



دانشگاه مازندران و صنعتی ارومیه

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و پنجم، شماره پنجم، ۱۳۹۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.12334.2691

بررسی عددی اثر همگرایی دیواره‌های سرریز بر مشخصات هیدرولیکی جریان و احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون

محمد مناف‌پور^۱، حمزه ابراهیم‌نژادیان^۲ و وحید بابازاده^۳

^۱استادیار گروه عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه ارومیه، دانشجوی دکتری گروه عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی،

دانشگاه ارومیه، ^۲دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۹۶/۹/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۶/۲۷

چکیده

سابقه و هدف: سرریزها از مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش‌ها در سازه سدها به‌شمار می‌آیند که وظیفه تخلیه دریاچه سد در مواقع اضطراری و سیلابی را بر عهده دارند. برای کاهش هزینه‌های ساخت سرریزهای نسبتاً طولانی و همچنین لحاظ عوامل توپوگرافی، دیواره‌های سرریز را به‌خصوص در تنداب‌ها به‌صورت همگرا اجرا می‌کنند. علی‌رغم مطالعات زیادی که برای شناخت مشخصات جریان بر روی سرریزها انجام شده است، اما اطلاعات اندکی در مورد تأثیر همگرایی دیواره‌های سرریز، اندرکنش جریان سرریز با این دیواره‌ها، تشکیل جریان فوق بحرانی موجی شکل حاصل از همگرایی دیواره‌های سرریز و تشکیل امواجی در پایین‌دست سرریز و مجاورت دیوارها بر روی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان پایین‌دست تنداب و پتانسیل وقوع کاویتاسیون وجود دارد. از این‌رو در پژوهش حاضر دیواره‌های سرریز به‌ازای پنج درجه مختلف همگرایی و حالت بدون همگرایی، جهت بررسی اثر تأثیرات همگرایی بر مشخصه‌های جریان بروی تنداب‌ها، شرایط نامتعادل هیدرولیکی پایین‌دست سرریز و همچنین ارتفاع امواج روی دیواره جهت طرح دیواره‌های کناری تنداب، مورد مطالعه قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D، مدل آشفتگی RNG K-ε و روش حجم محدود به شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز همگرا سد گاوشان پرداخته شده و سپس تأثیر همگرایی دیواره‌های سرریز سد گاوشان تحت زوایای مختلف همگرایی شامل ۰، ۱، ۲، ۵/۲ و ۳ درجه بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان مانند نحوه توزیع سرعت متوسط، فشار متوسط کف و عمق متوسط جریان و همچنین احتمال وقوع کاویتاسیون مورد بررسی قرار گرفت. برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از تحلیل عددی، از نتایج آزمایشگاهی مدل هیدرولیکی سرریز استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج بیانگر افزایش سرعت متوسط و عمق متوسط جریان با افزایش جمع‌شدگی دیواره‌های سرریز می‌باشد. همچنین موقعیت مینیمم عمق جریان روی سرریز با افزایش جمع‌شدگی دیواره‌ها به تاج سرریز نزدیک‌تر می‌شود. جمع‌شدگی دیواره‌ها باعث ایجاد دو دسته موج‌های ثانویه در کناره‌ها و محور سرریز می‌شود که منجر به افزایش آشفتگی در جریان و افزایش ارتفاع دیواره‌های سرریز می‌شود.

* مسئول مکاتبه: h.ebrahimnezhadian@urmia.ac.ir

نتیجه‌گیری: با افزایش زاویه همگرایی، عدد فرود در طول مسیر جریان کاهش می‌یابد. با بررسی مقادیر فشار مشخص شد که به علت بالا آمدن عمق جریان در امتداد دیواره‌ها، فشار نیز در نزدیک دیواره‌های شوت افزایش پیدا می‌کند. به علاوه با محاسبه شاخص کاویتاسیون در مقاطع مختلف مدل عددی مشخص شد که با افزایش زاویه همگرایی، شاخص کاویتاسیون افزایش یافته و در نتیجه بالاترین ریسک پدیده کاویتاسیون برای مدل با حداقل زاویه همگرایی خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: پدیده کاویتاسیون، دیواره همگرای سرریز، شبیه‌سازی عددی، مدل آشفتگی RNG K-ε، نرم‌افزار Flow 3D

مقدمه

هزینه‌های حفاری به حداقل برسد. این دو شرایط متضاد تنها می‌تواند با کاهش عرض شوت در جهت جریان حاصل گردد (۱۹). زاویه همگرایی (ϕ)، بیانگر زاویه کمی اندازه‌گیری شده در صفحه $(x-y)$ است که مقدار صفر آن بیانگر آن است که دیواره‌های هادی سرریز به موازات جریان قرار دارد. مطالعات محدودی از این نوع سرریزها جهت کمک به فرآیند طراحی این سازه‌ها در دسترس می‌باشد. در سال‌های اخیر برخی از پژوهشگران راهنمای طراحی برای سرریزهای همگرای پلکانی با زوایای مختلف همگرایی ارائه دادند (۹، ۱۰ و ۱۹).

دیواره‌های همگرای شوت‌ها باعث پیچیدگی جریان و شکل‌گیری پرش‌های هیدرولیکی اجباری و یا موج‌های ایستا در طول دیواره‌های جریان می‌گردد. پرش‌های هیدرولیکی اجباری وقتی که جریان فوق بحرانی توسط دیواره‌های هادی جریان منحرف می‌گردند، ایجاد می‌شود که منجر به افزایش عمق جریان در طول دیواره‌ها می‌شوند (۴ و ۷). این موج‌های ایستا در ابتدا در کانال‌های افقی با استفاده از دیواره‌های منحرف‌کننده همگرا تشخیص داده شدند، در حالی که هنوز وقوع این پدیده در سرریزهای شیب‌دار با جزئیات کافی تشریح نشده است (۱۱، ۱۲ و ۱۳).

سرریز در مواقعی که مخزن سد با توجه به گنجایش محدود خود قادر به ذخیره آب ناشی از سیلاب‌ها نباشد، آن را به نحو بی‌خطری به پایین دست سد منتقل می‌کند. هندسه سرریز تابع عوامل بسیاری از جمله توپوگرافی، شکل دره، جنس سنگ‌بستر و غیره می‌باشد. طراحان سعی دارند که شیب طولی و شکل سرریز را متناسب با توپوگرافی و موقعیت سنگ‌بستر طوری طراحی کنند که حداقل عملیات خاک‌برداری و خاک‌ریزی و آماده‌سازی پی سازه سرریز را در برداشته باشد. از طرفی معمولاً برای کم کردن هزینه‌های ساخت، اقدام به همگرا نمودن دیواره‌ها و کاهش عرض سرریز در مسیر جریان می‌نمایند. در اثر این جمع‌شدگی موج‌های ثانویه متقاطع در جریان فوق بحرانی به وجود می‌آیند که به سمت پایین دست حرکت می‌کنند. محل وقوع این موج‌ها ثابت و به دبی جریان بستگی دارد، اهمیت این موج‌ها در ضرورت افزایش ارتفاع آزاد و در نتیجه دیواره‌های بلندتر در طرفین شوت است (۱ و ۲). از دید طراح، یک سرریز باید به اندازه کافی عریض باشد تا قادر به عبور جریان با حداقل عمق سرریز شونده شده و بر این اساس منجر به کاهش حداقل ارتفاع سد شود. از طرفی دیگر، شوت و حوضچه آرامش باید تا اندازه که امکان دارد باریک‌تر باشند تا

داده‌های جمع‌آوری شده به‌ازای دبی معین، عمق جریان در امتداد دیواره‌های سرریز در زاویه ۵۲ درجه، در ایستگاهی خاص ۲/۵ برابر مقدار مانند عمق جریان در امتداد دیواره‌های سرریز در زاویه همگرایی ۱۵ درجه می‌باشند. همچنین رفتار جریان در دو جناح سرریز یکسان می‌باشد (۹). هانت و همکاران (۲۰۱۲) یک روش آنالیزی را برای یک حجم کنترل ساده‌شده، جهت پیش‌بینی حداقل ارتفاع مورد نیاز دیواره‌های هادی سرریز همگرا جهت جلوگیری از روگذری جریان از دیواره‌ها توسعه دادند (۱۰).

