

بررسی نوسانات آب پویایی فشار در حوضچه ی آرامش با استفاده از مدل جریان دوفازی

مهسا عطوفت شعار جهرمی^۱، زهرا قدم پور^{۲*}

چکیده

یکی از سازه‌های مستهلک کننده‌ی جریان، حوضچه‌ی آرامش می‌باشد که در پایین‌دست سرریزها ساخته می‌شود. محل وقوع نوسانات فشار بیشینه ناشی از برخورد آب به کف حوضچه و تأثیر عوامل مختلف بر مقدار و محل وقوع، حائز اهمیت می‌باشد. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای به‌صورت آزمایشگاهی و تحقیقات اندکی به‌صورت عددی در این زمینه انجام شده است. در مقاله‌ی حاضر، با در نظر گرفتن هندسه‌های مختلف سرریز پیوند و تأثیر ارتفاع این سرریزها و نیز اعمال شرایط مختلف جریان اعم از سرعت و عدد فرود ورودی جریان، نوسانات فشار آب پویایی در کف حوضچه با استفاده از شبیه‌سازی عددی حجم محدود، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با در نظر گرفتن تداخل آب‌وهوا، جریان به‌صورت دوحالتی در نظر گرفته شده است. به‌منظور اطمینان از صحت نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار، شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی انجام شده در گذشته مقایسه شده و میزان خطای نسبی در این مقایسه ۸٪ تا ۱۲٪ به‌دست آمده است. نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی سرریزهای با ارتفاع ۵، ۷، ۹، ۱۱ و ۱۵ متر و با اعداد فرود ۳٫۷ تا ۶٫۲ برای سرریزهای پیوند و ۴ تا ۶٫۸ برای سرریزهای لبه تیز، نشان دادند که در همه‌ی سرریزها، جهش آبی در ۱/۳ ابتدایی حوضچه‌ی آرامش اتفاق می‌افتد. مقدار بیشینه نوسان‌های فشار در سرریزهای پیوند از ۶۲۰۰۰ تا ۱۴۴۰۰۰ پاسکال و در سرریزهای لبه تیز از ۵۴۰۰۰ تا ۱۵۶۰۰۰ پاسکال با افزایش ارتفاع، افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر نوع حوضچه‌ی آرامش بر مقدار حداکثر نوسان‌های فشار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

واژه های کلیدی: نوسان‌های فشار، حوضچه‌ی آرامش، روش حجم محدود، سرریز پیوند، سرریز لبه تیز

^۱ کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران

^۲ عضو هیات علمی، گروه عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران

Email: Zahra_ghadampour@yahoo.com

مقدمه

برای جلوگیری از آسیب‌های ناشی از کارمایه فوق‌العاده زیاد آب در حالت فوق بحرانی، و از بین بردن کارمایه اضافی، از سازه‌های خاصی به نام کارمایه گیرنده استفاده می‌گردد. حوضچه‌ی آرامش یکی از سازه‌هایی است که به این منظور ساخته می‌شود. حوضچه‌ی آرامش شامل یک نهر کف سازی شده (دال بتنی) و دیوارهای کناری، در انتهای سرریزها یا نهرهای با جریان فوق بحرانی است. نیروهایی که به دال کف حوضچه‌ی آرامش وارد می‌شوند، شامل نیروهای پایایی و پویایی می‌باشند. نیروهای پایایی شامل نیروی وزن آب در بالا و نیروی بالابرنده در زیر دال و نیروی پویایی شامل نیروهای ناشی از جهش آبی، که در نتیجه‌ی سقوط آب از روی سرریز بر روی دال کف حوضچه وارد می‌شود، می‌باشند. هدف از ساخت حوضچه‌ی آرامش، تشکیل جهش آبی در داخل حوضچه است. بنابراین، جریان فوق بحرانی به زیربحرانی قبل از رسیدن به انتهای رودخانه تبدیل می‌گردد. با این روش، قسمتی از کارمایه مخرب ناشی از نوسان‌های فشار جهش آب در حوضچه‌ی آرامش از بین می‌رود. پهنا و تراز کف حوضچه دو فرد سنج مهم در طراحی حوضچه بوده، و باید طوری انتخاب شوند که پرش در ابتدای حوضچه اتفاق افتد. (ابریشمی و حسینی، ۱۳۹۰).

جهش آبی، یک پدیده‌ی مهم جریان آب در نهرهای باز و از دسته‌ی جریان‌های متغیر سریع است که باعث تغییر جریان از فوق بحرانی به زیربحرانی، از بین رفتن کارمایه اضافی و کاهش مقدار زیادی از سرعت جریان می‌شود. نیروهای ناشی از نوسان‌های شدید جهش آبی، از جمله‌ی مهم‌ترین نیروها در طراحی دال کف حوضچه‌ی آرامش می‌باشند. تاریخچه‌ی جهش آبی مدیون تلاش افرادی مانند و نچر (۱۷۹۷)، بلانگر (۱۸۲۸) و چو (۱۹۵۹) و (۱۹۸۸) هست. همچنین از مطالعات انجام‌شده بر نوسان‌های فشار در جهش آبی یا حوضچه‌ی آرامش، می‌توان به مطالعات باسکو و آدامز (۱۹۷۱)، نارایانان و شیزاس (۱۹۸۰)، فرهودی (۲۰۰۹)، (۲۰۱۰)، اشاره کرد. از آنجاکه جهش آبی، پدیده‌ای تصادفی بوده، و محاسبه‌ی نیروهای ناشی از آن بر روی دال بسیار پیچیده است، بنابراین اکثر مطالعات انجام‌شده به‌صورت آزمایشگاهی است. بهدروندی عسکر و پارسی (۱۳۹۰)، فشارهای پویایی روی حوضچه‌ی آرامش را با استفاده از شبیه‌سازی فیزیکی

