

تأثیر زاویه دیواره‌های جانبی و عدد فرود روی میدان جریان در سرریزهای اوجی در شرایط قوس محوری

سید اسحق افتد^{۱*}، سیروس ارشادی^۲، مجتبی صانعی^۳

- ۱- کارشناس ارشد، گروه سازه های هیدرولیکی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس
- ۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان
- ۳- دانشیار گروه مهندسی رودخانه و سواحل پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران

* sehagh_1357@yahoo.com

تاریخ دریافت: [۹۶/۰۲/۲۱]

تاریخ پذیرش: [۹۶/۰۸/۲۰]

چکیده

سرریز اوجی به منظور فراهم نمودن تخلیه ایمن سیلاب در پشت سد به نواحی پائین دست ساخته می شود. به طور کلی سرریزهای اوجی در سدهای با محور مستقیم استفاده می شود. این در حالی است که به دلیل شرایط توپوگرافی محل ساخت، گاهی اوقات مجبور به ساخت سد با محور قوس دار می شویم. در این مطالعه، میدان جریان روی سرریز اوجی در شرایط قوس محوری به کمک نرم افزار FLOW-3D شبیه سازی شد. آشفتگی میدان جریان با استفاده از مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و $k-\epsilon$ RNG شبیه سازی شد. همچنین تغییرات سطح آزاد جریان به وسیله طرح VOF بازسازی شد. همچنین در مدل عددی، دیواره های متقارن جانبی سرریز در سه حالت مختلف ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب برای دبی های ۳۴، ۳۶ و ۲۲/۶ لیتر بر ثانیه بررسی شد. علاوه بر این، تأثیر متغیر زاویه دیواره های جانبی سرریز اوجی و عدد فرود روی مشخصات میدان جریان مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج مدل سازی، مدل عددی مقادیر آزمایشگاهی را با دقت قابل قبولی پیش بینی نمود. به عنوان نمونه، مقادیر درصد خطای نسبی نیم رخ های طولی سطح آزاد جریان برای مدل های سرریز اوجی ۱۲۰، ۹۰ و ۶۰ درجه در شرایط قوس محوری به ترتیب برابر ۱۲/۸۳، ۱۳/۶۰ و ۳/۴۸ محاسبه شد. همچنین در اثر اندرکنش جریان و بدنه قوسی شکل سرریز، جریان فوق بحرانی موجی شکل تشکیل شد که به آن جریان بالی شکل یا دم خروسی می گویند که با افزایش زاویه همگرایی قوس محوری، ارتفاع پدیده دم خروسی به شکل قابل ملاحظه ای افزایش و در مقابل با کاهش زاویه مذکور ارتفاع این پدیده کاهش یافت. از طرفی با افزایش عدد فرود جریان پای سرریز، ارتفاع پدیده دم خروسی با کاهش همراه شد.

واژگان کلیدی: سرریز اوجی، قوس محوری، شبیه سازی عددی، FLOW-3D.

۱- مقدمه

با و یا بدون دریچه عمل کند. این نوع سرریز در محل سدهای قوسی، پشت بنددار و خاکی به عنوان سازه تخلیه کننده جریان، ساخته می شود که جزیی از ساختمان یک پارچه ای سد محسوب

سرریز اوجی به دلیل بازدهی بالای تخلیه از کاربردی ترین نوع سرریزها در طراحی سازه های هیدرولیکی است که می تواند