در این پژوهش نتایج مدل عددی جریان عبوری از سرریز سد گاوشان برای سرریز با دیواره‌های موازی و زوایای مختلف همگرایی دیواره‌های هادی سرریز برای سه دبی جریان متفاوت مورد بررسی و تأثیر همگرایی دیواره‌ها بر مشخصه‌های جریان و احتمال وقوع کاویتاسیون مورد مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

معرفی سد و سرریز مورد مطالعه: سد مخزنی گاوشان با عنوان طرح ملی گاوشان از نوع سنگریزه‌ای با هسته قائم رسی است که بر روی رودخانه گاوه رود، در غرب ایران و در ۲۰ کیلومتری شهرستان کامیاران (۷۵ کیلومتری کرمانشاه) قرار دارد. این سد به‌منظور آبیاری حدود ۳۱۰۰۰ هکتار از زمین‌های دشت‌های بيله‌ور و میان دربند توسط شرکت توسعه منابع آب اجرا شده است. مختصات جغرافیایی این سد در محل تاج سرریز ۳۴ درجه و ۵۸ دقیقه و ۰۱/۶۰ ثانیه شمالی و ۴۶ درجه و ۵۹ دقیقه و ۳۹/۰۷ ثانیه شرقی می‌باشد (شکل ۱).

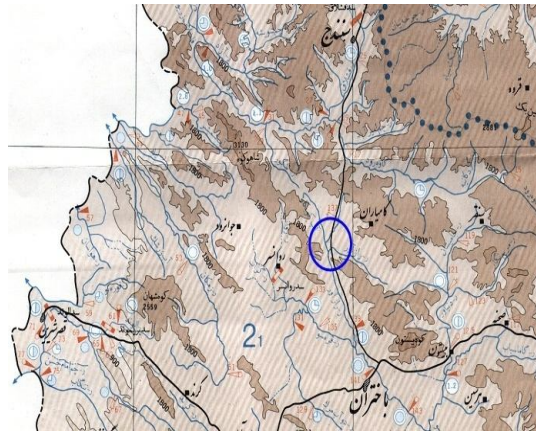
به‌منظور مطالعه و تحلیل جریان عبوری از روی سرریز، از مدل‌های فیزیکی یا ریاضی استفاده می‌شود. تحلیل جریان عبوری از روی سرریز سد توسط مدل‌های فیزیکی، هزینه‌بر و زمان‌بر خواهد بود. در حالی‌که استفاده از مدل‌های ریاضی و حل کامپیوتری بسیار مقرون‌به‌صرفه می‌باشد.

در سال‌های اخیر پژوهشگران بسیاری دینامیک سیالات محاسباتی را برای شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزها با دیواره‌های موازی مورد استفاده قرار دادند. در غالب این پژوهش‌ها از مدل عددی Flow-3D با تکیه بر روش گسسته‌سازی حجم محدود و مدل‌های آشفتگی k-ε استاندارد و RNG K-ε بهره برده شد. نتایج این پژوهش‌ها بیانگر انطباق قابل قبول نتایج مدل عددی با نتایج مانند آزمایشگاهی در مشخصه‌های جریان و نیمرخ سطح آزاد آب داشتند (۱، ۲، ۳، ۱۴، ۱۵ و ۲۰).

به‌دلیل غیرمعمول بودن سرریزهای همگرا و همچنین ایجاد پیچیدگی بالا در هیدرولیک جریان، مطالعات آزمایشگاهی محدودی از این نوع سرریزها در دسترس می‌باشد.

مطالعات برخی از پژوهشگران بر روی مدل فیزیکی سرریزهای پلکانی با دیواره‌های همگرا بیانگر آن است که برای حفاظت در برابر افزایش عمق جریان ایجادشده به‌وسیله موج‌های ایستای ناشی از دیواره‌های همگرا، دیواره‌ها با ارتفاع بیشتر مورد نیاز است (۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۶، ۱۷ و ۱۹).

هانت و همکاران (۲۰۰۸) مطالعه‌ای بر روی مدل فیزیکی سرریز پلکانی همگرا تحت تأثیر تغییر زاویه همگرایی دیواره‌های سرریز، برای محاسبه کمینه ارتفاع مورد نیاز دیواره‌ها را انجام دادند که بر اساس

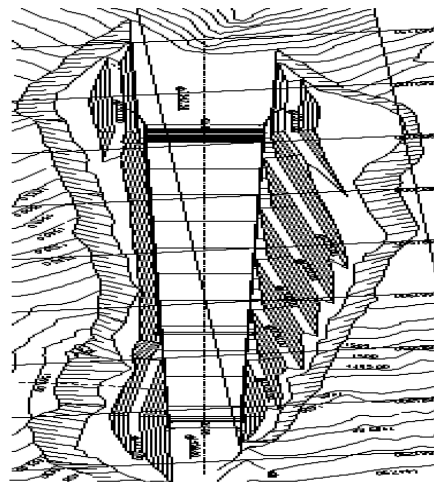


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محل احداث سد گاوشان.

Figure 1. Geographical -location of the site of the Gavshan dam.

تحت زاویه $2/07$ درجه از دو طرف کاهش یافته و در انتها به $31/2$ درجه می‌رسد و طول آن ۲۵۱ متر که به پرتابه جامی شکل با شعاع ۲۰ متر که عرض ابتدای آن $31/2$ و عرض انتهای آن ۳۰ متر می‌باشد، منتهی می‌شود (شکل ۲).

همچنین سرریز سد گاوشان نیز در مختصات عرض جغرافیایی 34 درجه و 57 دقیقه و $50/09$ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی 46 درجه و 59 دقیقه و $40/63$ دقیقه شرقی قرار دارد. سرریز سد با دیواره‌های همگرا به طول کل تاج ۵۰ متر و عرض تنداب در ابتدا $49/35$ متر بوده که در جهت جریان



شکل ۲- پلان سرریز با دیواره‌های همگرای سد گاوشان.

Figure 2. Spillway plan of Gavshan Dam with converging walls.

در این پژوهش برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل عددی از داده‌های آزمایشگاهی مدل هیدرولیکی سرریز سد گاوشان با مقیاس $1:40$ ، تهیه شده توسط مؤسسه تحقیقات آب استفاده گردید (۱۸). آزمایش‌ها

مدل فیزیکی سرریز سد گاوشان از نوع اوجی با تنداب، دیواره‌های همگرا و پرتاب‌کننده جامی شکل و با استفاده از مصالح پلکسی‌گلاس در فلوم آزمایشگاهی مؤسسه تحقیقات منابع آب ساخته شد.

$$\frac{\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_j}{\bar{\alpha} + u_j \frac{\bar{\alpha}_j}{\alpha_j}} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v_j \frac{\bar{\alpha}_i}{\alpha_j} - u_j' u_j' \right) \quad (2)$$

که در آن‌ها، \bar{u}_i مؤلفه سرعت متوسط جریان در جهات، $p(x,y,z)$ مؤلفه فشار، g مؤلفه شتاب ثقل u_j' مؤلفه سرعت لحظه‌ای جریان در جهت (x)

معادلات پروفیل سطح آزاد: موقعیت سیال در ترم‌های $F(x,y,z,t)$ تابع حجم سیال (VOF) تعریف می‌شود. این تابع بیانگر حجم سیال بر واحد حجم و به صورت رابطه‌های ۳ و ۴ است:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (F A_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (F A_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (F A_z w) + \zeta \frac{F A_x u}{x} \right] = FDIF + FSOR \quad (3)$$

که در آن،

$$FDIF = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} + R \frac{\partial}{\partial x} \left(v_F A_y R \frac{\partial F}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) + \zeta \frac{v_F A_x F}{x} \right\} \quad (4)$$

ضرایب پخش (v_F) که به صورت $(C_F \mu / \rho)$ تعریف می‌شوند مقادیر ثابتی هستند که عکس آن بعضی اوقات تحت عنوان عدد اشمیت آشفستگی تعریف می‌شود. این ترم‌های پخش تنها برای اختلاط آشفستگی دو سیال که توزیع آن‌ها به وسیله تابع F بیان می‌شود، کاربرد دارد. ترم $FSOR$ مربوط به منبع چگالی $RSOR$ در معادله پیوستگی جرم است (۸).

