان در مهندسی هیدرولیک است، به کمک نرم افزار *Flow-3D* شبیه سازی شد. برای درستی سنجی نرم افزار در پیش بینی پارامترهای جریان در پرش هیدرولیکی از یک نمونه آزمایشگاهی استفاده شد و نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با استفاده از دو مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$ و RNG ، با آن مقایسه شد. سپس از یک حوضچه آرامش استفاده شد و نتیجه‌های حاصل از شبیه سازی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مربوط مقایسه شد. نتیجه‌های شبیه سازی عددی برای پروفیل سطح آب و توزیع عمقی سرعت در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی دارای انطباق خوبی است.

کلمات کلیدی: حوضچه آرامش، پرش هیدرولیکی، نرم افزار *Flow-3D*، روش *VOF*

۱- مقدمه

برای جلوگیری از خسارات ناشی از انرژی فوق‌العاده آب در سرعت‌های فوق بحرانی و نیز به منظور از بین بردن انرژی اضافی جنبشی موجود در چنین جریانی، به طور عموم لازم است از سازه‌های ویژه‌ای به نام انرژی‌گیرنده که در پایین‌دست جریان ساخته می‌شود استفاده نمود. این گونه سازه‌ها افزون بر از بین بردن انرژی آب وسیله‌ای برای کنترل و مهار پرش هیدرولیکی و به وجود آوردن شرایط جهت وقوع آن در یک موقعیت مکانی ویژه به شمار می‌روند.

تاکنون پژوهش‌های وسیعی درباره پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی در حوضچه آرامش به صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی انجام شده است، که از آن میان می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. در سال ۱۹۹۶، *Wu*، *Rajaratnam* به بررسی انتقال جریان از پرش هیدرولیکی به جریان کاملاً توسعه یافته کانال باز پرداختند [۱]. در سال ۲۰۰۰، *Chanson* و *Brattberg* آزمایش‌های جدیدی را روی لایه برشی در حال توسعه در پرش هیدرولیکی با جریان ورودی نیمه توسعه یافته انجام دادند. در این

سدهای مخزنی یکی از مهم‌ترین سازه‌هایی هستند که برای ذخیره آب سطحی احداث می‌شوند. در مخزن این نوع سد ها حجم آب بسیار زیادی ذخیره می‌شود و به همین دلیل وجود یک طراحی مناسب در آنها از اهمیت خاصی برخوردار است. هر سد از تعداد زیادی سازه جانبی تشکیل شده است که یکی از مهم‌ترین آن سازه های تخلیه کننده سیلاب است. از جمله این سازه ها می‌توان به تخلیه کننده های تحتانی و سرریزها اشاره کرد که در سدهای بزرگ غالباً از آنها برای تخلیه سیلاب استفاده می‌شود.

مقاله دریافت ۸۷/۲/۱ دریافت و در تاریخ ۸۷/۳/۲۷ به تصویب نهایی رسید.

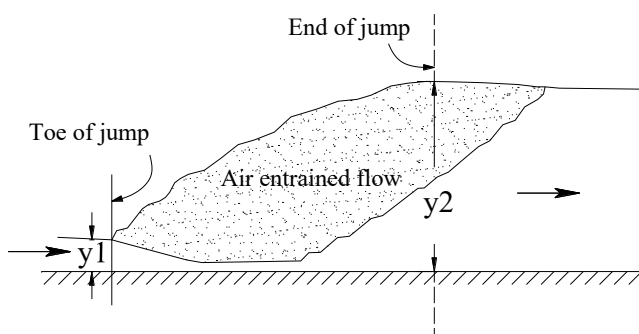
^۱ دانشیار، مهندسی عمران دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
پست الکترونیکی: SYazdi@kntu.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران آب، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

۲- بررسی فیزیک جریان در حوضچه آرامش پرش هیدرولیکی

جریان در بالادست حوضچه آرامش فوق بحرانی و در پایین دست زیر بحرانی است. به همین علت برای شبیه سازی جریان حوضچه های آرامش باید شبیه سازی عددی هر دو نوع جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی را بررسی کرد. اختلاط شدید، انحنا در جریان و ورود هوا از ویژگی های ذاتی پرش هستند، که این ویژگی ها باعث می شوند تا فشار در حوضچه آرامش از توزیع هیدروستاتیک پیروی نکند. ورود هوا به جریان به علت شکست تعدادی زیادی از امواج در سطح اتفاق می افتد. به علت آشفتگی بالای جریان در این ناحیه مقداری از این هوا به مناطق پایین تر منتقل می شود و به دلیل وجود شنوری مقداری از حباب های هوا به سطح می آیند. انرژی در محدوده ای در ابتدای پرش به سرعت کاهش پیدا می کند و در بازه های پایین دست افت انرژی قابل توجهی نخواهیم داشت. منظور از افت انرژی، انرژی جنبشی آشفتگی و کار انجام شده به وسیله تنش های رینولدز است.



شکل ۱ ورود هوا در پرش هیدرولیکی

۳- معادله های حاکم بر جریان

معادله های حاکم بر جریان سیال شامل معادله های پیوستگی و اندازه حرکت می باشد. معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن معادله ی تعادل جرم برای یک المان سیال به دست می آید. بصورت کلی این معادله به شکل زیر نوشته می شود:

$$(1) \quad V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = 0$$

آزمایش های توزیع غلظت هوا، سرعت متوسط جریان آب- هوا و فرکانس حباب های هوا 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 [۲]. Ead و Rajaratnam در سال ۲۰۰۲ با در نظر گرفتن زبری بستر، پارامترهای پرش هیدرولیکی را به دست آوردند. طبق نتیجه های به دست آمده، عمق پایاب مورد نیاز برای پرش های هیدرولیکی در کف کناره دار در مقایسه با کف صاف کمتر است و در نتیجه طول پرش در این شرایط کمتر از طول پرش در کف صاف است [۳]. در سال ۲۰۰۴ مطالعاتی بر روی ویژگی های آشفتگی پرش هیدرولیکی توسط Liu و همکاران انجام شد. طبق نتیجه های آزمایش ها، حداکثر شدت آشفتگی و تنش های رینولدز با دور شدن از پنجه پرش به طور خطی کاهش پیدا می کند. اندازه ی گردابه های تولید شده نیز در انتهای پرش بیشتر می شود [۴].

در سال ۲۰۰۰، Liu و Wang چهار روش از احجام محدود را روی شبکه های مثلثی بی ساختار مورد بررسی قرار دادند و مسائلی چون حل دو بُعدی آب های کم عمق، شکست سد به صورت دو بُعدی، پرش هیدرولیکی مایل، با این چهار روش، حل شدند و نتیجه های حل های عددی، سرعت محاسبات و پایداری روش های حل، با یکدیگر مقایسه شدند [۵]. Unami, et. al. (2000) به بررسی تخمین ضرایب انتقال و پخشیدگی جریان هوادهی شده در پرش هیدرولیکی بر مبنای مسائل کنترل بهینه پرداختند [۶]. Yoo, et. al. (2002) 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. مقدارهای محاسباتی شامل فشار، مؤلفه های سرعت، نرخ جریان و تراز سطح آب هستند که با اندازه گیری های آزمایشگاهی موجود مقایسه شدند [۷]. Misra و Zhao در سال ۲۰۰۴ پرش هیدرولیکی آشفته را با روش های عددی شبیه سازی کردند. نتیجه های مربوط به سرعت افقی با اندازه گیری های تجربی مقایسه شدند [۸].