می‌شود. به دلیل کاربرد گسترده سرریزهای اوجی در سدسازی، مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی فراوانی روی رفتار هیدرولیکی این نوع از سازه‌ها انجام شده است. تولیس^۱ (۲۰۱۱) به بررسی ضریب دبی سرریزهای اوجی مستغرق پرداخت. وی روش ارائه شده برای پیش‌بینی ضریب دبی توسط USBR را مورد بررسی مجدد قرار داد و نتایج روش مذکور را با نتایج آزمایشگاهی، در شرایط هندسه‌ی و هیدرولیکی مختلف مقایسه نمود [1]. کومار و همکاران به مطالعه مشخصات هیدرولیکی سرریز لبه-تیز در شرایط قوس محوری به سمت بالادست پرداختند. آنها رابطه‌ای برای محاسبه ضریب دبی این نوع از سرریز به عنوان تابعی از زاویه رأس و نسبت هد موجود به ارتفاع سرریز ارائه نمودند. آنها نشان دادند که بازدهی سرریز با افزایش نسبت هد موجود به ارتفاع سرریز، به دلیل تداخل امواج عرضی ناشی از همگرایی جریان در مقادیر دبی بالا، کاهش می‌یابد. همچنین آنها نشان دادند که برای سرریز با زاویه رأس ۹۰ درجه، دبی جریان روی سرریز در مقایسه با شکل نرمال سرریز ۴۰ درصد افزایش می‌یابد [2]. در ادامه، شیخ کاظمی و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی، نیم‌رخ جریان روی سرریزهای اوجی در شرایط قوس محوری را بررسی کردند. آنها برای دبی‌های مختلف هیدرولیک جریان روی این نوع از سرریزهای اوجی را مطالعه نمودند و نشان دادند که با افزایش دبی تا ۹/۲ لیتر بر ثانیه، ضریب دبی سرریز افزایش می‌یابد [3]. در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی میدان جریان داخل سازه‌های هیدرولیکی کاربرد گسترده‌ای یافته است. صرفه‌جویی در زمان و کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی از مهمترین مزیت‌های مدل‌های عددی محسوب می‌شوند. اولسن و جلسویگ^۲ (۱۹۹۸) با استفاده از معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده در زمان و نیز معادلات $k-\epsilon$ استاندارد به روش حجم محدود جریان عبوری از روی سرریز را به صورت دو بعدی و سه بعدی شبیه‌سازی نمودند. آنها در تعیین سطح آزاد جریان ابتدا کل سرریز را به صورت مستغرق در نظر گرفتند و سپس نشان دادند که با گذر زمان به علت وجود ترم

ثقل در معادلات حاکم، سطح آزاد جریان شکل واقعی خود را بدست می‌آورد [4]. ساواج و جانسون جریان عبوری از روی یک سرریز اوجی را شبیه‌سازی نمودند. آنها از نرم افزار FLOW-3D برای مدل‌سازی میدان جریان استفاده نمودند. همچنین در مدل مذکور آشفتگی جریان توسط مدل $k-\epsilon$ استاندارد پیش‌بینی شد [5]. چاتایلا و تابارا^۳ الگوی جریان روی سرریزهای اوجی را با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و مدل عددی ADINA شبیه‌سازی نمودند. مدل عددی آنها تغییرات سطح آزاد جریان را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نمود [6].

صباغ یزدی و همکاران در سال ۱۳۸۷، به بررسی عددی جریان در حوضچه آرامش پرش هیدرولیکی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D مبادرت نمودند. در گام اول برای درستی-آزمایی نرم افزار در پیش‌بینی پارامترهای جریان در پرش هیدرولیکی از یک نمونه آزمایشگاهی استفاده نمودند و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG را با آن مقایسه کردند. در مرحله بعد از یک حوضچه آرامش استفاده نموده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی را با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مربوطه مورد مقایسه قرار دادند [7]. زندی گوهرریزی و اژدري مقدم تغییرات شاخص کاویتاسیون در سرریزهای اوجی را توسط نرم افزار ANSYS-CFX به صورت عددی بررسی کردند. آنها برای مدل-سازی آشفتگی میدان جریان از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد استفاده نمودند. آنها نشان دادند که بر اساس شاخص کاویتاسیون بحرانی، نواحی انتهایی شوت و نزدیک به جام پرتابی، نواحی مستعد کاویتاسیون هستند [8].