هندسه مدل، شرایط مرزی و شبکه‌بندی مدل عددی: برای تهیه هندسه مرزهای جامد همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است از نرم‌افزار $CATIA$ و برای انفصال میدان از یک بلوک محاسباتی استفاده شده است که در

با برقراری ۳ دبی مختلف و متناسب با شرایط واقعی و با اندازه‌گیری پارامترهایی مانند فشار، سرعت و عمق جریان در مقطع مختلف در طول سرریز بررسی گردید.

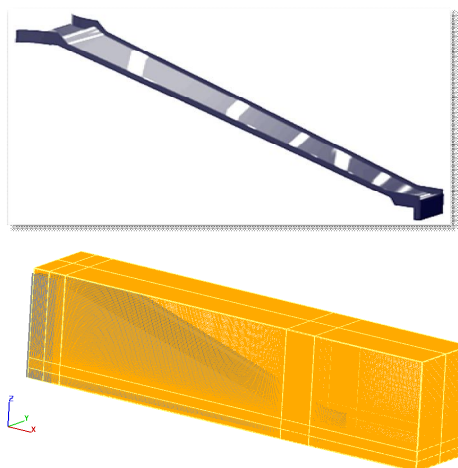
نرم‌افزار Flow3D: FLOW-3D یک مدل مناسب برای حل مسائل پیچیده دینامیک سیالات بوده و قادر است دامنه وسیعی از جریان سیالات را شبیه‌سازی کند. این نرم‌افزار برای مدل کردن جریان‌های سطح آزاد سه‌بعدی غیرماندگار با هندسه پیچیده کاربرد فراوانی دارد. در این نرم‌افزار از روش حجم سیال (VOF) برای حل معادلات حاکم بر جریان در شبکه‌بندی منظم قائم استفاده می‌شود. شکل معادلات گسسته‌سازی شده در این روش مانند معادلات گسسته‌سازی شده در روش تفاضل محدود هست. بر این اساس، نرم‌افزار FLOW-3D از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل مسائل استفاده می‌کند. این نرم‌افزار قابلیت به‌کارگیری پنج مدل آشفستگی به روش‌های، طول اختلاط پراتل، مدل تک‌معادله‌ای، دو معادله‌ای $k-\epsilon$ ، RNG و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) را برای مدل‌سازی جریان دارا می‌باشد. از این‌رو نرم‌افزار FLOW-3D یک انتخاب بسیار مناسب برای شبیه‌سازی جریان سیال‌های تراکم‌ناپذیر در هندسه‌های پیچیده به‌شمار می‌رود. قوانین حاکم بر جریان عبارت‌اند از قانون بقای جرم و بقای مومنتم که برای جریان آشفته تراکم‌ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت به صورت رابطه‌های ۱ و ۲ بیان می‌شود (۵).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

که در آن، $\partial \bar{u}_i$ تغییرات مؤلفه سرعت متوسط.

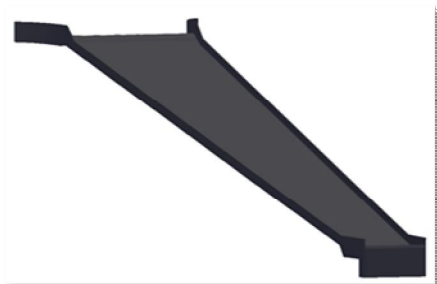
مجموع شامل چهار میلیون حجم محاسباتی می‌باشد. شکل ۳ مرزهای جامد و شبکه‌بندی مدل عددی را نشان می‌دهد.

شکل (۴) هندسه مدل سرریز با همگرایی دیواره سرریز و سرریز بدون همگرایی را نشان داده است.



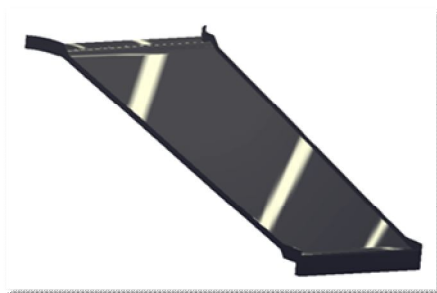
شکل ۳- هندسه مرزهای جامد و شبکه‌بندی.

Figure 3. Solid Boundary Geometry and 3D Meshing.



الف) سرریز با ۳ درجه همگرایی

a) Spillway with 3 degrees of convergence



ب) سرریز بدون همگرایی

b) Spillway without Convergence

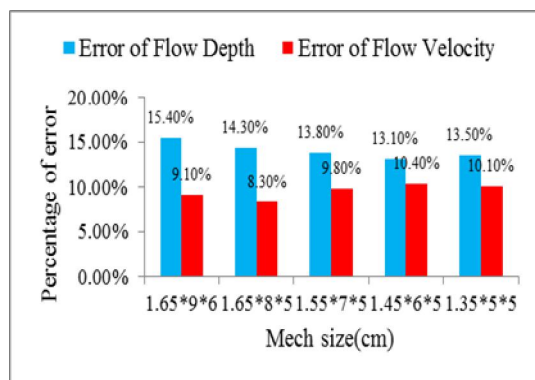
شکل ۴- نمایش سه‌بعدی از سرریز سد گاوشان با زاویه همگرایی دیواره سرریز $\theta=3^\circ$ و بدون همگرایی.

Figure 4. 3D view of the Spillway of the Gavshan Dam with the convergence angle of the overflow wall $\theta=3^\circ$ and without convergence.

دیواره در کناره‌ها بود. جریان ورودی بر اساس دبی ورودی انتخاب گردید. جریان خروجی نیز به علت خروج جریان به صورت جریان خروجی انتخاب گردید. سقف بلوک نیز به علت حضور هوا به صورت شرط مرزی تقارن در نظر گرفته شد. در شکل ۳ بلوک شبکه مش بندی مشاهده می شود.

باید اندازه شبکه مش بندی به صورت بهینه و مناسب از هر جهت برای مدل انتخاب شود و این از مهم ترین عوامل مؤثر در یک مدل سازی عددی صحیح است. پس از بررسی ابعاد گوناگون در نهایت ابعاد مش بندی به صورت $1/65 \times 0/8 \times 0/5$ سانتی متر در راستای طولی، عرضی و ارتفاعی در نظر گرفته شده است. در مجموع ابعاد در نظر گرفته شده عددی در حدود $4,400,000$ سلول محاسباتی در مدل سازی مورد استفاده قرار گرفته شد. نتایج صحت سنجی بر روی ابعاد مش بندی در شکل ۵ نشان داده شده است.