المان‌ها شامل سیال نیستند. بعضی از المان‌ها پر و برخی خالی هستند و تعداد کمی از المان‌ها هم شامل سطح آزاد هستند (یعنی نیمه پر هستند). یک راه مناسب برای تعیین موقعیت المان تعیین کمیت F است که میزان کسری از المان را که توسط سیال احاطه شده است تعیین می‌کند. به این کمیت، تابع حجم سیال (VOF) گفته می‌شود. تابع کسر سیال F در محیط سیال برابر با یک و در خارج از سیال برابر با صفر است. با داشتن مقدار کسر F می‌توان مکان عمومی و زاویه سطح آزاد در المان سطحی را به دست آورد و این حالت با سیال موجود در المان‌های مجاور کنترل می‌شود. سیال در المان‌های سطحی می‌بایست در نزدیک ترین فاصله با المان‌های مجاور که بیشترین سیال را دارند قرار بگیرد.

روش $FAVOR$ برای شبیه سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزها کاربرد دارد. هندسه مسئله با محاسبه کسر مساحت وجوه و کسر حجم هر المان برای شبکه که توسط موانعی محصور شده‌اند تعریف می‌شود. همان طور که کسر حجم سیال موجود در هر المان شبکه برای قرارگیری سطوح سیال مورد استفاده قرار می‌گرفت، کمیت کسر حجم دیگری برای تعیین سطوح صلب مورد استفاده قرار می‌گیرد. فلسفه روش $FAVOR$ براین مبناست که الگوریتم‌های عددی بر مبنای اطلاعاتی شامل فقط یک فشار، یک سرعت، یک دما و... برای هر حجم کنترل است، که این با استفاده از مقدارهای زیادی از اطلاعات برای تعریف هندسه متناقض است. بنابراین روش $FAVOR$ المان‌های ساده مستطیلی را حفظ می‌کند در صورتی که می‌تواند اشکالی با هندسه پیچیده در حد سازگاری با مقادیر جریان میانگین گیری شده را برای هر المان نشان دهد [۹ و ۱۰].

۴-۱ معادله پروفیل سطح آزاد

پروفیل سطح آزاد با استفاده از تابع حجم سیال (VOF)، یعنی $F(x,y,z)$ تخمین زده می‌شود. این تابع مقدار حجم سیال را سلول محاسباتی بیان می‌کند و به وسیله معادله‌ی ۳ بیان می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) \right] = 0 \quad (3)$$

F به نوع مسأله مورد بررسی بستگی دارد. در جریان‌های تک فازی F بیانگر حجم سلول است که به وسیله سیال

اشغال شده است، بنابراین در مناطقی که سیال وجود دارد $F=1$ و در مناطقی که حباب و حفره داریم $F=0$ می‌باشد [۹ و ۱۰].

که در آن V_F کسر حجم باز به جریان، ρ چگالی سیال است. مولفه‌های سرعت (u,v,w) در جهات (x,y,z) هستند. A_x کسر سطح باز جریان در جهت x است، A_y و A_z به طور مشابه کسر سطح در جهات y ، z هستند.

معادله‌های حرکت ناویر-استوکس سیال با مؤلفه‌های سرعت (u,v,w) در مختصات سه بُعدی، به شکل زیر نمایش داده می‌شود:

(۲)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{aligned}$$

در این معادله‌های (G_x, G_y, G_z) شتاب‌های جرم، (f_x, f_y, f_z) شتابهای لزجت می‌باشد [۹ و ۱۰].

۴- روش های حل عددی مورد استفاده در نرم افزار

نرم افزار $Flow-3D$ معادله‌های حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریب‌ها احجام 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 بجز سرعت که در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. در این نرم‌افزار از دو فن عددی برای شبیه سازی هندسی استفاده شده است:

- ۱- روش حجم سیال VOF : این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- ۲- روش کسر مساحت-حجم مانع $FAVOR$: برای شبیه سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد [۸ و ۹].

روش انتقال VOF موجود در $Flow-3D$ بر مبنای تقریب‌های سلول دهنده - پذیرنده است که اولین بار توسط $Hirt$ و $Nichols$ در سال ۱۹۸۱ بیان شد. روش استاندارد از اپراتور $Splitting$ و مقدارهای تابع VOF از زمان قبل را برای محاسبه شار عبوری در هر سه جهت مختصات محاسبه می‌کند. وقتی سطح آزاد وجود دارد همه

۴-۲ روابط ورود هوا

مدل‌های انتقال آشفته‌گی بر اساس انرژی جنبشی آشفته‌گی، Q و تابع استهلاک D طبقه بندی می‌شوند. طول مشخصه چرخابه‌های آشفته‌گی با معادله ۴ به دست می‌آید:

$$L_t = \frac{cnu \sqrt{1.5Q^3}}{D} \quad (۴)$$

از این مقیاس برای مشخص کردن آشفته‌گی‌های سطحی استفاده می‌شود. انرژی جنبشی آشفته‌گی بر واحد سطح (یعنی فشار) به همراه المان سیال که تا ارتفاع L_t بالا می‌آید و با انرژی تنش سطحی بر مبنای انحنای L_t با استفاده از معادله ۵ به دست می‌آید:

$$P_d = \rho g_n L_t + \sigma / L_t \quad (۵)$$

که در آن ρ چگالی سیال، σ ضریب تنش سطحی و g_n مؤلفه شتاب گرانش در جهت عمود بر سطح آزاد می‌باشد. برای اینکه هوا وارد جریان شود می‌بایست انرژی جنبشی آشفته‌گی در واحد حجم، از P_d بیشتر باشد، یعنی باید نیروهای آشفته‌گی برای غلبه بر نیروهای تعادل سطحی، به اندازه کافی بزرگ باشند. حجم هوای وارد شده در واحد زمان، δV ، می‌بایست متناسب با مساحت سطح سیال، A_s و ارتفاع سیال روی تراز متوسط سطح جریان باشد. برای این منظور $\delta V = C_{air} A_s (2(P_t - P_d) / \rho)^{1/2}$ است. C_{air} یک ضریب نسبت است. اگر P_t کمتر از P_d باشد، δV برابر صفر خواهد بود. انتظار می‌رود که ضریب C_{air} کمتر از واحد باشد، زیرا فقط قسمتی از حجم آشفته‌گی که به سطح رسیده است توسط هوا اشغال می‌شود [۹ و ۱۰].