حوضچه‌ی آرامش سد گلابر بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که مقادیر متوسط فشارهای پویایی به‌صورت منطقی با فشارهای پایایی متناظر، منطبق بوده، و بیشینه نوسان‌های فشار نیز در محلی رخ می‌دهد که جهش آبی اتفاق می‌افتد. اما جریان در انتهای حوضچه‌ی آرامش آرام‌تر است. حسونی زاده و همکاران (۱۳۸۸) نیز با انجام آزمایش‌هایی برای طراحی ضخامت دال کف حوضچه دریافتند که فشار بیشینه، در $1/3$ میانی حوضچه رخ می‌دهد (محمدزاده و همکاران، ۱۳۸۸). همچنین، حسونی زاده و بجستانی (۲۰۰۱)، در آزمایش‌های دیگری، محل بیشینه نوسان‌های فشار را در محل 30% پرش بیان کردند. آن‌ها با اندازه‌گیری فشارهای پویایی روی دال کف حوضچه، نشان دادند که نوسان‌های فشار، تابعی از عدد فرود، رشد لایه‌ی مرزی، زاویه ورود جریان و زمان اجرا هست. و در نهایت با افزایش بده، فشار هم افزایش می‌یابد (حسونی زاده و همکاران، ۲۰۰۱). انگاره‌های افرادی چون هینگ و همکاران (۲۰۱۰)، جول و همکاران (۱۹۸۹)، این نتایج را تأیید می‌کنند. در آزمایش‌هایی که به‌وسیله‌ی وطن دوست و همکاران (۲۰۱۲) بر روی سرریزهای آرام‌کننده‌ی جامی با سرعت‌گیر انجام شد، با افزایش عدد فرود، شدت نوسان‌های فشار و نیز فشار پویا مؤثر (c'p) کاهش یافت، و این همان نتیجه‌ای است که روماگنولی و لوپاردو (۲۰۰۸) نیز از آزمایش‌های خود به دست آوردند. در این آزمایش‌ها، بافاصله گرفتن از پرش، تأثیر عدد فرود بر شدت فشار ناچیز شده و مقدار آن ثابت می‌ماند.

کاوایانپور و محمدی (۱۳۸۰)، طی یک گروه آزمایش به این نتیجه رسیدند که فشار پویای مؤثر، در ابتدای پرش کاهش یافته، و سپس افزایش می‌یابد، و در نهایت به یک مقدار ثابت رسیده و تا پایین دست بدون تغییر باقی می‌ماند. همچنین مقادیر نوسان‌های فشار، با افزایش شیب منفی حوضچه افزایش می‌یابد، که این به علت استغراق بیشتر پرش و انتقال آن به شیب است. وطن دوست و همکاران (۲۰۱۲) نیز در این رابطه نشان دادند که فشار پویای مؤثر، در حالی که با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد، اما در طول سرریز آرام‌کننده‌ی جامی با سرعت‌گیر، مقدار آن افزایش می‌یابد.

یکی از مطالعاتی که با کاربرد روش عددی، و با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D در این زمینه انجام شده است، به‌وسیله‌ی آموریوم و همکاران، انجام گردید که در این

• معادله‌های ناویر- استوکس

همان‌گونه که قبلاً بیان شد، اتلاف کارمایه در جهش آبی با نوسان‌های فشار زیادی همراه است. این نوسان‌ها به علت جا به جایی و استهلاک گرداب‌ها، بسیار پیچیده و تصادفی هستند. بنابراین، توزیع فشار در این‌گونه جریان‌های متغیر با سطح آزاد، به‌صورت آب ایستایی نبوده و آب پویایی هست. بنابراین در این جریان‌ها باید از معادلات متوسط‌گیری شده‌ی زمانی جهت در نظر گرفتن اثرات آشفتگی استفاده کرد. این معادلات، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت می‌باشند. در زیر، معادلات ناویر- استوکس مورد استفاده در تحلیل سه‌بعدی در حالت سیال تراکم ناپذیر آورده شده‌اند:

معادله‌ی پیوستگی (continuity):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (۱)$$

معادله‌ی اندازه حرکت (momentum) در جهات x, y و z:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right. \\ \left. + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (۲)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right. \\ \left. + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (۳)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} \right. \\ \left. + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (۴)$$

در روابط بالا، t زمان، p فشار، ρ چگالی، Re عدد رینولدز، (u, v, w) مؤلفه‌های سرعت، (x, y, z) مؤلفه‌های مختصات می‌باشند. این معادله‌ها، گروهی از معادله‌های دیفرانسیلی هستند که از نظر انگاره‌ای، می‌توانند با روش‌های محاسباتی برای یک جریان خاص حل شوند. اما در عمل، حل این معادله‌ها بسیار پیچیده است. برای حل

تحقیق، نتایج حاصل از نرم‌افزار عددی با نتایج آزمایشگاهی انطباق منطقی داشتند. رحمانی و همکاران (۱۳۸۵)، نیز با استفاده از نرم‌افزارهای Safe, Plaxis و Ansys، بیان کردند که توزیع فشار ناشی از جهش آبی را بر روی دال حوضچه‌ی آرامش می‌توان به‌صورت آب ایستایی در نظر گرفت.

همان‌گونه که از تحقیقات فوق مشخص است، کارهای عددی انجام‌شده در این زمینه بسیار اندک می‌باشند؛ بنابراین در این تحقیق، با استفاده از روش عددی و با فرض جریان دوحالتی آب- هوا، فشارهای واردشده بر دال کف حوضچه مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، جریان دوحالتی، معادلات حاکم بر جریان در جهش آبی و روش عددی مورد استفاده در این تحقیق معرفی می‌گردند، سپس در رابطه با تحلیل جریان با استفاده از روش عددی بحث می‌شود و در انتها نتایجی را که از تحقیق حاصل شده‌اند، شرح داده می‌شود.

جریان دوحالتی

تعداد زیادی از جریان‌های فرابندی، مخلوطی از حالت‌ها هستند. در جریان چندحالتی، یک حالت قسمتی از جریان است که قابلیت تفکیک آن وجود دارد و نسبت به میدان پتانسیلی که در آن قرار می‌گیرد، پاسخ داده و با سایر حالت‌ها برهمکنش دارد. یکی از وضعیت‌های جریان چندحالتی، جریان گاز- مایع هست که شامل جریان سطح آزاد است. از آنجاکه جریان آب روی سرریز و در حوضچه آرامش، یک جریان سطح آزاد می‌باشد، بنابراین تحلیل جریان در این تحقیق، با فرض جریان دوحالتی آب- هوا انجام می‌گردد. یکی از دیدگاه‌های نرم‌افزارسازی جریان‌های چندحالتی، دیدگاه اولر- اولر هست. در دیدگاه اولر- اولر حالت‌های مختلف به‌صورت ریاضی به‌عنوان محیط‌های پیوسته‌ی در هم نفوذکننده در نظر گرفته می‌شوند. در نرم‌افزار فلوئنت، سه نرم‌افزار مختلف چندحالتی اولر- اولر در دسترس می‌باشند: شبیه‌سازی حجم سیال (VOF)، شبیه‌سازی مخلوط و شبیه‌سازی اولری. از این سه شبیه‌سازی، شبیه‌سازی VOF برای جریان‌های لایه‌ای یا سطح آزاد مناسب هست. از این‌رو، در این تحقیق از نرم‌افزار VOF برای شبیه‌سازی جریان استفاده شده است.