اولین گام در شبیه سازی عددی، کالیبره کردن مدل هست. بدین معنی که تأثیرات عوامل خارجی را باید به حداقل رسانده و شرایط مدل را به شرایط واقعی نزدیک تر کنیم. برای استخراج مقادیر درست داده های یک مدل عددی یا آزمایشگاهی، رسیدن حالت جریان به یک شرایط پایدار ضروری می باشد. شرایط مختلف مرز بندی به ازای مناسب ترین طول مخزن آب پشت سرریز به طول یک متر از سرریز در آزمون های مختلف بررسی شد که برای جلوگیری از طولانی شدن تنها به شرح نتایج به دست آمده از این آزمون ها پرداخته شده است. در این آزمون ها شرایط مختلف مرز بندی شبکه سلول محاسباتی به صورت مرز ورودی با حالات سرعت ورودی و دبی - عمق جریان و غیره، مرز خروجی و دیواره های جانبی شبکه سلول های محاسباتی در حالت دیواره و تقارن، کف و سقف شبکه سلول های محاسباتی به ترتیب، دیواره و تقارن در نظر گرفته شد. علت استفاده از دیواره ها وجود

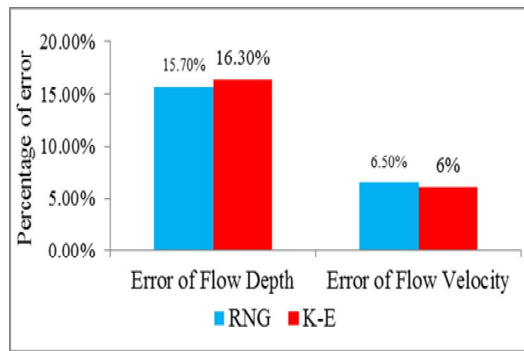


شکل ۵- مقادیر خطای عمق و سرعت جریان با تغییر ابعاد مش بندی.

Figure 5. Flow depth, velocity error values by changing the dimensions of the mesh.

$k-\epsilon$ استاندارد و $k-\epsilon$ RNG ندارد ولی با توجه به عملکرد بهتر مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG در سطوح دارای انحنا (همچون انحنای سطح بستر سرریزها)، از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG در شبیه سازی عددی استفاده شد (شکل ۶).

بر اساس بررسی های صورت گرفته در غالب شبیه سازی های جریان بر روی سرریزها، مدل های آشفتگی دو معادله ای $k-\epsilon$ استاندارد و $k-\epsilon$ RNG بیش ترین تطابق پذیری را داشته اند. با بررسی های صورت گرفته بین این دو مدل آشفتگی، مشخص شد که مدل عددی حساسیت فراوانی نسبت به دو مدل

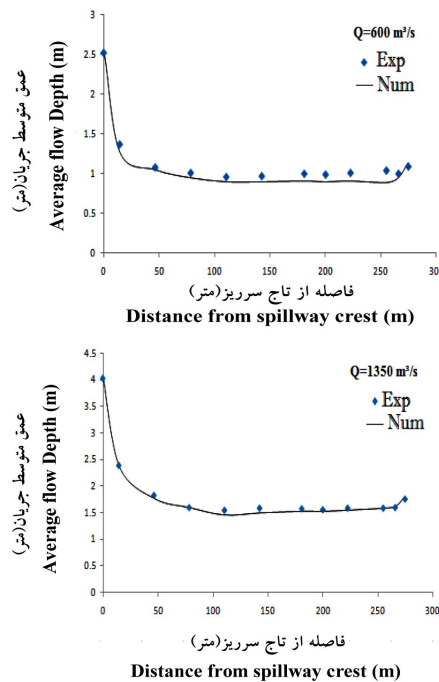


شکل ۶- مقادیر خطای عمق بر حسب درصد و سرعت جریان با تغییر مدل آشفتگی.

Figure 6. Flow depth, velocity error values by changing the Turbulence Model.

آزمایشگاهی و با محاسبه آن در مدل عددی حاضر در ۰/۶ عمق از سطح آب تعیین می‌گردد. نیمرخ طولی عمق جریان: در تمامی دبی‌ها برخلاف افزایش سرعت، عمق آب در طول جریان به تدریج کاهش می‌یابد. شکل ۷ نیمرخ طولی عمق جریان را برای دبی‌های ۶۰۰ و ۱۳۵۰ مترمکعب بر ثانیه در دو مدل عددی و فیزیکی را نشان می‌دهد مقایسه نتایج بیانگر انطباق قابل قبول نتایج عددی و مدل فیزیکی دارد.

نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر شامل متوسط سرعت جریان و عمق آب در مقاطع ذکر شده در طول سازه سرریز سد گاوشان به ازای چهار دبی ۶۰۰، ۸۰۰، ۹۵۰ (دبی سیلاب به ازای دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله) و ۱۳۵۰ مترمکعب بر ثانیه (دبی حداکثر سیلاب محتمل) می‌باشد. اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی مانند عمق آب و سرعت جریان روی سرریز در محور تاج سرریز (در پنج محور) انجام گرفته است. سرعت متوسط جریان با اندازه‌گیری سرعت در مدل

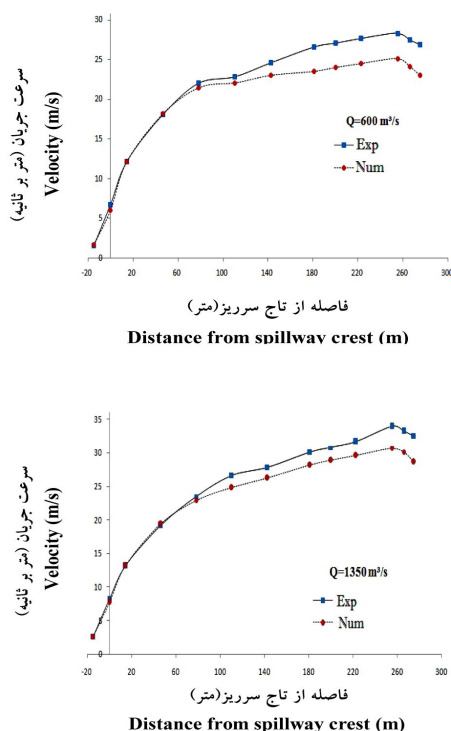


شکل ۷- مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی عمق متوسط جریان در طول سرریز.

Figure 7. Comparison of numerical and laboratory values of mean depth of flow during Spillway.

نرم افزار با مرزهای جامد در مدل عددی، کف شوت در مدل به صورت کاملاً مسطح شبیه سازی نمی گردد و دارای ناهمواری هایی می باشد که این مسأله باعث بروز اختلاف مابین نتایج مدل عددی و فیزیکی در طول شوت و تجمیع این خطا می گردد. همان گونه که از شکل ۸ مشاهده می شود، نتایج مدل عددی انطباق قابل قبولی را با نتایج مدل فیزیکی نشان می دهد.

توزیع سرعت جریان: تغییرات سرعت بر روی سرریز سد گاوشان بر خلاف عمق آب بوده، به طوری که در ابتدای تنداب جریان شتاب گرفته، بنابراین مقادیر سرعت در بدو ورود به تنداب افزایش می یابند. بیشترین مقدار سرعت در دبی طراحی (PMF) مربوط به قسمت ابتدای باکت و معادل ۳۰ متر بر ثانیه است. با توجه به نحوه برخورد شبکه بندی



شکل ۸- مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی سرعت متوسط جریان در طول سرریز.

Figure 8. Comparison of numerical and laboratory values of average flow velocity during Spillway.