با مرور مطالعات انجام شده روی سرریزهای اوجی، مشاهده می‌شود که نیاز به مطالعه عددی الگوی جریان روی سرریزهای اوجی در شرایط قوس محوری وجود دارد. لازم به ذکر است که در شرایط آزمایشگاهی، قادر به بررسی کلیه پارامترهای هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان نیستیم که این نقصان توسط مدل‌های عددی پوشش داده می‌شود. در این مطالعه، میدان جریان آشفته و سطح آزاد بر روی سرریزهای اوجی در شرایط قوس محوری با استفاده از نرم افزار FLOW-

1 Tullis

2 Olsen and Kjellesvig

3 Chatila and Tabbara

۲-۲- مدل عددی

۲-۲-۱- معادلات حاکم

در این شبیه‌سازی عددی برای حل میدان جریان سیال غیرقابل تراکم در دستگاه مختصات کارتزین از معادله پیوستگی و معادلات متوسط‌گیری شده ناویر استوکس استفاده می‌شود که توسط روابط زیر معرفی شده است.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0.0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-p \delta_{ij} + \rho \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

در اینجا U_i, U_j و x به ترتیب مؤلفه‌های سرعت و محورهای مختصات در سیستم مختصات کارتزین است. همچنین t زمان، ρ چگالی سیال، p فشار، δ_{ij} دلتای کرونیکر^۱، ν_t لزوجت آشفتگی^۲ است. همچنین در این مطالعه عددی، برای پیش‌بینی تغییرات سطح آزاد جریان از طرح VOF استفاده شده است. در طرح VOF برای محاسبه جزء حجمی سیال، معادله انتقال زیر حل می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + U_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0.0 \quad (3)$$

در اینجا F جزء حجمی سیال در یک سلول محاسباتی است. چنانچه یک سلول محاسباتی مشخص پر از آب باشد $F = 1$ خواهد شد. اگر $F = 0$ سلول مورد نظر خالی است و اگر $0 < F < 1$ سلول مورد نظر حاوی هر دو فاز آب و هوا است [9].

۲-۲-۲- هندسه مدل عددی

با توجه به ساختار هندسه‌های سرریز اوجی در شرایط قوس محوری، امکان تولید این هندسه‌ها در محیط نرم افزار FLOW-3D وجود ندارد. بنابراین، هندسه‌های مذکور توسط نرم افزار اتوکد تولید شده است. ابتدا هر یک از مدل‌های مذکور به-

3D شبیه‌سازی می‌شود. برای شبیه‌سازی آشفتگی میدان جریان از مدل‌های آشفتگی $k - \epsilon$ استاندارد و $k - \epsilon$ RNG برای بازسازی تغییرات سطح آزاد جریان از طرح VOF بهره گرفته می‌شود. در ادامه، آثار عدد فرود جریان روی مشخصات میدان بررسی می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه برای اعتبار سنجی نتایج مدل عددی از داده‌های اندازه‌گیری شده در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی برای مدل سرریز اوجی در شرایط قوس محوری استفاده می‌شود. مدل آزمایشگاهی سرریز از نوع اوجی آزاد با پلان قوسی و طول ۸۵ سانتی-متر است که از جنس مصالح ضد آب ساخته شده است. در انتهای مسیر اوجی سرریز، جریان آب وارد یک کانال از نوع شوت می‌شود. طول، ارتفاع و عرض کانال پائین‌دست به-ترتیب برابر با ۱۴۰، ۳۰ و ۱۸ سانتی‌متر است. لازم به ذکر است که کانال شوت شیب‌دار بوده و شیب آن برابر با ۶ درصد است. در بخش ابتدایی کانال پایین‌دست دارای شیب صفر و به طول ۸ سانتی‌متر است. در مدل آزمایشگاهی، دیواره‌های متقارن جانبی سرریز اوجی در چهار حالت مختلف ۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه بررسی شدند. در شکل (۱) مدل آزمایشگاهی سرریز اوجی در شرایط قوس محوری در حالت ۱۲۰ درجه نشان داده شده است.