معادله‌های حاکم

جریان چند فازی، یک معادله ی انتقال کلی می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{\partial(\alpha\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho\vec{V}\phi) = \nabla \cdot \bar{\tau} + S_\phi \quad (5)$$

که در آن ϕ کمیت حاکم بر مخلوط (برای نرم افزار مخلوط) یا متغیر یک مدلی، α کسر حجمی فازی، ρ چگالی مدل مخلوط، V سرعت مخلوط یا مدل (بسته به معادلات)، τ جمله نفوذ و $\bar{\tau}$ جمله چشمه است. به عنوان یک طرح کاملاً ضمنی و استفاده از تقریب پس رو اولر برای ترم زمان، معادله ی انتقال کلی به صورت زیر منفصل می شود:

$$\frac{3(\alpha_p\rho_p\phi_pVol)^{n+1} - 4(\alpha_p\rho_p\phi_pVol)^n + (\alpha_p\rho_p\phi_p)^{n-1}}{2\Delta t} = \sum [A_{nb}(\phi_{nb} - \phi_p)]^{n+1} + S_u^{n+1} - S_p^{n+1}\phi_p^{n+1} \quad (6)$$

پرهزینه اما دقیق است. در روش مای تحلیلی و عددی، چند قانون وجود دارد: ۱- بقای جرم، ۲- بقای اندازه ی حرکت، ۳- بقای کارمایه. این سه قانون، یک سامانه معادلات غیر خطی را تشکیل می دهند. راه حل تحلیلی برای حل این معادلات وجود ندارد، اما تلاش می شود تا از روش عددی بدون ساده سازی زیاد و با سرعت بالا، برای حل این گروه معادلات استفاده شود.

فلوئنت (Fluent) یک نرم افزار مهندسی در زمینه ی CFD (پویایی سیالات محاسباتی)، برای شبیه سازی جریان سیالات و انتقال حرارت در هندسه های پیچیده هست. فلوئنت، جریان های مختلف را با روش FVM (روش حجم محدود)، شبیه سازی کرده و در بسیاری موارد، کاملاً دقیق عمل می کند. روش حجم محدود، یکی از روش های عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل است. روش حجم محدود در واقع نوعی از روش اجزاء محدود است که در آن، تقریب انتگرال ها با روش اجزاء محدود متفاوت است. مانند روش تفاضل محدود و روش اجزاء محدود، در این روش نیز، مقادیر به صورت گسسته در مورد هندسه ی شبکه بندی شده محاسبه می گردند. حجم محدود (finite volume) به حجم کوچکی در اطراف هر نقطه ی گره روی شبکه گفته می شود. یکی از فواید روش حجم محدود، رابطه بندی ساده ی آن برای شبکه های غیر سازمان یافته هست.

در نرم افزار فلوئنت، می توان شبکه بندی را کاملاً تغییر داد و جریان با هندسه ی پیچیده را با استفاده از

تقریبی این معادله ها، از پویایی سیالات محاسباتی استفاده می شود (راهنمای کاربر فلوئنت ۶.۳، ۲۰۰۶).

طرح های زمانی در جریان چندحالتی

در بسیاری از کاربردهای چندحالتی، روند اجرا می تواند به صورت فضایی، و همچنین زمانی، تغییر کند. به منظور افزایش دقت نرم افزار جریان چندحالتی، هم فضای مرتبه ی بالاتر و هم طرح های انفصال سازی زمان مورد نیاز است. علاوه بر طرح زمانی مرتبه ی اول در نرم افزار، طرح زمانی مرتبه ی دوم در نرم افزار چند فازی مخلوط و طرح ضمنی VOF نیز قابل دسترس هستند. در

معادله ی فوق را می توان به شکل ساده تر نیز نوشت:

$$A_p\phi_p = \sum A_{nb}\phi_{nb} + S_\phi \quad (7)$$

که در آن:

$$A_p = \sum A_{nb}^{n+1} + S_p^{n+1} + \frac{1.5(\alpha_p\rho_pVol)^{n+1}}{\Delta t} \quad (8)$$

$$S_\phi = S_u^{n+1} + \frac{2(\alpha_p\rho_p\phi_pVol)^n - 0.5(\alpha_p\rho_p\phi_pVol)^{n-1}}{\Delta t} \quad (9)$$

این طرح بر مبنای طرح اولر مرتبه ی اول موجود در فلوئنت، به راحتی قابل اجرا بوده و بدون هیچ قید و شرطی پایدار است، هر چند ممکن است ضریب منفی در ترم زمان در صورت بزرگ بودن گام زمانی نوسان هایی را در حل ایجاد کند، این مشکل را می توان با وارد کردن طرح مرتبه ی دوم حل کرد. از آنجا که حل های نوسانی، بیشتر در جریان های مایع تراکم پذیر دیده می شوند، در نسخه ی کنونی نرم افزار، طرح زمانی مرتبه ی دوم فقط برای جریان های مایع تراکم پذیر به کار برده شده است و برای جریان های مایع تک مدلی و چند مدلی تراکم پذیر، طرح زمانی مرتبه ی دوم، طرح پیش فرض است.

روش عددی

برای تحلیل جریان حول یک هندسه ی دلخواه، سه روش وجود دارد: ۱- آزمایشگاهی، ۲- تحلیلی، ۳- عددی (CFD). در روش آزمایشگاهی، از آزمایشگاه برای تشخیص هندسه ی جریان استفاده می شود. این روش معمولاً

$$Q = A.V \quad (11)$$

که C ضریب سرریز، L عرض سرریز، Hd ارتفاع آب روی سرریز، A مساحت آب روی سرریز، و V سرعت آب روی سرریز می باشند.

مشخصات طرح شامل طول حوضچه و ارتفاع سرریز، و همچنین سرعت ورودی جریان و عدد فرود جریان در پایین دست، در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است که سرعت ها با در نظر گرفتن ۱ متر ارتفاع آب روی سرریز محاسبه شده اند. سرریز منحنی پیوند طراحی شده در گمبیت و شرایط مرزی مربوط به آن، در شکل ۲ آورده شده است.

همان گونه که در شکل مشاهده می شود، نوع شبکه سرریز بدون ساختمان و از نوع مثلی با اندازه ی ۰.۰۱ در نظر گرفته شده است. همچنین در روی سرریز و نیز در ابتدای حوضچه، تراکم شبکه مشاهده می شود که این امر به علت احتمال وجود حداکثر فشار در این منطقه هست. نرم افزار تکمیل شده ی سرریز در نرم افزار گمبیت، وارد نرم افزار فلوئنت می گردد. در این نرم افزار، جریان دوحالتی با نرم افزار VOF، به صورت ناپایدار و از نوع جریان آشفتگی با نرم افزار آشفتگی k-ε تحلیل می گردد. در نرم افزار آشفتگی k-ε از روش معیار استفاده شده است. همچنین، در این شبیه سازی چگالی آب برابر با 9982(kg/m³) و لز جتی آن برابر 0.00103(kg/m.s) و ثابت در نظر گرفته شده است. چگالی هوا نیز 1.225(kg/m³) می باشد. در تعریف حالت ها، حالت اولیه، هوا و حالت ثانویه، آب می باشد به این علت که مدل های شبیه سازی شده ی جریان چندحالتی در فلوئنت، معادلات را برای حالت ثانویه حل نموده و به حالت اولیه تعمیم می دهند.