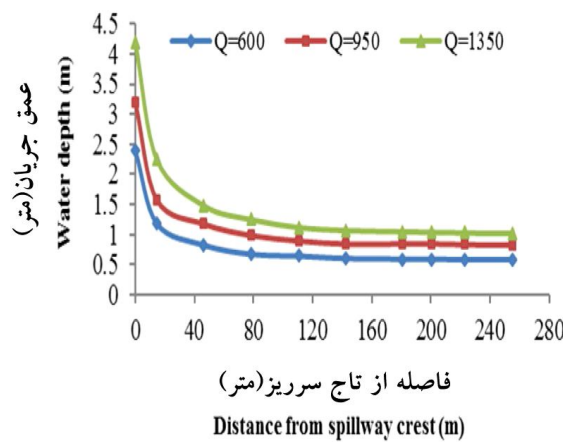
شرایط جریان یکنواخت با عمق و سرعت جریان ثابت برقرار شده است. متناسب با کاهش عمق جریان در جهت جریان، سرعت جریان افزایش می یابد. موقعیت تشکیل جریان یکنواخت روی تنداب از محل تاج سرریز، بستگی به میزان دبی در واحد عرض جریان عبوری دارد و با کاهش دبی و در نتیجه کاهش عمق جریان و اثرگذاری نیروهای اصطکاکی جدارها در کل مقطع جریان، در فاصله کوتاهی از تاج شاهد

نتایج و بحث

مشخصه های هیدرولیکی جریان سرریز با دیواره های موازی: همان طوری که از شکل ۹ مشهود است برای سرریز با دیواره های موازی جریان متغیر سریع بعد از عبور از روی تاج سرریز با عمق بحرانی در فاصله کوتاهی از تاج سرریز (در حدود ۱۵ متری) تبدیل به جریان تغییر تدریجی با تغییرات کم عمق و سرعت جریان گردیده و در نهایت در پایین دست تنداب

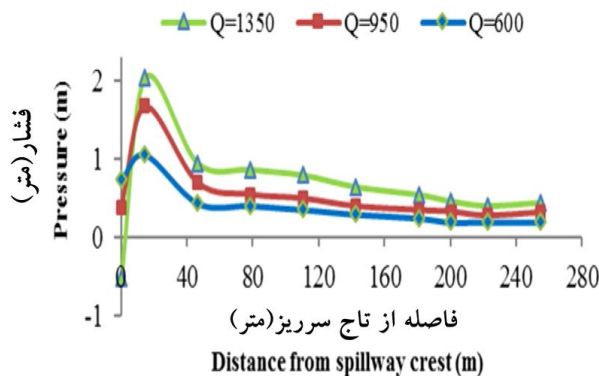
بعد از عبور جریان از تاج سرریز خطوط جریان به روند طبیعی خود برگشته به گونه‌ای که تا فاصله‌ای از تاج سرریز این کاهش فشار جبران شده است از این فاصله به بعد به دلیل بالا رفتن سرعت جریان، بار دیگر فشار متوسط روند نزولی به خود گرفته است. با افزایش دبی نیز مقادیر فشار متوسط در طول سرریز افزایش یافته است.

جریان توسعه یافته روی سرریز هستیم. به ازای یک دبی معین، فشار متوسط در کف در روی تاج سرریز به دلیل تغییر در خطوط جریان و انحنای پروفیل اوجی کاهش می‌یابد که این کاهش برای دبی‌های بالا بسیار بیش‌تر است؛ به گونه‌ای که برای دبی ۱۳۵۰ مترمکعب بر ثانیه فشار متوسط مقدار منفی به خود گرفته است (شکل ۱۰). همان‌گونه که از شکل ۹ مشخص است



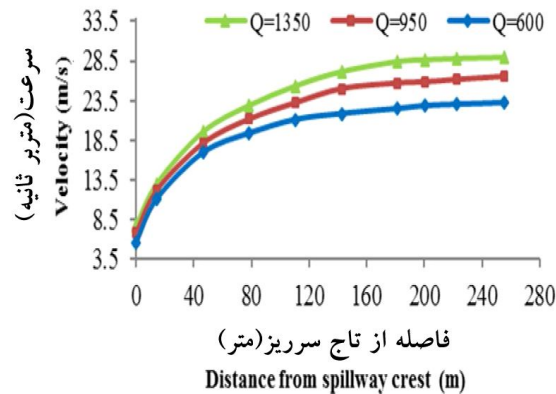
شکل ۹- نیمرخ‌های عمق متوسط جریان آب در طول سرریز سد گاوشان به ازای دبی‌های مختلف (با دیواره‌های موازی).

Figure 9. Depth profiles of the water flow during the Spillway of the Gavshan dam over different discharge (with parallel walls).



شکل ۱۰- نیمرخ‌های طولی فشار متوسط جریان در بستر سرریز برای دبی‌های مختلف (با دیواره‌های موازی).

Figure 10. Longitudinal profiles of medium pressure in the overflow bed for different flow rates (with parallel walls).

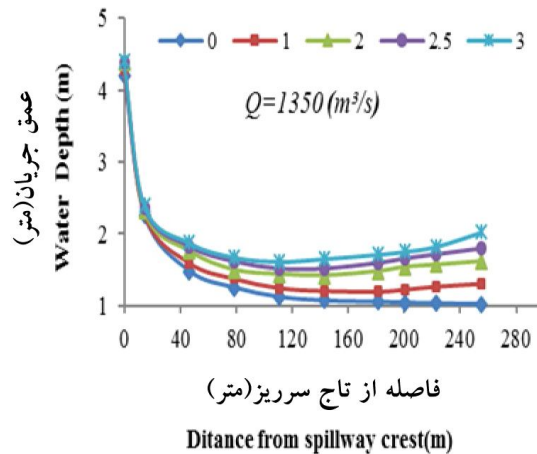


شکل ۱۱- نیمرخ‌های سرعت متوسط جریان روی سرریز سد گاوشان به‌ازای دبی‌های مختلف (با دیواره‌های موازی).

Figure 11. Average flow velocity profiles on the Spillway of Gavshan dam on different Discharges (with parallel walls).

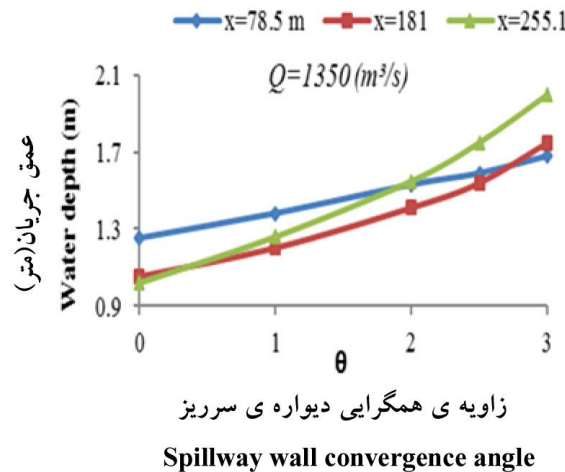
تأثیر همگرایی دیواره‌های سرریز بر مشخصات هیدرولیکی جریان: به‌منظور بررسی تأثیر زاویه همگرایی دیواره‌های سرریز بر روی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان، نیمرخ‌های سطح آزاد جریان آب و سرعت متوسط جریان به‌ازای دبی بیشینه و زوایای جمع‌شوندگی ۰، ۱، ۲، ۳، ۲/۵، ۳ درجه محاسبه و در شکل‌های (۱۲ تا ۱۴) ترسیم گردیده‌اند.

به‌ازای یک دبی ثابت، سرعت جریان بر روی تاج کم‌ترین مقدار خود را داشته و در طول تنداب رفته‌رفته افزایش یافته است تا به حداکثر مقدار خود در پای سرریز برسد. با افزایش دبی بر روی شوت سرعت جریان نیز به‌تناسب افزایش پیدا کرده است (شکل ۱۱).



شکل ۱۲- الف- نیمرخ‌های طولی عمق متوسط جریان در طول سرریز جهت زوایای مختلف همگرایی دیواره.

Figure 12.a. Longitudinal profiles of mean depth of flow during Spillway for different angles of wall congruence.

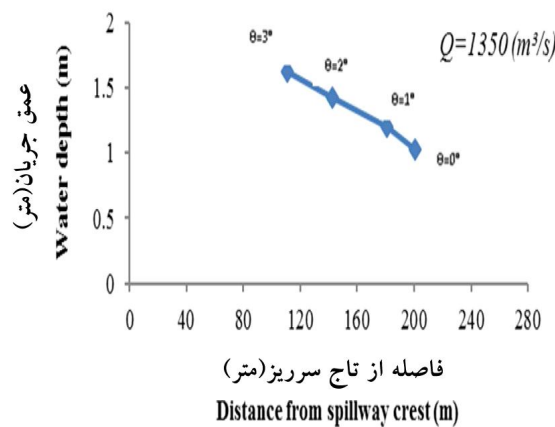


شکل ۱۲-ب- نمودار تغییرات عمق جریان در سه مقطع متفاوت نسبت به زوایای همگرایی مختلف دیواره سرریز.