۵- درستی سنجی نرم افزار برای شبیه سازی پرش هیدرولیکی

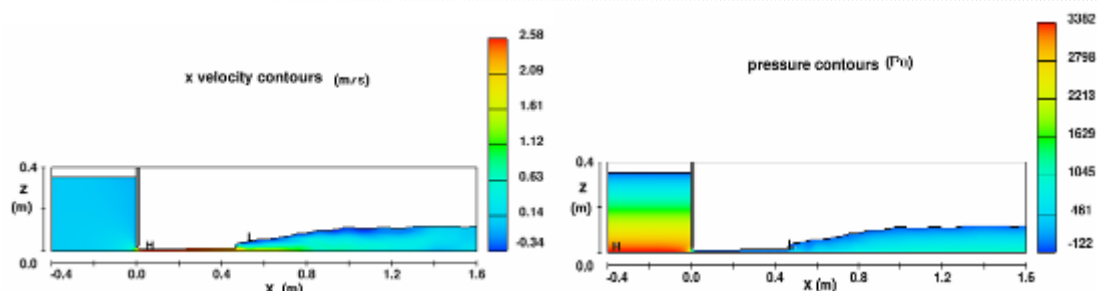
برای شبیه سازی پرش هیدرولیکی از نتیجه‌های آزمایشگاهی (H. Chanson and T. Brattberg (2000 استفاده شد. این آزمایش در یک فلوم شیشه ای به طول ۳/۲ متر، عرض ۰/۲۵ متر و با دیواره‌هایی به ارتفاع ۰/۳ متر انجام شد. آزمایش‌ها برای دو عدد فرود ۶/۳۳ و ۸/۴۸ تکرار شد. جریان به صورت فوق بحرانی از یک دریچه کشویی با بازشدگی ۲۰ میلیمتر وارد این فلوم می‌شود. تراز پایاب نیز به وسیله‌ی یک سرریز انتهایی کنترل می‌شود. ویژگی‌های جریان آب- هوا در این آزمایش توسط *dual-tip conductivity probe* و لوله پیتوت اندازه‌گیری شد [۲].

برای شبیه‌سازی از شرایط مرزی بالادست سرعت ثابت و تراز سطح آب و در پایین دست نیز تراز سطح آب در مقطع خروجی (معادل عمق پایاب) اعمال شده است. از دو مدل $k-\varepsilon$ و RNG برای شبیه سازی آشفته‌گی استفاده و ورود هوا نیز در مدل‌سازی کامپیوتری در نظر گرفته شد. شرایط مرزی دیواره‌ها نیز به صورت *No-Slip* با زبری مطلق ۰/۰۰۳ میلیمتر (معادل زبری شیشه) است. در تمامی موارد برای شبیه سازی از یک شبکه مکعبی سه بعدی با سلول‌هایی با ابعاد ۵×۵×۵ میلیمتر استفاده شد.

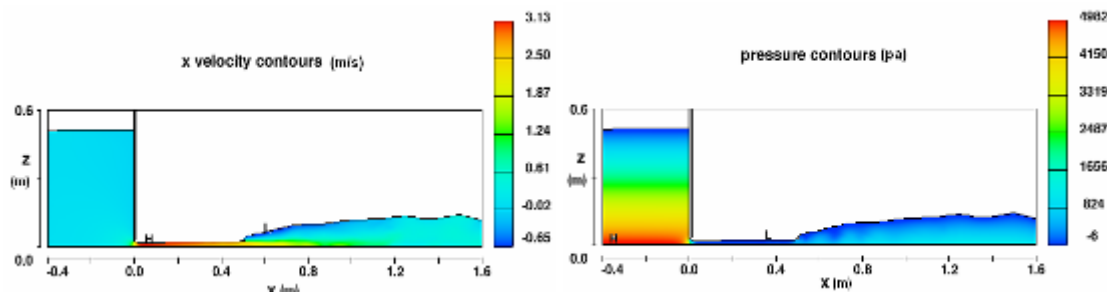
در شکل‌های ۲ و ۳ مقادیرهای سرعت افقی و فشار برای مدل RNG برای دو مقدار از عدد فرود ورودی جریان نشان داده شده‌اند. همان گونه که انتظار می‌رود به علت انحنای شدید خط جریان در ناحیه پرش، توزیع فشار به صورت غیرهیدروستاتیک است که این مطلب در شکل‌ها به خوبی مشخص است. همچنین سرعت افقی منفی در پرش هیدرولیکی به علت وجود گردابه‌ها در این ناحیه نیز قابل ملاحظه است.

جدول ۲ مشخصات شبکه مورد استفاده و زمان همگرایی مدل شبیه سازی شده

دقت همگرایی	زمان لازم برای همگرایی (ثانیه)	حداکثر ابعاد سلول‌های محاسباتی (x×y×z)	تعداد سلول‌های محاسباتی	مدل آشفته‌گی	عدد فرود
$2/3 \times 10^{-6}$	۱۵۵۰۰۰	۰/۰۰۵×۰/۰۰۵×۰/۰۰۵	۱۶۲۰۰۰	RNG	۶/۳۳
$3/8 \times 10^{-5}$	۶۲۰۰۰۰	۰/۰۰۵×۰/۰۰۵×۰/۰۰۵	۱۶۲۰۰۰	k-ε	۶/۳۳
$3/5 \times 10^{-6}$	۱۲۷۲۰۰	۰/۰۰۵×۰/۰۰۵×۰/۰۰۵	۲۴۲۰۰۰	RNG	۸/۴۸
$4/1 \times 10^{-5}$	۵۳۴۰۰۰	۰/۰۰۵×۰/۰۰۵×۰/۰۰۵	۲۴۲۰۰۰	k-ε	۸/۴۸



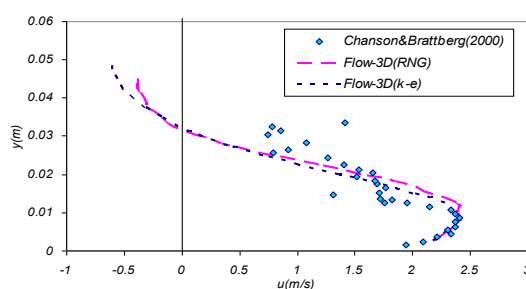
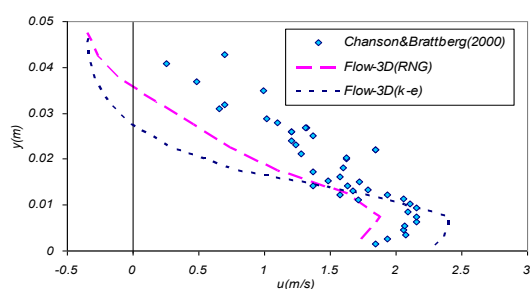
شکل ۲ مقدارهای محاسبه شده فشار (Pa) و سرعت افقی (m/s) برای $F=6.33$ و مدل آشفتگی RNG