در تعریف شرایط مرزی، کسر حجمی آب برای مرز ورودی برابر یک در نظر گرفته شده است. معادلات گسسته سازی فشار از نوع PRESTO و اندازه حرکت و آشفتگی از معادلات درجه ی یک استفاده شده است که در بیشتر موارد از دقت خوبی برخوردارند.

شبکه بندی نامنظم، تحلیل کرد. انواع شبکه های به کاررفته در این نرم افزار شامل شبکه سه وجهی و چهاروجهی برای هندسه ی دوبعدی و شبکه های چهاروجهی، شش وجهی، هرمی و گوه ای برای هندسه ی سه بعدی می باشند. همچنین، فلوئنت، بهبود شبکه را برای کاربر امکان پذیر می سازد.

در این تحقیق، نرم افزاری که به عنوان پیش پردازنده، و به منظور شبیه سازی جریان از آن استفاده می شود، نرم افزار گمبیت (Gambit) هست. شبیه سازی در این نرم افزار ساخته شده، پس از آن شبکه بندی می شود و در انتها شرایط مرزی در مورد نرم افزار اعمال می گردد. سپس نرم افزار برای فراخوانی به نرم افزار فلوئنت آماده می گردد. (Fluent, 2006)

معرفی هندسه ی نرم افزار

• معرفی نرم افزار آزمایشگاهی و مقایسه آن با نرم افزار عددی

برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده از نرم افزار، از آزمایش هایی که به وسیله ی حسونی زاده و شفاعی بجزستان در سال ۲۰۰۱ انجام شده است، استفاده گردید. در این آزمایش ها، فشارهای پویایی وارد بر کف حوضچه ی آرامش یک سرریز منحنی پیوند اندازه گیری شده اند. ارتفاع این سرریز، ۰.۵۵ متر و بده در واحد عرض سرریز ۰.۱۷ مترمربع بر ثانیه هست. شکل ۱، نرم افزار آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان می دهد.

هندسه ی سرریز، حوضچه ی آرامش و مخزن، مطابق با نرم افزار آزمایشگاهی در نرم افزار گمبیت مدل سازی و شبکه بندی شد. سپس وارد نرم افزار فلوئنت گردیده و جریان مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. جدول ۱، نتایج حاصل از روش عددی را با روش آزمایشگاهی مقایسه می کند.

• شبکه بندی نرم افزارهای محاسباتی

در این تحقیق، فشارهای وارد بر دال کف حوضچه ی آرامش سرریزهای منحنی پیوند و لبه تیز مورد بررسی قرار گرفته اند. سرریزهای طراحی شده شامل ۵ سرریز منحنی پیوند و ۵ سرریز لبه تیز با ارتفاع های ۵، ۷، ۹، ۱۱ و ۱۵ متر می باشند. سرعت آب روی سرریز با استفاده از رابطه های سرریز و بده قابل محاسبه هست:

$$Q = CLH_d^{3/2} \quad (10)$$

جدول ۱- مقایسه ی روش آزمایشگاهی با روش عددی

میزان خطای نسبی (درصد)	مطالعه ی عددی (شبکه ۰.۰۵)	میزان خطای نسبی (درصد)	مطالعه ی عددی (شبکه ۰.۰۱)	مطالعه ی آزمایشگاهی	
۱۲.۲۳	۵۵۰.۴۸۸	۹.۹۲	۵۳۹۱.۵۷	۴۹۰۵.۰۰	حداکثر فشار پویایی
۸۶۰	۶۲۷.۶۴	۱۰.۷۳	۷۶۰.۳۸	۶۸۶.۷۰	حداقل فشار پویایی

جدول ۲- مشخصات سرریزها و سرعت جریان

طول حوضچه (m)	Fr1	سرعت آب روی سرریز (m/s)	ارتفاع سرریز (m)	نوع سرریز
۲۰	۳.۷۱	۱.۸۵	۵.۰۰	اوجی
۲۵	۴.۳۳	۱.۸۴	۷.۰۰	اوجی
۳۰	۴.۸۷	۱.۸۳	۹.۰۰	اوجی
۳۵	۵.۳۶	۱.۸۲	۱۱.۰۰	اوجی
۴۵	۶.۲۳	۱.۸۱	۱۵.۰۰	اوجی
۲۰	۴.۰۵	۱.۸۵	۵.۰۰	لبه تیز
۲۵	۴.۷۳	۱.۸۴	۷.۰۰	لبه تیز
۳۰	۵.۳۲	۱.۸۳	۹.۰۰	لبه تیز
۳۵	۵.۸۶	۱.۸۲	۱۱.۰۰	لبه تیز
۴۵	۶.۸۰	۱.۸۱	۱۵.۰۰	لبه تیز

نتایج

همان گونه که ملاحظه می شود، با افزایش ارتفاع سرریز، مقدار حداکثر فشار وارد بر کف حوضچه نیز افزایش می یابد. همچنین معادله ی وایازی، رابطه ی بین متغیر مستقل ارتفاع سرریز (X) و متغیر وابسته ی فشار پویایی (Y) را نشان می دهد. شکل ۶ نیز، مقادیر فشار پویایی وارد بر کف حوضچه ی سرریز با ارتفاع ۵ متر را در دو حالت جریان آرام و آشفته مقایسه می کند.

همان گونه که در شکل مشخص است، مقدار حداکثر فشار پویایی در ابتدای حوضچه، در حالت جریان آشفته بیشتر از حالت جریان آرام می باشد. اما از فاصله ی تقریباً ۸ متری از سرریز به بعد، مقادیر فشار در هر دو حالت، تقریباً بر یکدیگر منطبق شده و کاهش می یابند. معمولاً در توصیف پدیده های تصادفی، مانند نوسان های فشار، از عامل های مهم آماری استفاده می شود

شکل ۳، نیمرخ شبیه سازی شده ی جهش آبی در سرریز منحنی پیوند و لبه تیز با ارتفاع ۵ متر را در نرم افزار فلوئنت نشان می دهد. شکل ۴، محدوده ی فشار پویایی وارد بر کف حوضچه را نمایش می دهد و شکل ۵، جریان در حوضچه ی آرامش را در سرریز با ارتفاع های مختلف نشان می دهد.