Figure 12.b. Flow depth Variation charts in three different sections than the different convergence angles of the Spillway wall.

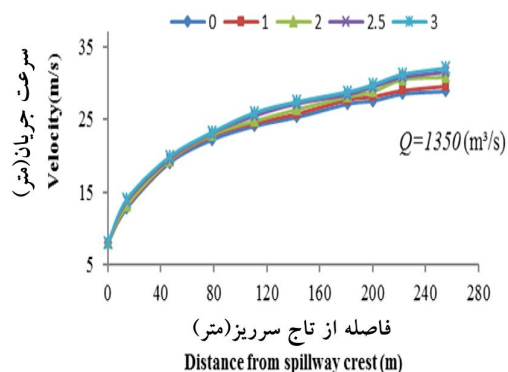
عمق متوسط جریان در طول تنداب به تدریج کاهش یافته تا جایی که به کم‌ترین مقدار خود در پایین دست می‌رسد، موقعیت تشکیل حداقل عمق جریان، با افزایش زاویه همگرایی دیواره‌های سرریز به طرف بالادست انتقال می‌یابد (شکل ۱۳)، بعد از محل تشکیل حداقل عمق جریان بر روی تنداب شاهد روند افزایشی عمق جریان در پایین دست سرریز هستیم که شدت آن برای زاویه سه درجه بیشتر می‌باشد (شکل ۱۲-ب).

به‌ازای زوایای همگرایی مختلف دیواره‌های هادی، در مسیر جریان، عمق متوسط جریان ابتدا در مسیر جریان کاهش یافته و سپس به سبب اثرات ناشی از جمع‌شدگی دیواره‌های سرریز و بروز موج‌های ثانویه‌ای که به امواج دم‌خروسی مشهورند افزایش می‌یابد (شکل ۱۲-الف). با افزایش زاویه همگرایی و در نتیجه کاهش عرض سرریز عمق جریان در مقاطع مختلف سرریز افزایش بیشتری یافته است (شکل ۱۲-ب). با اعمال همگرایی دیواره‌های هادی سرریز،



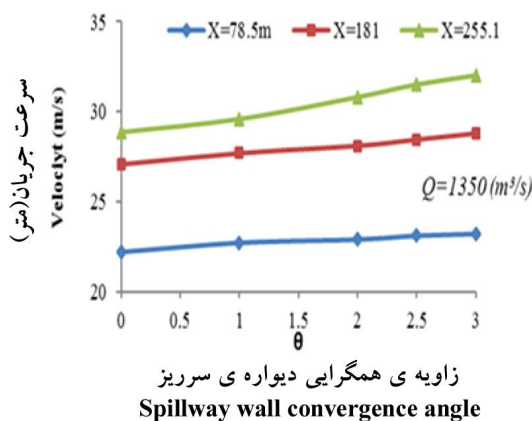
شکل ۱۳- موقعیت مینیمم عمق جریان روی سرریز جهت زوایای همگرایی مختلف دیواره.

Figure 13. The minimum position of the flow depth over the Spillway for different wall convergence angles.



شکل ۱۴- الف- نیمرخ‌های سرعت متوسط جریان روی سرریز جهت زوایای همگرایی مختلف دیواره.

Figure 14.a. Average flow velocities of the flow on the Spillway for different wall convergence angles.



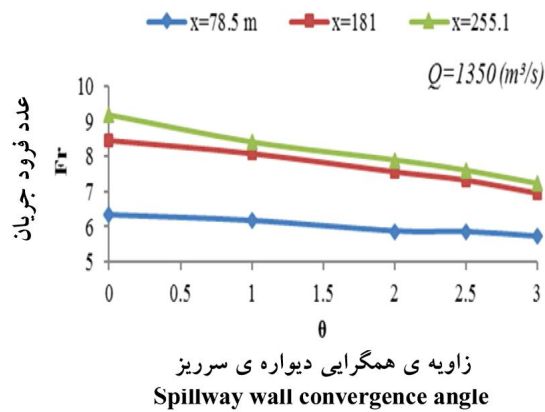
شکل ۱۴- ب- تغییرات سرعت متوسط جریان در سه مقطع متفاوت نسبت به زوایای همگرایی مختلف دیواره سرریز.

Figure 14.b. Flow depth Variation charts in three different sections than the different convergence angles of the Spillway wall.

ارتفاع سطح آب مخزن سد با کف سرریز در مقطع موردنظر می‌باشد. در حالت کلی همگرایی دیواره‌های سرریز باعث افزایش سرعت متوسط جریان شده است (شکل ۱۴ الف و ب).

با بررسی عدد فرود جریان در سه مقطع ذکر شده روی تنداب (شکل ۱۵) نیز می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به این‌که در اثر همگرایی دیواره‌های سرریز مقدار سرعت و عمق جریان افزایش یافته است ولی تأثیر همگرایی روی افزایش عمق در مقایسه با افزایش سرعت متوسط جریان آب تا حدودی بیشتر بوده که باعث کاهش عدد فرود جریان روی سرریز، به خصوص در قسمت انتهایی تنداب شده است.

همان‌گونه که از شکل (۱۴- الف) مشهود است با اعمال همگرایی دیواره سرریز سرعت متوسط جریان افزایش یافته و به‌ازای زوایای همگرایی بیشتر، سرعت متوسط جریان افزایش بیشتری داشته است. برای تمامی حالات همگرایی مقطع، سرعت متوسط جریان بر روی انحناء تاج سرریز افزایش سریع و ناگهانی داشته و در طول تنداب نیز این روند افزایشی ادامه دارد، با همگرایی دیواره‌های سرریز سطح تماس جریان با کف و جداره‌های سرریز (محیط تر شده) کاهش یافته و متعاقب آن شعاع هیدرولیکی افزایش یافته در نتیجه سرعت متوسط جریان افزایش می‌یابد. با این‌حال سرعت جریان با شدت کم‌تری نسبت به عمق افزایش یافته است و سرعت جریان بیش‌تر تابعی از اختلاف

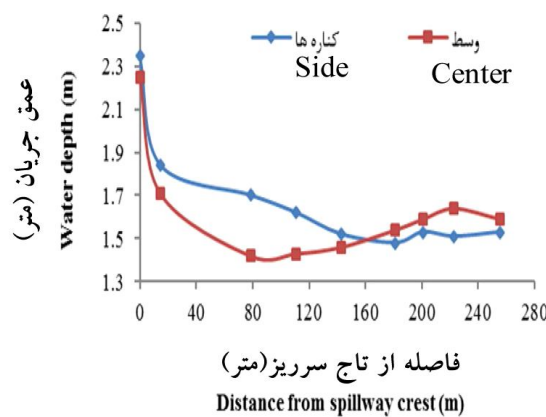


شکل ۱۵- تغییرات عدد فرود جریان در سه مقطع متفاوت نسبت به زوایای همگرایی مختلف دیواره سرریز.

Figure 15. Changes in the flow rate number in three different sections than the different convex angles of the spillway wall.