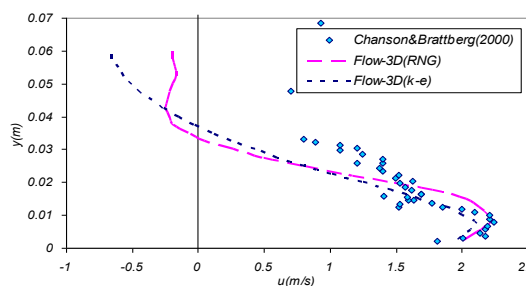
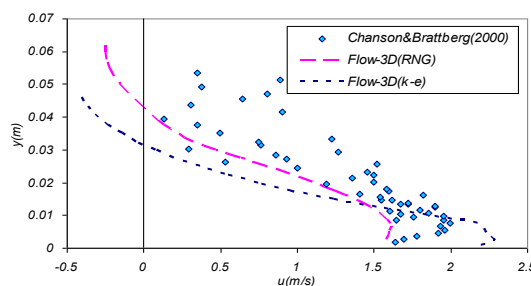
شکل ۳ مقدارهای محاسبه شده فشار (Pa) و سرعت افقی (m/s) برای $F=8.48$ و مدل آشفتگی RNG

وجود حباب‌های هوا و تلاطم بالای جریان در ناحیه فوقانی است. چون نرم‌افزار قادر به شبیه سازی حباب‌های هوا نیست و ورود هوا به جریان با استفاده از تعادل بین نیروی کشش سطحی آب و نیروی ناشی از آشفتگی و نیز تغییرهای چگالی ناشی از ورود هوا مدل‌سازی می‌شود، بنابراین، همان‌طور که انتظار می‌رود خطا در این ناحیه بیشتر است. همچنین نرم افزار با بالا رفتن عدد فرود ورودی توانسته است پیش‌بینی‌های بهتری را داشته باشد.

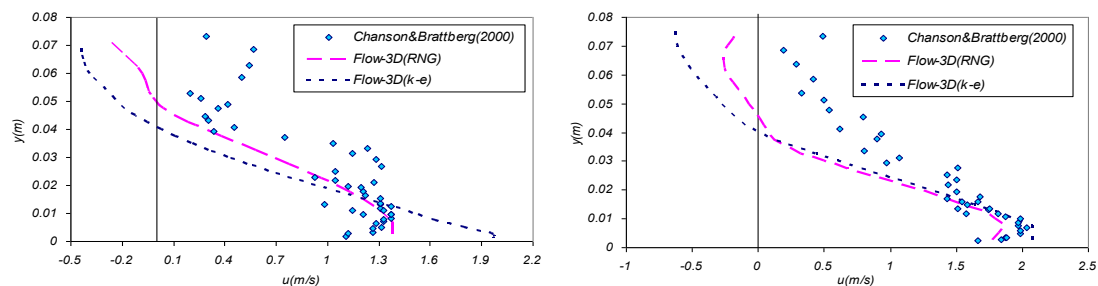
در ادامه پروفیل سرعت افقی محاسبه شده با دو مدل $k-\varepsilon$ و $k-\varepsilon$ در مقایسه با مقدارهای اندازه‌گیری شده در شکل‌های ۴ الی ۶ ارائه گردیده‌است. همان‌طور که از این شکلها مشخص است، مقدارهای پیش بینی شده برای پروفیل سرعت توسط مدل آشفتگی RNG نسبت به مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ بهتر می‌باشد. البته دقت هر دو مدل در ناحیه تحتانی پرش بهتر از ناحیه فوقانی است و این به علت وجود



شکل ۴ مقدارهای سرعت افقی (m/s) در فاصله ۰/۵ متر از پنجه پرش (راست: $F=8.48$ ، چپ: $F=6.33$)



شکل ۵ مقدارهای سرعت افقی (m/s) در فاصله ۰/۱ متر از پنجه پرش (راست: $F=8.48$ ، چپ: $F=6.33$)



شکل ۶ مقدارهای سرعت افقی (m/s) در فاصله ۰/۲ متر از پنجه پرش (راست: F=8.48, چپ: F=6.33)

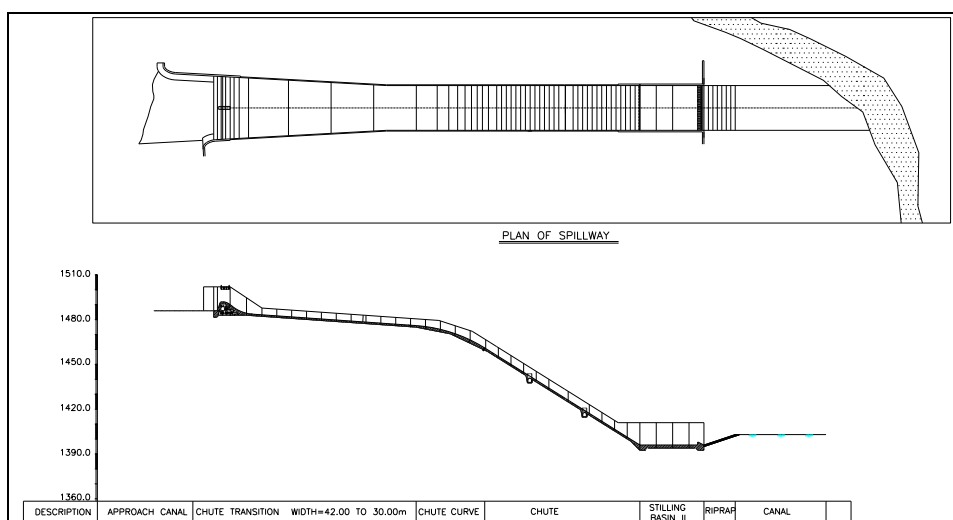
ریز کردن سلول‌ها در یک جهت باعث بروز خطا در انجام محاسبه‌هایی می‌شود، لذا ابعاد سلول‌ها در همه ابعاد بطور یکسان و برابر ۰/۳ متر در نظر گرفته شد و چون این حجم از شبکه محاسباتی، زمان حل و رسیدن به پایداری عددی را به میزان زیادی افزایش می‌دهد لذا شبیه سازی جریان در حوضچه روی یک نوار به عرض ۵ متر در محور حوضچه انجام گردید. اجزای حوضچه آرامش در شکل ۸ ارایه شده است.