جدول ۳، حداکثر فشارهای پویایی وارد بر کف حوضچه ی آرامش سرریزهای منحنی پیوند و لبه تیز را نشان می دهند.

مقدار وایازی خطی (R^2) مربوط به ستون های جدول فوق در نرم افزار اکسل محاسبه گردیده و در جدول ۳ نشان داده شده اند. می دانیم که ضریب وایازی، هر چه به یک نزدیک تر باشد، مطلوب تر است. بنابراین، ضرایب وایازی فوق، مقادیر قابل قبولی را نشان می دهند.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲، مسیر عبور جریان را در حوضچه‌های آرامش نوع ۲ و ۳، در سرریز منحنی پیوند با ارتفاع ۵ متر نمایش می‌دهند و جدول ۴، فشارهای پویایی وارد بر کف حوضچه را در سه نوع حوضچه‌ی آرامش معیار USBR I، USBR II و USBR III مربوط به سرریزهای منحنی پیوند عرضه می‌دارد.

با توجه به جدول ۴، حداکثر فشار پویایی وارد بر کف حوضچه در حوضچه‌ی آرامش نوع ۱، بیشترین مقدار و در حوضچه‌ی آرامش نوع ۳، کمترین مقدار را داراست، و این قضیه در مورد ۵ سرریز منحنی پیوند، صدق می‌کند، بنابراین، از موانع اضافی در سر راه جریان به‌عنوان مستهلک کننده‌ی کارمایه اضافی، می‌توان استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

با توجه به جداول و اشکال به‌دست‌آمده در این تحقیق:

- ارتفاع سرریز و حداکثر فشار وارد بر کف حوضچه رابطه‌ی مستقیم با یکدیگر دارند، یعنی با افزایش ارتفاع سرریز، سرعت سقوط آب از روی سرریز افزایش یافته و فشار آب پویایی ناشی از پرش هیدرولیکی نیز افزایش می‌یابد. در ضمن، حداکثر فشار وارده به کف نیز در ۱/۳ ابتدایی حوضچه و بلافاصله پس از سقوط آب اتفاق می‌افتد.

- حداکثر فشارهای به‌دست‌آمده در سرریزهای اوجی بیشتر از سرریزهای لبه تیز می‌باشد، که احتمالاً این اختلاف به دلیل شکل سرریز لبه تیز و شکسته شدن سرعت جریان در هنگام سقوط آب از روی آن است.

- اندازه‌ی شبکه‌های شبکه مورد استفاده در روش عددی، می‌تواند بر حداکثر فشار وارده تأثیر گزار باشد و مقدار دقیق‌تری را نتیجه دهد.

- در جریان‌های آشفته، حداکثر فشار وارد بر کف حوضچه‌ی آرامش بیشتر از جریان آرام هست که این امر به دلیل نوسان‌های ناشی از جریان آشفته هست.

- با افزایش عدد فرود، سرعت جریان در پرش هیدرولیکی افزایش یافته و در نتیجه مقادیر ضرایب فشار حداکثر و حداقل کاهش می‌یابد.

- بلوک‌های پای تنداب، بلوک‌های انتهایی و نیز بلوک‌های آرام‌کننده (میانی)، بر حداکثر فشار به وجود آمده در حوضچه‌ی آرامش تأثیر گذاشته، و باعث کاهش آن می‌شوند. بنابراین، میزان حداکثر فشار در حوضچه‌ی

که مهم‌ترین آن‌ها از نظر مهندسی عبارت‌اند از: فشارهای حداکثر (P max) و حداقل (P min) و متوسط (P ave)، انحراف معیار بدون بعد (CP)، واریانس و توزیع چگالی احتمال. مقدار میانگین، مشخص‌کننده‌ی مبنایی است که نوسان‌ها حول آن انجام می‌شوند. در صورتی که میانگین مربعات فشارها (RMS) به‌وسیله‌ی ارتفاع معادل سرعت ورودی در جهش آبی، بدون بعد شود، فرد سنج مهمی به نام انحراف معیار بدون بعد (CP)، به دست می‌آید.

$$C_p = \frac{RMS}{\alpha \frac{V_1^2}{2g}} \quad (12)$$

$$RMS = \frac{P - P_{ave}}{0.5\rho V^2} \quad (13)$$

α ضریب نیمرخ سرعت است که معمولاً معادل ۱ فرض می‌شود. V_1 سرعت ورودی در جهش آبی و g شتاب ثقل است. در معادله‌ی ۱۳، ρ چگالی و V سرعت متوسط جریان می‌باشند.

فرد سنج بدون بعد و بسیار مهم در طراحی حوضچه‌های آرامش، اندازه‌ی حد نهایی نوسان‌های فشار (ضریب فشار) هست. این فرد سنج، فشارهای نسبی را در طول حوضه‌ی جریان در پویایی سیالات شرح می‌دهد. هر نقطه در حوضه‌ی جریان سیال، ضریب فشار مربوط به خود را دارد. این ضرایب فشار می‌توانند در نقاط بحرانی مدل جریان تعریف شوند. حد نهایی نوسان‌های فشار که مشخص‌کننده‌ی انحراف حداکثر از میانگین می‌باشند، طبق رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

ضریب فشار حداکثر

$$cp^+ = \frac{P_{max} - P_{ave}}{V_1^2 / 2g} \quad (14)$$

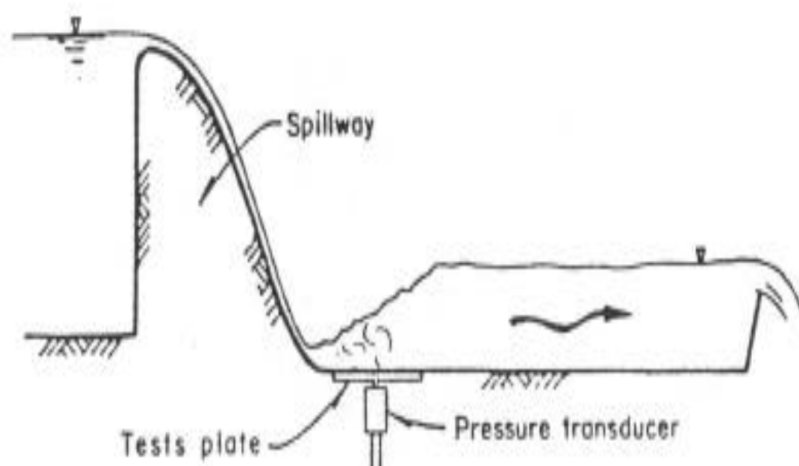
ضریب فشار حداقل:

$$cp^- = \frac{P_{ave} - P_{min}}{V_1^2 / 2g} \quad (15)$$

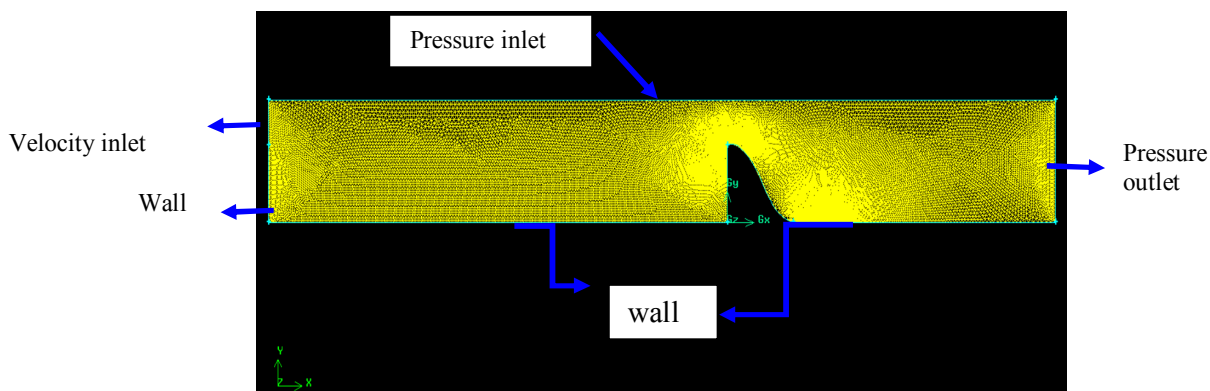
نمودارهای زیر، ضرایب فشار حداکثر و حداقل را با توجه به تعریف‌های فوق نمایش می‌دهند.

همان‌گونه که در شکل‌های ۷ تا ۱۰ ملاحظه می‌شود، مقدار Cp^+ و Cp^- با افزایش عدد فرود کاهش یافته است، که این نتیجه‌گیری با رابطه‌های مربوط به ضرایب فشار حداکثر و حداقل قابل استنباط هست. وطن‌دوست و همکاران (۲۰۱۲)، نیز در آزمایش‌های خود به همین نتیجه دست یافتند.

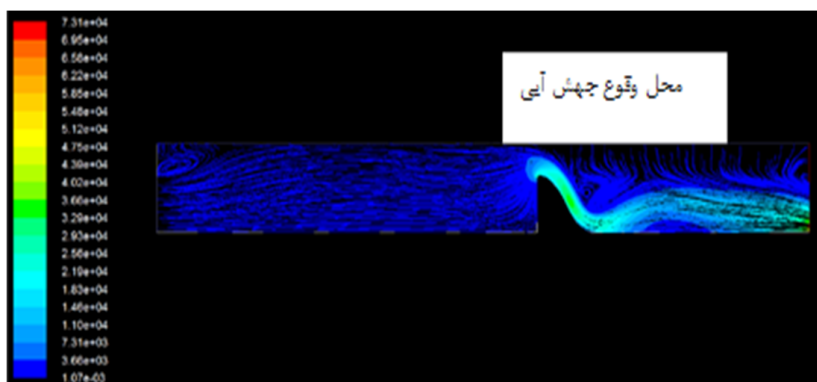
آرامش USBR II، به طور میانگین ۲۰٪ و در USBR III، به طور میانگین ۴۰٪ کاهش یافته است.