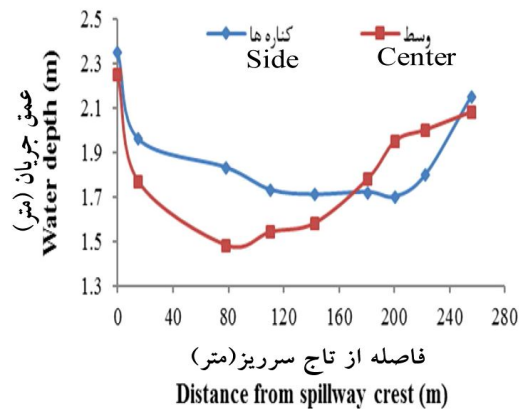
موضعی جریان در کناره‌های دیواره سرریز می‌گردد، این امواج پس از انعکاس از کناره‌ها به سمت محور مرکزی سرریز در جهت جریان حرکت می‌کنند و پس از برخورد با یکدیگر باعث افزایش عمق آب و تشکیل امواجی روی محور مرکزی سرریز می‌شوند که به امواج دم‌خروسی مشهور هستند. سپس این امواج به سمت کناره‌ها حرکت کرده و در اثر برخورد با دیواره‌های سرریز تقریباً مستهلک می‌شوند.

در جریان‌های فوق بحرانی اعمال جمع‌شدگی باعث ایجاد موج‌های عرضی ثانویه روی تنداب می‌شود. برای بررسی این موضوع در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نیمرخ‌های طولی عمق جریان در کنار دیواره‌ها و محور مرکزی کانال و میانگین هر مقطع جهت دبی جریان $Q=1350 \text{ m}^3/\text{s}$ نشان داده شده است. در اثر همگرایی و برخورد جریان با دیواره‌های کناری سرریز یک جبهه آشفتگی (امواج ایستا) با زاویه ضربه‌ای تشکیل می‌گردد که باعث افزایش عمق



شکل ۱۶- نیمرخ‌های طولی عمق جریان در محور کناری و مرکزی سرریز برای حالت همگرایی دو درجه و دبی بیشینه

Figure 16 - Longitudinal profiles of flow depth in the center and side of the Spillway axis for the two degrees of convergence and maximum discharge



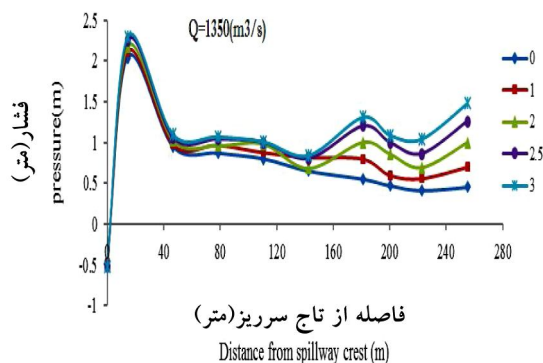
شکل ۱۷- نیمرخ‌های طولی عمق جریان در محور کناری و مرکزی سرریز برای همگرایی سه درجه و دبی بیشینه.

Figure 17. Length profiles of flow depth in the center and side of the Spillway axis for three degrees of convergence and maximum discharge.

جریان در بستر سرریز به‌ازای زوایای مختلف همگرایی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. بررسی نتایج بیانگر آن است که در حالت کلی تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در توزیع فشار با تغییر زاویه همگرایی دیواره‌های هادی سرریز در طول سرریز وجود ندارد که البته میزان این تغییرات فشار در بخش‌های انتهایی طول سرریز نسبت به بخش‌های ابتدایی آن به‌دلیل اختلاف عمق بیشتر جریان در بخش انتهایی، بیشتر می‌باشد. نوسانات فشار در طول سرریز ناشی از امواج متلاطم روی سطح سرریز در طول مسیر است که منجر به توزیع غیرهیدرو استاتیکی فشار می‌گردد.

با مقایسه نیمرخ‌های به‌دست آمده (شکل‌های ۱۶ و ۱۷) به‌ازای دبی بیشینه برای سرریز با دو و سه درجه همگرایی مشاهده می‌کنیم که با افزایش زاویه همگرایی میزان اختلاف عمق آب در محورهای کناری با محور وسط سرریز افزایش یافته است، همچنین، برای همگرایی سه درجه اختلاف عمق آب محور وسط با محورهای کناری بیشتر می‌باشد که علت را می‌توان افزایش ارتفاع امواج ایجاد شده در اثر افزایش همگرایی دانست.

بررسی مقادیر فشار بر روی بستر سرریز به‌ازای زوایای همگرایی مختلف: نیمرخ طولی فشار متوسط



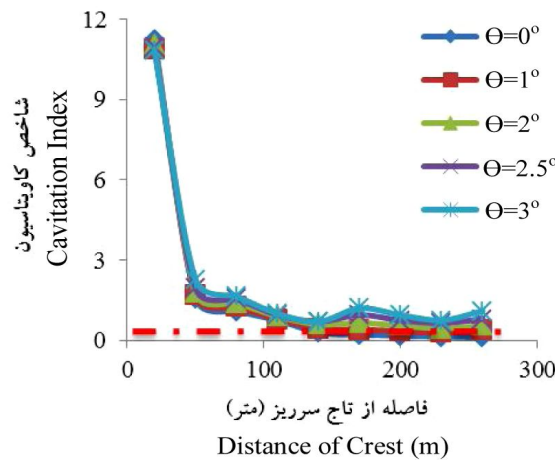
شکل ۱۸- نیمرخ طولی فشار متوسط جریان در بستر سرریز به‌ازای زوایای همگرایی مختلف.

Figure 18. Longitudinal profile of mean pressure flow in the Spillway bed for different convergence angles.

$$\sigma = (P - P_v) / (\rho (v^2/2)) \quad (5)$$

که در آن، P و V به ترتیب فشار و سرعت متوسط سیال می‌باشند، P_v فشار بخار اشباع است که در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۲۳۳۰ پاسکال می‌باشد. مقادیر شاخص کاویتاسیون در طول سرریز به‌ازای زوایای مختلف همگرایی در شکل ۱۹ ارائه شده است.

بررسی پدیده کاویتاسیون بر روی سرریز به‌ازای زوایای جمع‌شدگی مختلف: یکی از اصلی‌ترین فاکتورهایی که نقش بحرانی در طراحی سرریزها دارد، پدیده کاویتاسیون است که یکی از دلایل رایج شکست و تخریب سرریزها می‌باشد. پتانسیل وقوع پدیده کاویتاسیون به‌وسیله شاخص بی‌بعد کاویتاسیون ارزیابی می‌گردد که توسط فرمول زیر قابل محاسبه می‌باشد:



شکل ۱۹- مقادیر شاخص کاویتاسیون در طول سرریز.

Figure 19. Cavitation index values during Spillway.

درصد خطای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی ۸/۳٪ برای سرعت جریان و ۱۴/۳٪ برای عمق جریان بیانگر آن است که نرم‌افزار FLOW-3D به‌عنوان یک برنامه تحلیلی جریان از قابلیت مناسبی جهت مدل‌سازی جریان با سطح آزاد برخوردار می‌باشد. با اعمال جمع‌شدگی دیواره‌های سرریز، عمق متوسط جریان در طول تنداب به تدریج کاهش یافته تا جایی که به کم‌ترین مقدار خود برسد، سپس شاهد روند افزایشی عمق جریان هستیم که این روند افزایشی برای زاویه سه درجه بیشتر می‌باشد. موقعیت مینیمم عمق جریان روی سرریز با افزایش همگرایی دیواره‌ها به طرف تاج سرریز نزدیک‌تر می‌شود.

همان‌گونه که از ۱۹ مشخص است زاویه همگرایی صفر درجه دارای بحرانی‌ترین حالت از لحاظ احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون می‌باشد. بر طبق نتایج به‌طور تقریبی تطابقی بین افزایش زاویه همگرایی و شاخص کاویتاسیون وجود دارد. همچنین شیب افزایش شاخص کاویتاسیون در پایین‌دست سرریز شدیدتر می‌گردد.