۶- کاربرد نرم افزار در پیش بینی پارامترهای جریان در حوضچه آرامش

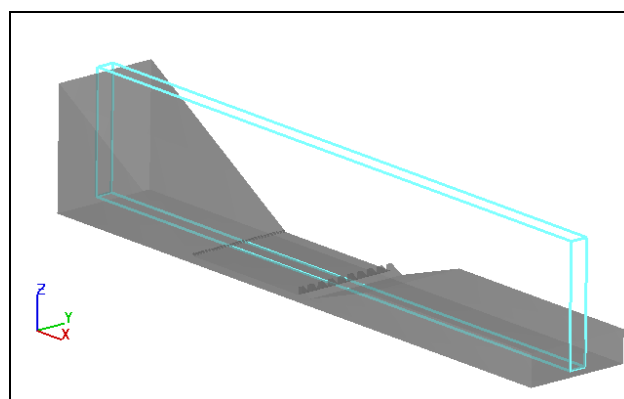
به منظور کاربرد نرم افزار در یک نمونه آزمایشگاهی، از نتیجه‌های مربوط به مدل آزمایشگاهی حوضچه آرامش سرریز سد نازل‌وچای استفاده گردید. سد مخزنی نازل‌وچای در شمال غربی ارومیه روی رودخانه نازلو از نوع خاکی با هسته رُسی به ارتفاع ۱۰۰ متر احداث می‌گردد. سیستم تخلیه سیلاب شامل کانال ورودی، سرریز اوجی آزاد، تندآب و حوضچه آرامش است که در سمت راست بدنه سد جانمایی شده است. به منظور بررسی عملکرد سرریز و حوضچه آرامش، مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب بر مبنای تشابه عدد بی بعد فرود، با مقیاس ۱:۴۰ در مرکز پژوهش‌های آب ساخته شد. جنس کف و دیواره‌های مدل سرریز و حوضچه آرامش از پلکسی گلاس است. با استفاده از این مدل، متغیرهای اصلی جریان نظیر عمق، سرعت و فشار اندازه‌گیری شده است. در شکل ۷ پلان و مقطع عرضی سرریز ارایه شده است [۱۱].

۱-۶ شرایط شبیه سازی رایانه‌ای

برای شبیه سازی حوضچه آرامش از یک شبکه سه بعدی در مقیاس واقعی استفاده شد. با توجه به استفاده نرم افزار Flow-3D از روش FAVOR برای مدل سازی موانع، و برای در نظر گرفتن بلوک‌های حوضچه به وسیله نرم افزار، ناگزیر می‌بایست از یک شبکه با دقت کافی استفاده کرد. از آنجایی که از یک شبکه مکعب مستطیلی استفاده می‌شود و



شکل ۷ پلان و مقطع طولی سیستم تخلیه سیلاب سد نازلوچای



شکل ۸ نمایی از حوضچه آرامش سد نازلوچای و شبکه مورد استفاده در شبیه سازی رایانه‌ای

تراز سطح آب و سرعت به نرم افزار معرفی شده است. برای مرز پایین دست نیز فقط تراز پایاب به مدل اعمال می‌شود. برای کف از زبری مطلق بتن (۲ میلیمتر) استفاده شده است. شبیه سازی برای سیلاب‌های ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و PMF انجام شده و شرایط مرز ورودی در جدول ۳ ارائه شده است. این شرایط با توجه به تراز سطح آب در دریاچه و دبی سیلاب عبوری از سرریز به دست آمده است.

جریان به صورت فوق بحرانی و با اعداد فرود بالا وارد حوضچه آرامش می‌شود و در صورت عملکرد مناسب حوضچه، پس از استهلاك انرژی به وسیله‌ی پرش هیدرولیکی با سرعت کمتر و به صورت زیر بحرانی از حوضچه خارج می‌شود. برای شبیه سازی جریان فوق بحرانی و ورود این جریان به صورت کاملاً توسعه یافته به حوضچه ۵۰ متر از انتهای تنداب نیز در مدل حوضچه، شبیه سازی شده است. شرایط مرزی بالا دست، با اعمال

جدول ۳ شرایط مرزی بالادست حوضچه آرامش

دوره بازگشت (سال)	آبگذری (m ³ /s)	تراز سطح آب (m.a.s.l)	سرعت (m/s)
۱۰۰۰	۵۰۰	۱۴۲۸/۱۸	۲۹/۲۵
۱۰۰۰۰	۸۳۰	۱۴۲۸/۵۲	۳۱/۹۴
PMF	۲۲۷۰	۱۴۲۹/۹۲	۳۶/۸۱

با توجه به نتیجه‌هایی که از مدل سازی پرش هیدرولیکی در بخش قبل بدست آمد، مدل آشفتگی *RNG* در مقایسه با مدل *k-ε* نتیجه‌های بهتری را برای پرش هیدرولیکی پیش‌بینی می‌کند. بنابراین، در شبیه سازی جریان در حوضچه آرامش از این مدل آشفتگی استفاده شد. همچنین به علت ورود هوا به جریان در پرش هیدرولیکی و تأثیر آن در استهلاك انرژی در حوضچه، از مدل ورود هوای نرم افزار نیز استفاده شد.

۶-۲ نتیجه‌های شبیه سازی رایانه‌ای

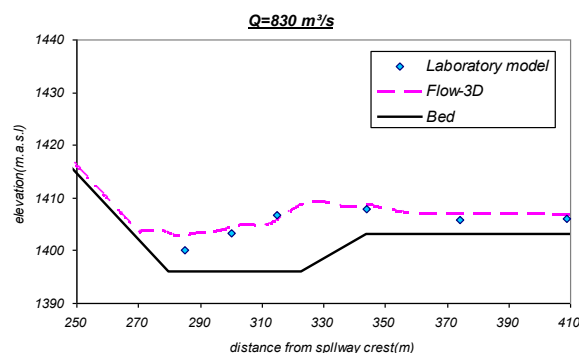
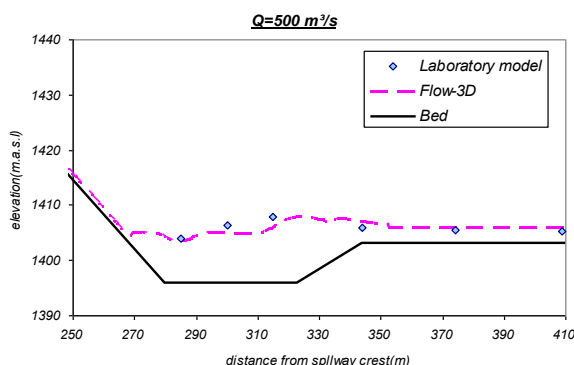
داده‌های آزمایشگاهی موجود برای مقایسه پارامترهای جریان در حوضچه آرامش شامل تراز سطح آب، سرعت جریان و فشار کف حوضچه است. در اشکال ۹ الی ۱۱ مقادارهای محاسبه شده به وسیله نرم‌افزار با مقادارهای اندازه‌گیری شده مقایسه شده‌اند.