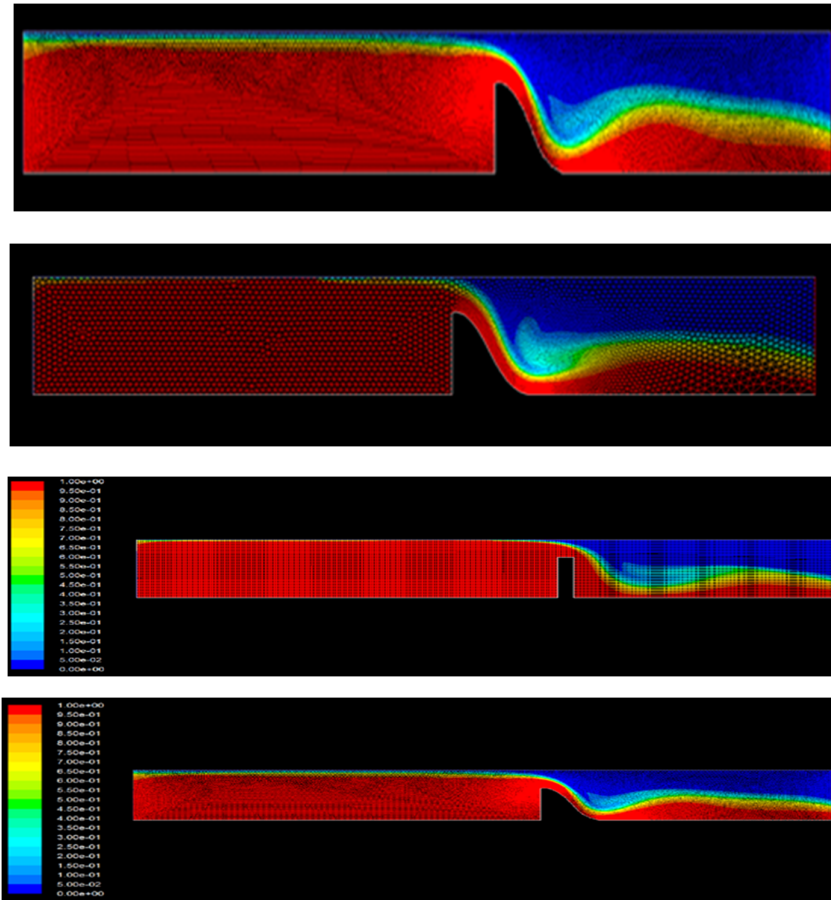
شکل ۱- مدل آزمایشگاهی حسونی زاده



شکل ۲- شبکه بندی سرریز اوجی در گمبیت و شرایط مرزی



شکل ۳- شبیه سازی جهش آبی در سرریز پیوند



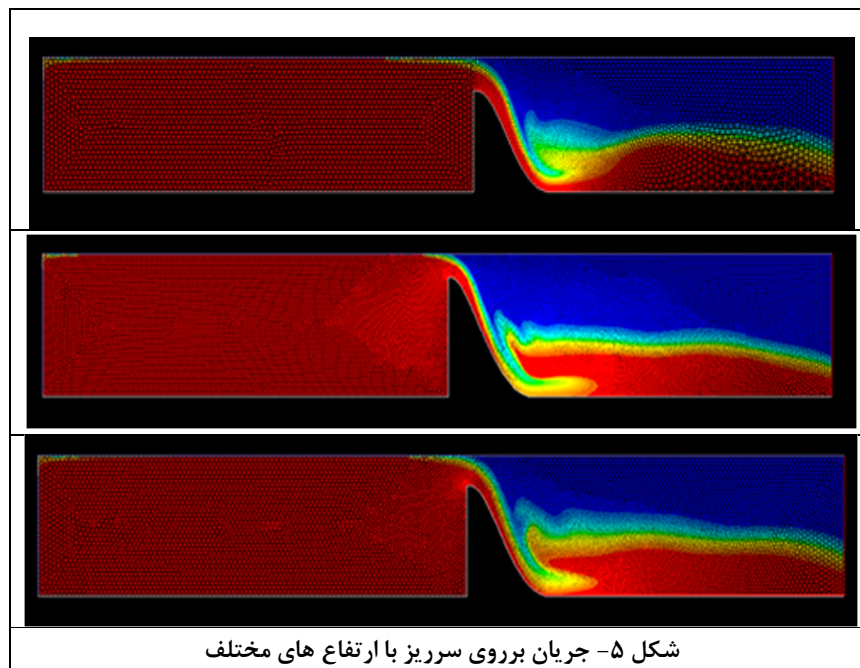
شکل ۴- تغییرات فشار آب پویایی بر روی سرریز

جدول ۳- بیشترین فشارهای وارد بر کف حوضچه ی آرامش

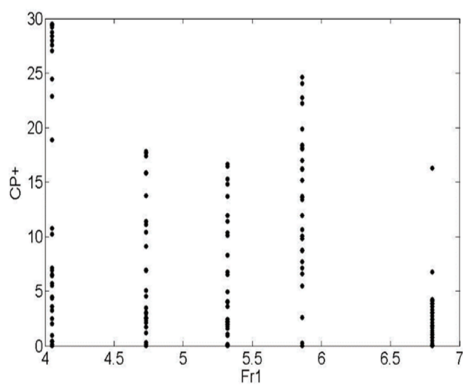
ارتفاع (m)	فشار بیشینه کف حوضچه در سرریز اوجی (pa)	فشار بیشینه کف حوضچه در سرریز لبه تیز (pa)
۵	۶۲۷۶۹.۵	۵۴۸۷۵.۷
۷	۷۷۹۰۵.۷	۵۷۸۲۸.۳
۹	۸۷۰۹۹.۱	۶۷۲۲۹.۷
۱۱	۸۹۴۴۳.۴	۱۰۹۷۲۳
۱۵	۱۴۴۷۷۵	۱۵۶۸۲۶
R^2	۰.۸۹۶۶	۰.۹۶۷۴
معادله ی وایازی	$y = 0.5253x^2 - 13963x + 76505$	$y = 745.86x^2 - 4114.9x + 53242$

جدول ۴- مقایسه ی فشارهای پویایی در سه نوع حوضچه

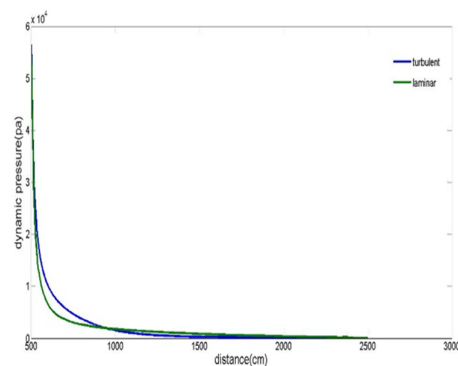
ارتفاع سرریز اوجی (m)	USBR I (pa)	USBR II (pa)	USBR III (pa)
۵	۶۲۷۶۹.۵۰	۳۳۹۸۷.۷۰	۱۰۷۶۵.۲۰
۷	۷۷۹۰۵.۷۰	۶۲۰۵۲.۴۰	۱۶۲۱۴.۶۰
۹	۸۷۰۹۹.۱۰	۷۵۸۲۵.۶۰	۲۰۱۵۳.۹۰
۱۱	۸۹۴۴۳.۴۰	۷۸۳۹۱.۲۰	۲۲۶۲۵.۵۰
۱۵	۱۴۴۷۷۵.۰۰	۱۰۳۹۳۵.۳۰	۳۵۱۷۴.۸۰



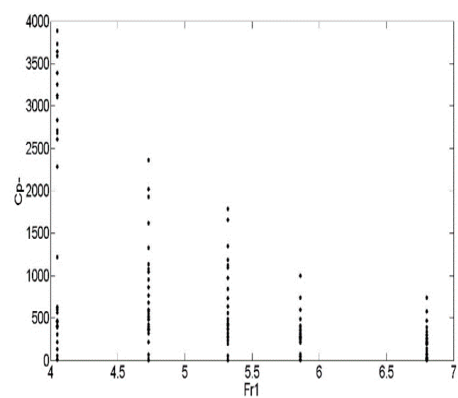
شکل ۵- جریان بر روی سرریز با ارتفاع های مختلف



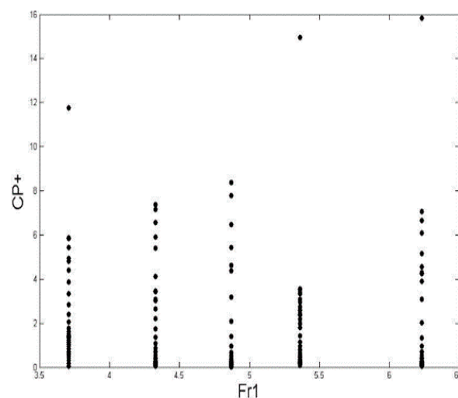
شکل ۷- تغییرات $CP+$ در کف حوضچه در سرریز اوجی



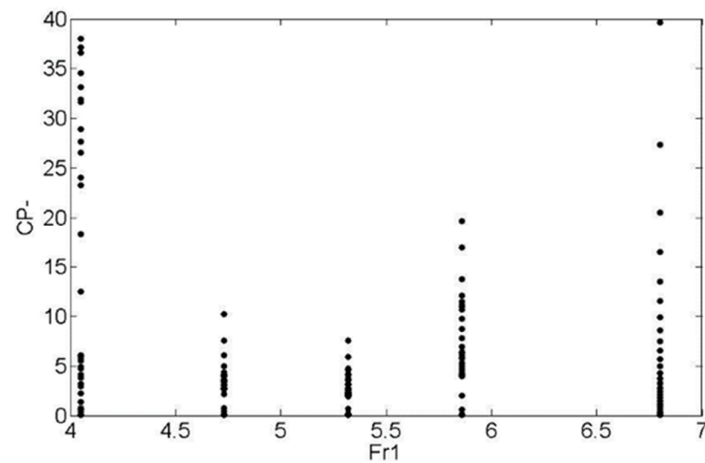
شکل ۶- مقایسه ی حداکثر فشار وارد بر کف حوضچه ی آرامش در دو حالت جریان آرام و آشفته