نتیجه‌گیری

با توجه به مقادیر به‌دست آمده برای متوسط سرعت، عمق جریان و فشار کف برای سرریز سد گاوشان نتایج پژوهش در موارد زیر خلاصه می‌گردد:

دیواره‌های سرریز باعث افزایش در عمق و سرعت متوسط جریان و همچنین مقادیر فشار متوسط وارده بر بستر جام می‌شود. افزایش جمع‌شدگی دیواره‌های سرریز باعث کاهش عدد فرود جریان عبوری از روی سرریز همگرا می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی آشکار کرد که بحرانی‌ترین مقدار شاخص کاویتاسیون برای حالتی که زاویه همگرایی دیواره‌های سرریز حداقل است، به وقوع می‌پیوندد، همچنین هرچه زاویه همگرایی بیش‌تر گردد، مقدار شاخص کاویتاسیون به‌خصوص در پایین‌دست سرریز به‌تدریج افزایش می‌یابد.

درصد خطای ۶٪ برای سرعت جریان و ۱۵/۷٪ برای عمق جریان به‌ازای مدل آشفتگی RNG، بیانگر آن است که علی‌رغم اختلاف کم درصد خطاها برای مدل‌های آشفتگی RNG و K-ε استاندارد، مدل آشفتگی RNG به‌دلیل قابلیت بالاتر شبیه‌سازی سطوح منحنی، به‌عنوان مدل منتخب برای شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز انتخاب می‌گردد.

در اثر همگرایی دیواره‌های سرریز، یکسری موج‌های ثانویه در طول سرریز ایجاد می‌شود که باعث افزایش نیم‌رخ سطح آب در نزدیکی دیواره‌ها و متعاقباً در محور سرریز می‌گردد. ارتفاع این موج‌ها با افزایش همگرایی سرریز بیش‌تر می‌شود. جمع‌شدگی

منابع

1. Barani, Gh., and Abbasi, U. 2005. Optimization of flat plate Flip Bucket radius using dimensional analysis. 5th Iranian Hydraulic Conference, November 17-19, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Pp: 145-153. (In Persian)
2. Bayrami, M.K. 2004. Water Transfer Structures. Published by Isfahan University of Technology, fourth edition. 2. 240p. (In Persian)
3. Boes, R., and Hager, W.H. 2003a. Two-phase flow characteristics of stepped spillways. J. Hydr. Engin. 129: 9. 661-670.
4. Bruce, M., Savage, M., and Johnson, C. 2001. Flow over Ogee Spillways, Physical and Numerical Model Case study. J. Hydr. Engin. ASCE. 127: 8. 320-332.
5. Ferziger, J., and Peric, M. 1996. Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer Verlag, 450p.
6. Hager, W.H. 1992. Spillways-Shockwaves and air entrainment. ICOLD Bulletin 81, Int. Commission for Large Dams, Paris, 185p.
7. Hanna, L.J., and Pugh, C.A. 1997. Hydraulic model study of Pilar Dam (Report No. PAP-752). Denver, CO: USA Department of Interior, Bureau of Reclamation.
8. Hirt, C., and Nichols, B. 1981. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. J. Computation. Physic. 39: 201-225.
9. Hunt, S.L., Kadavy, K.C., Abt, S.R., and Temple, D.M. 2008. Impact of converging chute walls for roller compacted concrete stepped spillways. J. Hydr. Engin. 134: 1000-1003.
10. Hunt, S.L., Temple, D.M., Abt, S.R., Kadavy, K.C., and Hanson, G. 2012. Converging stepped spillways: Simplified momentum analysis approach. J. Hydr. Engin. 138: 9. 796-802.
11. Ippen, A.T. 1936. An analytical and experimental study of high velocity flow in curved sections of open channels (PhD thesis). California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 230p.
12. Ippen, A.T., and Dawson, J.H. 1951. Design of channel contractions. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 116: 326-346.
13. Ippen, A.T., and Harleman, D.R.F. 1956. Verification of theory for oblique standing waves. Proc. Am. Soc. Civ. Eng. 121: 678-694.
14. Johnson, M., and Savage, B. 2006. Physical Numerical Comparison of Flow over Ogee Spillway in the Presence of Tail Water. J. Hydraul. Eng. 132: 12. 1353-1357.

15. Martin, H.M. 1960. Hydraulic Model Studies of the Trinity Dam Spillway Flip Bucket. Central Valley Project, California, Hydraulic Laboratory Report No. Hyd-467.
16. Robinson, K.M., Rice, C.E., Kadavy, K.C., and Talbot, J.R. 1998. Energy losses on roller compacted concrete stepped spillways. Proc., 1998 Water Resources Engineering, Vol. 2, ASCE, Reston, VA, Pp: 1434-1439.
17. Savage, M., and Johnson, C. 2001. Flow over Ogee Spillway: Physical and Numerical Case study. J. Hydr. Engin. 127: 8. 640-649.
18. Water Research Institute (affiliated to the Ministry of Energy). 2003. Final report of the Hydraulic Model of Gavshan Dam Overflow.
19. Woolbright, R.W. 2008. Hydraulic performance evaluation of RCC stepped spillways with sloped converging training walls (Master's thesis). Oklahoma State University, OK, USA.
20. Willey, J., Ewing, T., Lesleighter, E., and Dymke, J. 2010. Numerical and physical modeling for a complex stepped spillway. Hydropower & Dams, 3: 103-113.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 25(5), 2019

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.12334.2691

Numerical study of spillway sidewall convergence effects on the hydraulic characteristics of flow and probability of occurrence of cavitation phenomenon

M. Manafpour¹, *H. Ebrahimnezhadian² and V. Babazadeh³

¹Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Water and Hydraulic Structure, Urmia University,

²Ph.D. Student, Dept. of Civil Engineering, Water and Hydraulic Structure, Urmia University,

³M.Sc. Graduate, Dept. of Civil Engineering, Water and Hydraulic Structure, Urmia University

Received: 12.06.2017; Accepted: 09.18.2018

Abstract

Background and Objectives: Spillways are one of the most important and most sensitive parts of the dams structures, which are responsible for the drainage of the dam in emergencies and floods. Although many studies have been conducted to identify flow characteristics over the spillways, but little information is available on the effect of the convergence of spillway walls on the hydraulic characteristics of the supercritical flow downstream of the chute and the potential for cavitation occurrence. To reduce the costs of relatively long spillways and also consideration of topographic factors, spillway walls especially in chutes constructed convergently. Due to the convergence of the walls and the interaction of the flow of spillway with these walls, the supercritical stream is formed, which the result of this interaction is the formation of waves at the downstream of the spillway and on the walls of the chute. This phenomenon affects the downstream flow and causes uneven hydraulic conditions on the spillway; therefore, the height of the waves on the wall affects the design of the walls of the chute and in this regard, the profile of the waves on the wall is also important.

Materials and Methods: In this study, using Flow-3D software, $RNGk - \epsilon$ turbulence and finite volume method, flow over convergent spillway of Gavshan dam simulated and then, the effect of convergence of the spillway walls of Gavshan dam under different angles of convergence including 0, 1, 2, 2.5 and 3 degrees of convergence on hydraulic characteristics of the flow, such as the average velocity distribution, medium pressure and mean depth of flow, as well as the probability of occurrence of cavitation were investigated. To verify the numerical result, experimental data of hydraulic model was used.

Results: The results showed that with increasing in convergence of spillway side walls, the average speed and depth of flow increased. Location of minimum depth of flow on spillways with increasing convergence on the side walls becomes closer to the spillway crest. Convergence of the side walls creates two sets of secondary wave in axes and corner of spillways, which leads to an increase in the height of the side walls.

Conclusion: With the increasing convergence angle, Froude number decreases along the flow path. Also, through exploring the pressure values, it was relieved that due to the rise of the flow depth along the walls, the pressure increases near the chute walls accordingly. Furthermore, by calculating the cavitation number at different sections of each numerical model, it was determined that as the convergence angle of the model narrows, the cavitation index increases and consequently, the highest cavitation risk will be spotted for the least convergent model.

Keywords: Cavitation, Convergence side walls, Flow 3D software, Numerical simulation, RNG K- ϵ turbulent model

* Corresponding Author; Email: h.ebrahimnezhadian@urmia.ac.ir