شکل ۱. مدل آزمایشگاهی الف- دید سه‌بعدی ب- مقطع عرضی

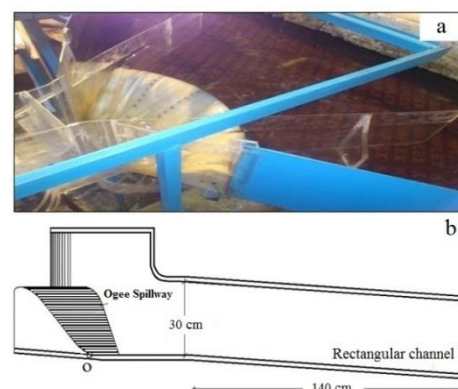


Fig. 1. Experimental model (a) 3D view (b) cross-section view

1 Kronecker delta

2 Turbulent eddy-viscosity

سطح فوقانی میدان جریان توسط شرایط مرزی "تقارن"^۵ معرفی گردید. در شرایط مرزی تقارن اصطکاک و تغییرات زمانی و مکانی کلیه پارامترها برابر صفر است. شرایط مرزی اعمال شده مدل عددی در شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشد.

شکل ۳. شرایط مرزی تعریف شده برای مدل عددی

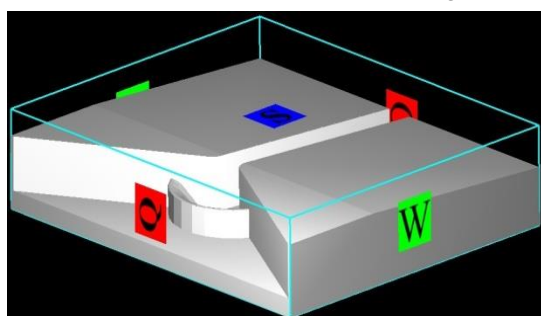


Fig. 3. Boundary conditions defined for numerical model

۲-۲-۴- شبکه‌بندی میدان جریان

یکی از اصلی‌ترین پارامترها که در دقت نتایج مدل عددی اثر گذار است ابعاد و تعداد المان‌های محاسباتی است. برای دست یافتن به بهینه‌ترین مش‌بندی از لحاظ دقت و زمان محاسبات، از روش سعی و خطا در شرایط یکسان استفاده می‌شود. در واقع، در ابتدا میدان جریان توسط تعداد مشخصی المان محاسباتی منفصل شد و بعد از حل و دائمی شدن میدان جریان، نتایج مدل عددی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه و مقدار خطا محاسبه شد. سپس با تکرار این روند تعداد المان‌های محاسباتی افزایش داده شد. علاوه بر این، کل میدان محاسباتی توسط یک بلوک مش یکنواخت متشکل از المان‌های مستطیلی منفصل شده است. در مدل مورد استفاده از چندین نوع مش‌بندی با ابعاد مختلف استفاده شد. نتایج نشان داد با کوچکتر شدن ابعاد المان‌های محاسباتی، دقت مدل عددی افزایش می‌یابد. در شکل (۴) میدان جریان شبکه‌بندی شده برای مدل عددی مورد نظر قابل مشاهده است. در شکل (۵) یک نمونه استقلال از شبکه برای عمق جریان شبیه‌سازی شده (مدل سرریز ۱۲۰ درجه در دبی ۲۲/۶ لیتر بر ثانیه) قابل

صورت سه بعدی ترسیم می‌شود. سپس هندسه تولید شده در قالب یک فایل STL به محیط نرم افزار FLOW-3D وارد شده که فایل مورد نظر با مرزهای جامد تعریف می‌شود. در شکل (۲) هندسه‌های ایجاد شده سرریز اوجی در شرایط قوس محوری برای مدل‌های با زاویه قرارگیری دیواره‌های جانبی صفر، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه قابل مشاهده است.