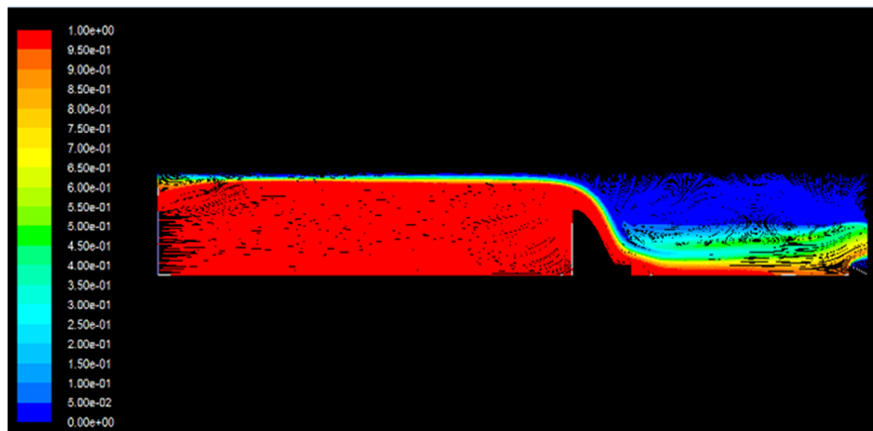
شکل ۹- تغییرات $CP-$ در کف حوضچه در سرریز اوجی



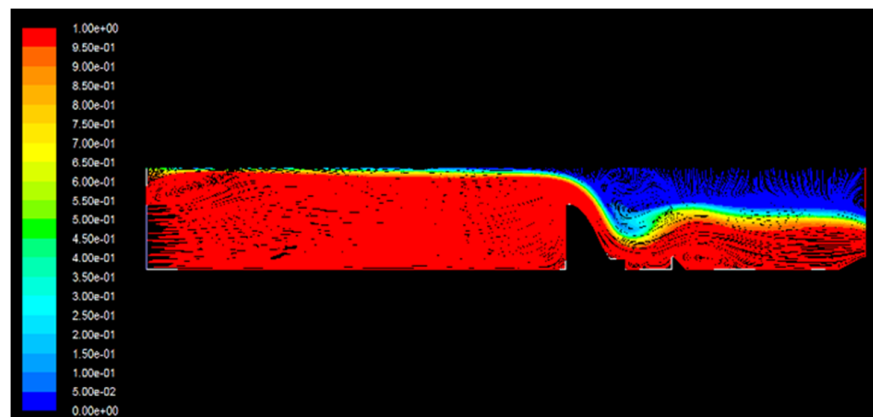
شکل ۸- تغییرات $CP+$ در کف حوضچه در سرریز لبه تیز



شکل ۱۰- تغییرات cp- در کف حوضچه در سرریز لبه تیز



شکل ۱۱- مسیر عبور جریان در حوضچه ی آرامش نوع ۲



شکل ۱۲- مسیر عبور جریان در حوضچه ی آرامش نوع ۳

منابع

(۲) پارسی، الف، و بهداروندی عسکر، م. (۱۳۹۰)، "بررسی آزمایشگاهی فشارهای پویایی در حوضچه ی آرامش"، اولین همایش راهبردهای دستیابی به کشاورزی پایدار، خرداد.

(۱) ابریشمی، ج. و حسینی، س.م. (۱۳۹۰)، "هیدرولیک نهرهای باز"، دانشگاه امام رضا(ع)، مشهد.

over flip bucket spillways World Applied Sciences Journal 16(3):397-402.

۳) دانشفراز، ر. نیک پور، م. ر. و صادقی، ح. (۱۳۹۲)، " شبیه سازی پدیده های هیدرولیکی با استفاده از فلوئنت، انتشارات عمیدی.

۴) رحمانی باروجی، علی و صباغ یزدی، سعیدرضا. "بررسی پایداری دال کف حوضچه ی آرامش تحت نوسان های فشار ناشی از پرش هیدرولیکی و نیروی بالابرنده". همایش مدیریت آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز. صفحه ی ۲۲۳-۲۱۵.

۵) کلوپانیور، م.ر. و محمدی، ب. (۱۳۸۰)، "ارزیابی فشار در محل بلوک های پای تنداب حوضچه ی آرامش،" سومین اجلاس هیدرولیک ایران، آبان.

۶) محمدزاده، ب.، بینا، م. و حسونی زاده، ه. (۱۳۸۸)، "تعیین معیاری برای طراحی ضخامت دال کف حوضچه ی آرامش تحت نیروهای پایایی و پویایی،" هشتمین اجلاس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران، آذر.

(7) Amorim, J.C., Rodrigues, R. C. and Marques, M. G. , "A Numerical and Experimental Study of Hydraulic Jump Stilling Basin," Advances in Hydro- Science and Engineering, Volume VI.

(8) Basco, D.R. and Adams, J. R. 1971 Drag force on baffle block in hydraulic jump". J. Hyraul. Div, ASCE, 97" 2023-2035.

(9) Farhoudi, J.(2009). "Total Pressure Around Chute Blocks of SAF Stilling Basins." International Journal of Civil Engineering. Vol. 7, No. 4, pp.271-279.

(10) Farhoudi. J., Sadat-Helbar, S. M and Aziz, N. 2010. "Pressure fluctuations around chute blocks of stilling Basins", J. agricultural science technology, 12(2), .: 203-212.

(11) FLUENT 6.3 User's Guide (2006).

(12) Hassonizadeh, H. and Shafai Bajestan, M. 2001, "Experimental measurement of dynamic force on slab in stilling basins," Wetlands Engineering and River Restoration.

(13) Hinge G.A, Balkrishna S., Khare. K. C, (2010), "Improved design of stilling basin for deficient tail Water", Basic, and Aplied Scientific Research 1(1:31-40.

(14) Joel, W.Toso, C.Edward Bowers, (1989), "Extreme pressures in hydraulic jump stilling Basins", J. Hydraul. Eng. 1988.114, pp. 829-843.

(15) Lopardo, R. A., and Romagnoli, M. 2008, "pressure and velocity fluctuations in stilling basins," proceedings of 16th IAHR- APD Congress and 3rd symposium of IAHR- ISHS.

(16) Narayanan ,R. and Schizas ,L. S. 1980. force on sill forced jump". of Hydraulic Div, ASCE, 106:, 1159-1172.

(17) Vatandoust, H., Khosrowjerdi, A., Kavianpour, M.R. and Manshour, M. 2012, "The impact of froude number on pressure fluctuations