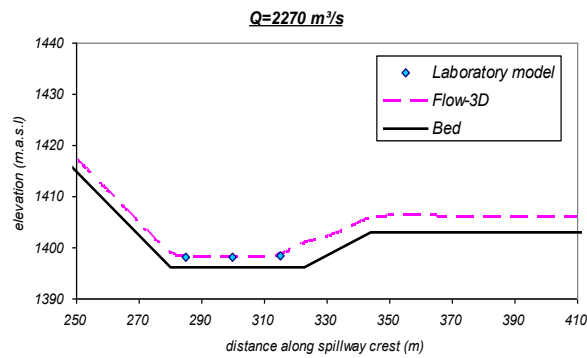
شکل ۹ پروفیل سطح آب را برای سیلاب‌های ۱۰۰۰ ساله، ۱۰۰۰۰ ساله و *PMF* نشان می‌دهد. همان‌طور که از روی شکل مشخص است، نرم افزار نتیجه‌های خوبی را در مقایسه با اندازه گیری‌ها، پیش‌بینی کرده است، به ویژه تراز سطح آب بعد از حوضچه، تطابق خوبی با مقادارهای آزمایشگاهی دارد. در منطقه ابتدایی پرش، به علت تلاطم و آشفتگی زیاد جریان، مقادارهای محاسبه شده اندکی با مقادارهای اندازه‌گیری شده تفاوت دارند، ولی این تفاوت در انتهای پرش به علت کاهش تلاطم جریان، کاهش می‌یابد.

همانند شبیه سازی جریان در آزمایشگاه که حوضچه برای آبگذری $2270 \text{ m}^3/\text{s}$ ، کارایی خود را از دست داده و هیچ نقشی در استهلاك جریان و شکل گیری پرش نداشته و تمامی جریان به صورت فوق بحرانی و با سرعت بالا از حوضچه خارج می‌شود، نتیجه‌های محاسبه شده به وسیله نرم‌افزار نیز به خوبی این پدیده را پیش‌بینی نموده است.

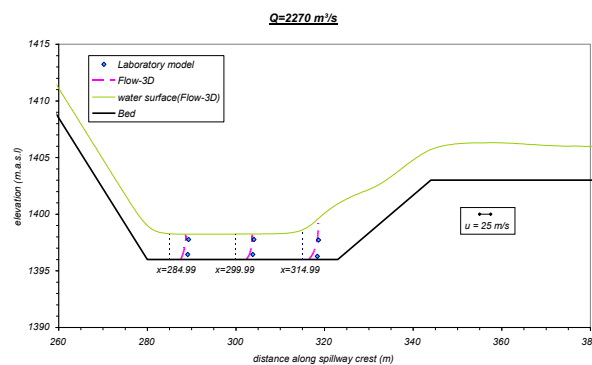
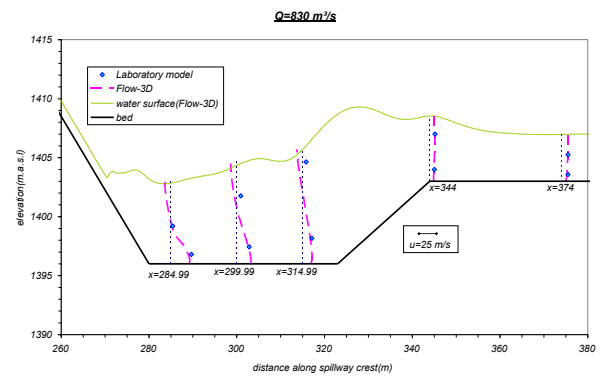
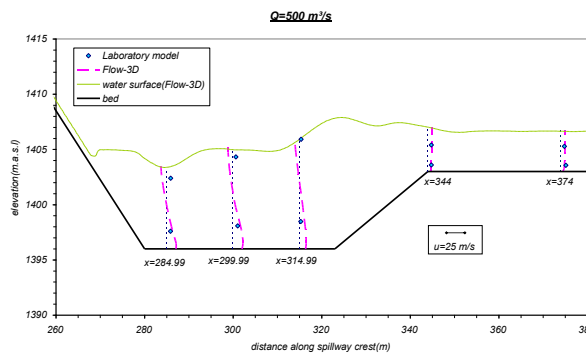
در شکل ۱۰ مقادارهای سرعت افقی در حوضچه ارایه شده است. انتظار می‌رود به علت چرخش جریان در این ناحیه، سرعت افقی در حوضچه و در نزدیکی سطح آب دارای مقادارهای منفی باشند. توزیع عمقی سرعت افقی جریان در حوضچه آرامش که به وسیله نرم‌افزار محاسبه شده است، به خوبی این مطلب را نشان می‌دهد. همچنین مقادارهای سرعت افقی در نزدیکی کف با مقادارهای آزمایشگاهی مطابقت می‌کند. توزیع عمقی سرعت افقی جریان در محدوده کانال انتهای حوضچه نیز مطابق مقادارهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه است. همچنین در حالت سیلاب $2270 \text{ m}^3/\text{s}$ ، که پرشی در حوضچه شکل نگرفته، مقادارهای محاسبه شده سرعت در مقایسه با مقادارهای آزمایشگاهی از تطابق قابل قبولی برخوردار است.

شکل ۱۱ بیانگر مقادیر فشار کف حوضچه است. در این شکل توزیع فشار هیدروستاتیک نیز برای مقایسه ارایه شده است. یکی از ویژگی‌های پرش هیدرولیکی، انحنای شدید خطوط جریان در ناحیه وقوع آن است و این مطلب وجود توزیع هیدروستاتیک فشار را نقض می‌کند. البته با نزدیک شدن به انتهای حوضچه (یعنی انتهای پرش) به علت کم شدن آشفتگی جریان و نزدیک شدن جریان به حالت جریان در کانال‌های باز، انتظار می‌رود فشار به توزیع هیدروستاتیک نزدیک شود که در شکل ۱۱ این مطلب قابل مشاهده است. همچنین برای سیلاب $2270 \text{ m}^3/\text{s}$ ، که پرش وجود ندارد پروفیل فشار کف مطابق با توزیع فشار هیدروستاتیک است و فقط در انتهای آن به علت برخورد جریان با موانع انتهای حوضچه فشار افزایش یافته است.

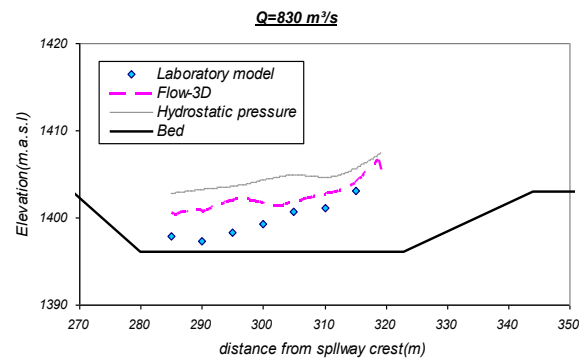
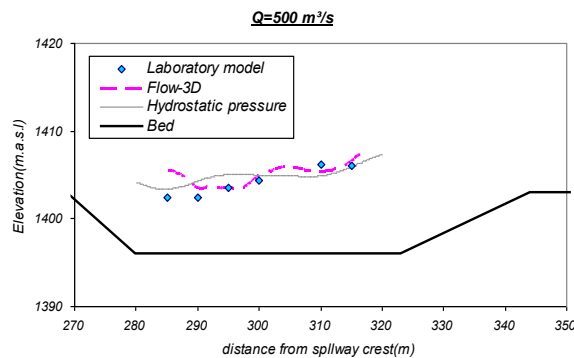