شکل ۲. مدل‌های سرریز اوجی الف- صفر ب- ۶۰ ج- ۹۰ د- ۱۲۰ درجه

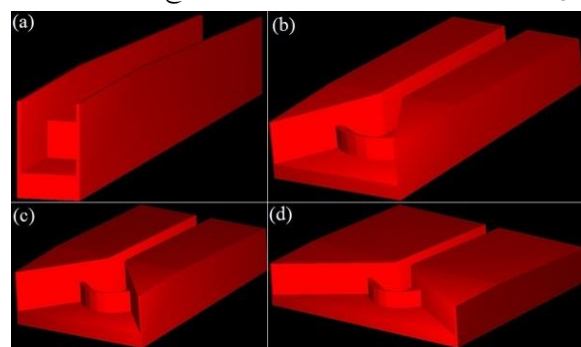
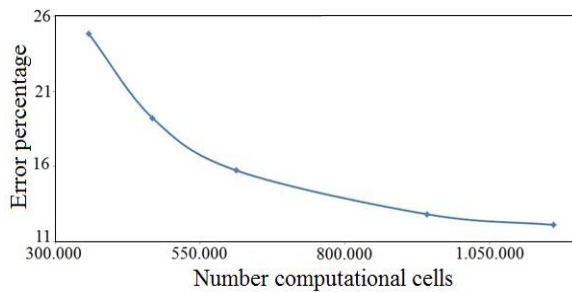


Fig. 2. Ogee spillway models (a) 0° (b) 60° (c) 90° (d) 120°

۲-۲-۳- شرایط مرزی

شرایط مرزی اعمال شده برای مدل عددی به گونه‌ای انتخاب شده که با شرایط فیزیکی مدل آزمایشگاهی هماهنگی داشته باشد. بنابراین با توجه به داشتن دبی و عمق ورودی برای حل معادلات حاکم بر میدان جریان، از مقدار دبی و عمق جریان مشخص در مقطع ورودی مدل عددی استفاده شد. این شرایط مرزی در نرم‌افزار FLOW-3D معادل شرط مرزی "نرخ جریان حجمی"^۱ است. با توجه به اینکه در شرایط آزمایشگاهی، عمق پائین‌دست کانال اصلی مشخص نیست، بنابراین در شبیه‌سازی حاضر از شرایط مرزی "خروجی"^۲ استفاده شد. در این شرایط مرزی نیازی به اعمال پارامتر هیدرولیکی خاصی نیست. همچنین کلیه مرزهای جامد به عنوان شرایط مرزی "دیواره"^۳ تعریف شد. در شرایط مرزی دیواره، شرط عدم لغزش^۴ تحمیل شده و اصطکاک ناچیز در نظر گرفته می‌شود، بنابراین در مرز دیواره هیچ زبری اعمال نشد. کل

- 1 Volume Flow Rate
- 2 Outflow
- 3 Wall
- 4 No-slip

شکل ۵. نتایج استقلال از شبکه برای قوس 120° و دبی 22.6 L/s Fig. 5. Grid independence results for arch 120° and $Q=22.6 \text{ L/s}$

جدول ۱. مشخصات شبکه بندی مدل های عددی

Ogee Spillway models	x	y	Z
120°	135	155	45
90°	135	155	45
60°	135	100	45
0°	135	90	45

Table 1. Meshing characteristics for numerical models

۲-۵- مدل آشفتگی

در ادامه، تاثیر مدل های آشفتگی روی نتایج عددی مورد بررسی قرار می گیرد. در شکل (۶) نتایج شبیه سازی عددی در پیش بینی عمق جریان در حالت 120° درجه و دبی 22.6 L/s بر ثانیه و حساسیت آن نسبت به دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و $\text{RNG } k-\varepsilon$ استاندارد نشان داده شده است. در این شکل محور قائم عمق جریان و محور افقی جهت طولی کانال مستطیلی پایین دست را نشان می دهند. همچنین در جدول (۲) مقادیر خطای محاسبه شده برای این دو مدل آشفتگی نشان داده شده است. بر اساس نتایج شبیه سازی ها و با توجه به جدول (۲)، هر چند که دقت هر دو مدل آشفتگی تقریباً برابر است اما مدل آشفتگی $\text{RNG } k-\varepsilon$ عمق جریان را نسبت به مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد با دقت بیشتری پیش بینی کرده است.