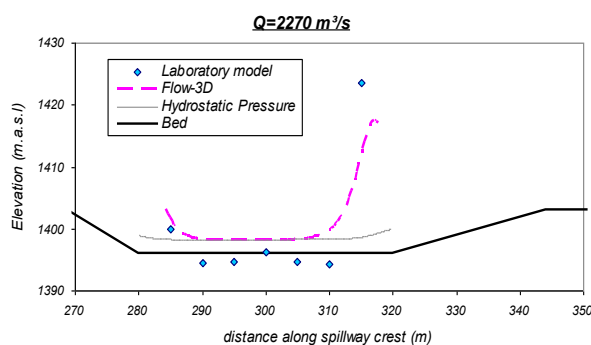


شکل ۹ پروفیل سطح آب برای آبگذری های ۵۰۰، ۸۳۰ و ۲۲۷۰ متر مکعب بر ثانیه در محور حوضچه



شکل ۱۰ پروفیل سرعت افقی برای آبگذری های ۵۰۰، ۸۳۰ و ۲۲۷۰ متر مکعب بر ثانیه در محور حوضچه



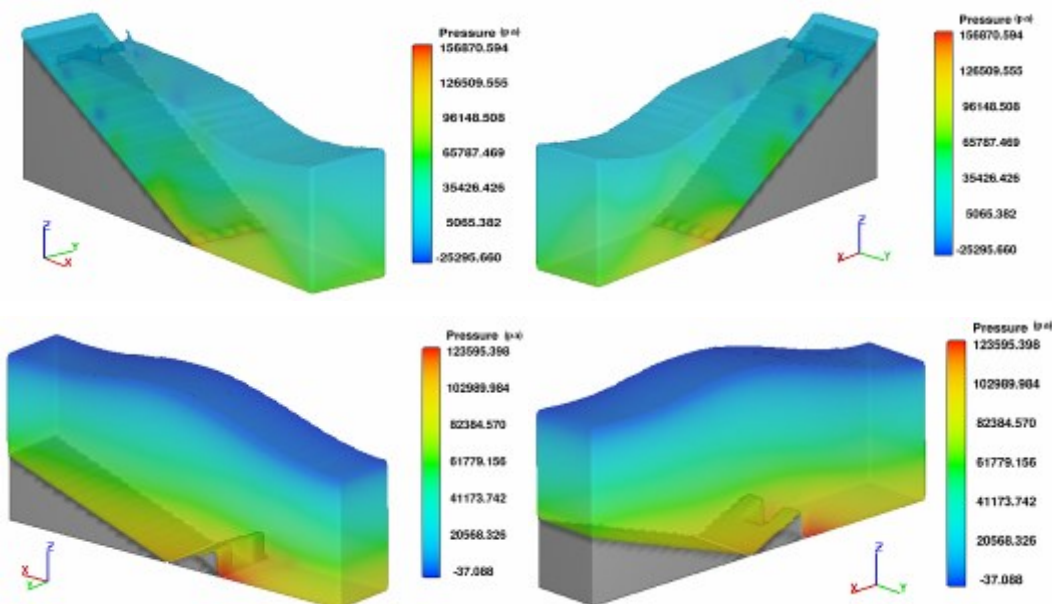


شکل ۱۱ پروفیل فشار کف برای آبگذری های ۵۰۰، ۸۳۰ و ۲۲۷۰ متر مکعب بر ثانیه در محور حوضچه

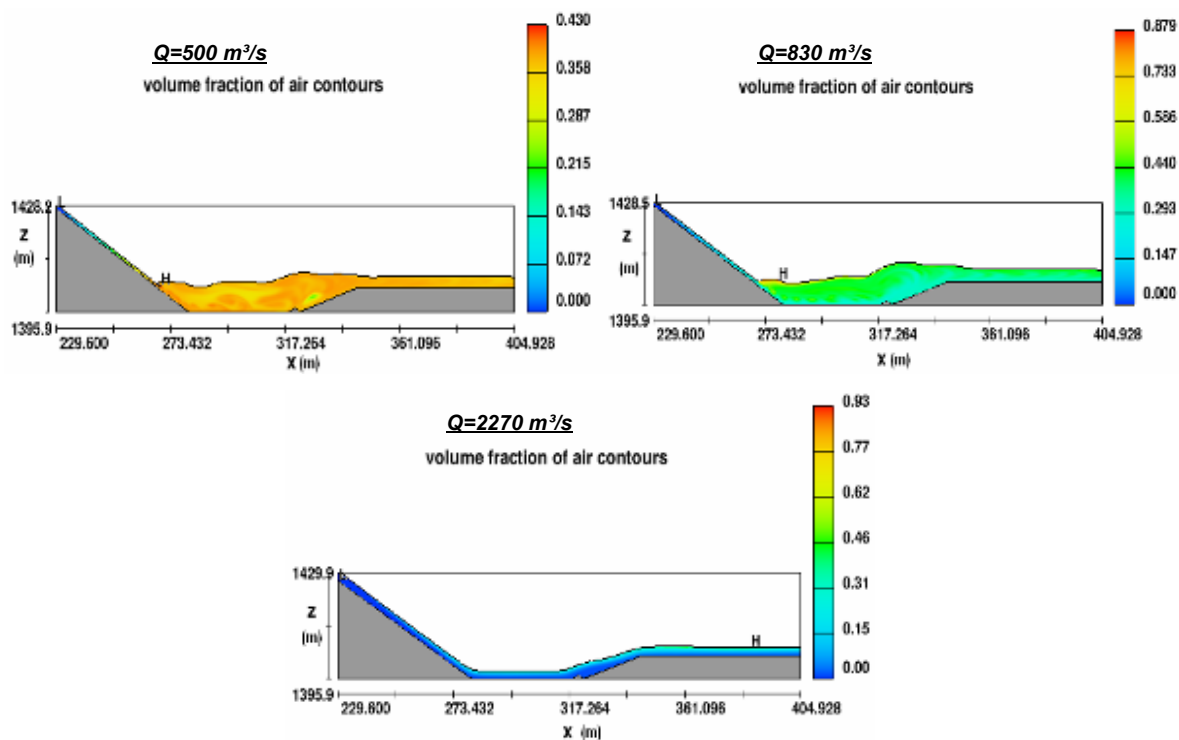
در شکل ۱۲ فشار در اطراف موانع ابتدایی و انتهایی حوضچه به صورت سه بُعدی برای سیلاب طراحی (۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه) ارایه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشخص است، میزان فشار در جلوی این موانع دارای مقدار بالایی است که این پدیده به علت برخورد جریان با این موانع به وجود می‌آید. همچنین توزیع غیر هیدروستاتیک فشار به خصوص در ابتدای حوضچه مشخص است.

شکل ۱۳ مقدار هوای موجود در جریان را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، جریان ورودی به حوضچه به صورت خوددهاذهی شده است در نتیجه پرش ناشی از آن به صورت پرش *pre-entrained* خواهد بود. بیشترین مقدار هوای وارد شده در جریان از محل پنجه پرش است و به تدریج با دور شدن از محل پنجه پرش مقدار هوای موجود در جریان کم می‌شود که نتیجه‌های محاسبه شده نیز بیانگر این مطلب است. برای آبگذری

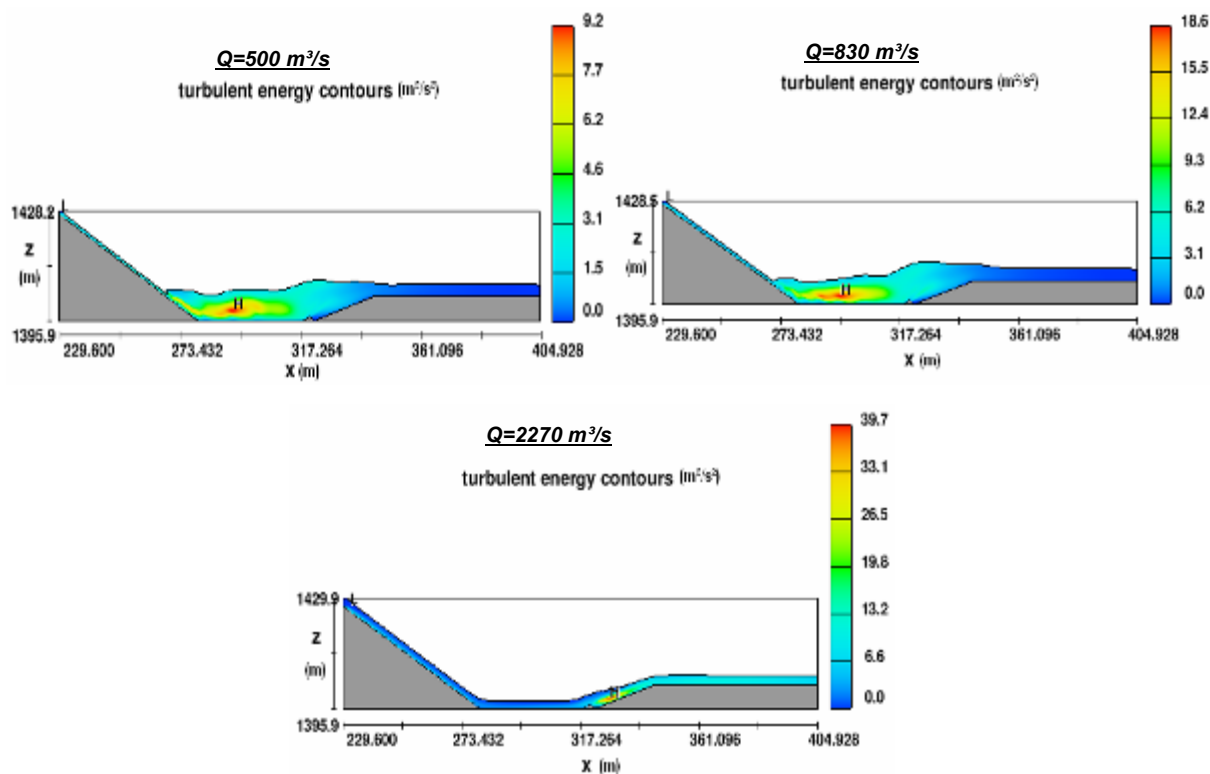
شکل ۱۲ مقدارهای فشار حول موانع برای آبگذری ۵۰۰ m^3/s (بالا: موانع ابتدایی، پایین: موانع انتهایی)



شکل ۱۲ مقدارهای فشار حول موانع برای آبگذری ۵۰۰ m^3/s (بالا: موانع ابتدایی، پایین: موانع انتهایی)



شکل ۱۳ مقدارهای غلظت هوا برای آبگذری‌های ۵۰۰، ۸۳۰ و ۲۲۷۰ متر مکعب بر ثانیه در محور حوضچه



شکل ۱۴ مقدارهای انرژی جنبشی آشفته‌گی برای آبگذری‌های ۵۰۰، ۸۳۰ و ۲۲۷۰ متر مکعب بر ثانیه در محور حوضچه

۷- نتیجه گیری

موجود در حوضچه را محاسبه کرده است و در مناطقی که انتظار می رود به علت برخورد جریان با این موانع فشار افزایش یابد این مسأله دیده می شود.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از شرکت محترم مهندسين مشاور آبساران برای در اختیار قرار دادن اطلاعات مربوط به مدل هیدرولیکی سرریز و حوضچه آرامش سد نازلو چای تشکر و قدردانی به عمل می آید.

۸- پی نوشت

^۱ Volume- of- Fluid

^۲ Fractional Area-Volume Obstacle representation

مراجع

- [1] Wu S., Rajaratnam N., "Transition from Hydraulic Jump to Open Channel Flow", Journal of Hydraulic engineering, Vol. 122, No.9, 1996, pp. 526-528.
- [2] Chanson H., Brattberg T., "Experimental Study of the Air-Water Shear Flow in a Hydraulic Jump", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 26, 2000, pp. 583-607.
- [3] Ead S.A., Rajaratnam N., "Hydraulic Jumps on Corrugated Beds", Journal of Hydraulic engineering, Vol. 128, No. 7, 2002, pp. 656-663.
- [4] Minnan L., Nallamuthu R. and Zhu D. Z., "Turbulence Structure of Hydraulic Jumps of Low Froude Numbers", Journal of Hydraulic engineering, Vol. 130, No. 6, 2004, pp. 511-520.
- [5] Ji-Wen W., Ru-Xun L., "A comparative study of finite volume methods on unstructured meshes for simulation of 2D shallow water wave problems", Mathematics and Computers in Simulation, Vol.53, 2000, pp. 171-184.
- [6] Unami K., Kawachi T., Munir Babar M., Itagaki H., "Estimate of diffusion and convection coefficients in an aerated hydraulic jump", Advances in Water Resources, Vol. 23, 2000, pp. 475-481.
- [7] Wu M., Chen Y., Zhou Q., "Case Study of an S-Shape Spillway Using Physical and Numerical Models", Journal of Hydraulic engineering, Vol. 132, No. 9, 2006, pp. 892-898.
- [8] Zhao Q., Misra Shubhra K., "Numerical Study of a Turbulent Hydraulic Jump", 17th ASCE Engineering Mechanics Conference, 13-16, University of Delaware, Newark, DE. June 2004
- [9] Flow-3D® Help, Ver. 9.0, Flow science Inc.
- [10] www.flow3d.com
- [۱۱] موسسه تحقیقات منابع آب، گزارش مدل هیدرولیکی سد مخزنی نازلوچای"، کد پروژه HSM8403، ۱۳۸۵.