شکل ۶. تاثیر مدل های آشفتگی بر سطح آزاد شبیه سازی شده

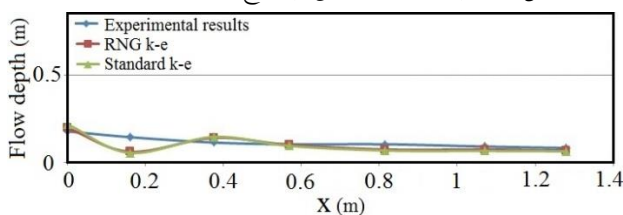


Fig. 6. Effects of turbulence models on simulated free surface

مشاهده است. در این شکل محور افقی نشان دهنده تعداد المان های محاسباتی در طی روند سعی و خطا است و در مقابل محور قائم نیز مقدار خطای بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در مراحل مختلف را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش تعداد المان های محاسباتی، بیشینه خطای محاسباتی کاهش می یابد. در مرحله آخر، بهینه ترین مش بندی از لحاظ زمان محاسباتی و دقت مدل سازی انتخاب شد (جدول ۱).

شکل ۴. شبکه بندی میدان جریان

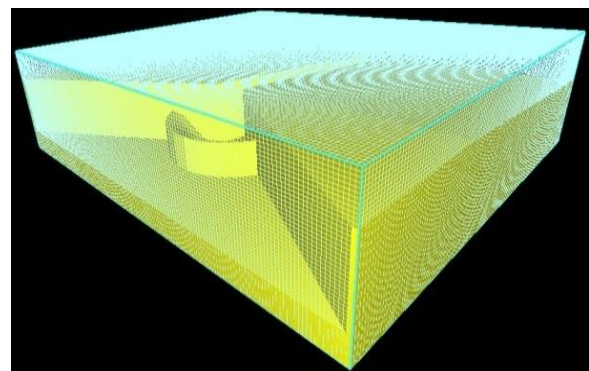


Fig. 4. The flow field grid

در جدول (۱) تعداد المان های محاسباتی در راستاهای X, Y, Z (طولی، عرضی و قائم) برای مدل های عددی سرریز اوجی در شرایط قوس محوری مرتب شده است. به عنوان نمونه مدل سرریز اوجی 120° درجه در شرایط قوس محوری با تعداد 941625 سلول محاسباتی شبکه بندی شد و مدل سرریز 90° درجه نیز با همین تعداد مش منفصل شد. همچنین سرریزهای اوجی 60° و صفر درجه به ترتیب با 607500 و 546750 سلول محاسباتی، منفصل شدند. به منظور بررسی دقت مدل عددی در پیش بینی نتایج آزمایشگاهی، مقدار درصد خطای نسبی (REP) با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شده است:

$$REP = 100 \times \left| \frac{R_{EXP} - R_{NUM}}{R_{NUM}} \right| \quad (4)$$

در اینجا R_{EXP} و R_{NUM} به ترتیب معادل نتایج آزمایشگاهی و عددی است.

جدول ۲. تاثیرات مدل‌های آشفتگی برای قوس 120° و دبی 22.6 L/s

Turbulence models	Average error %	Maximum error %	Minimum error %
RNG $k - \varepsilon$	12.8	20.4	5.2
Standard $k - \varepsilon$	14.7	22.7	6.7

Table 2. Effects of the turbulence models for arch 120° and $Q=22.6 \text{ L/s}$

۲-۲-۶- درستی آزمایشی

در این بخش از مطالعه عددی، نتایج شبیه‌سازی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه می‌شود و دقت مدل عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور نیمرخ‌های سطح آزاد جریان برای سه مدل سرریز اوجی در شرایط قوس محوری 120° ، 90° و 60° درجه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در شکل (۷-الف) نتایج مدل‌سازی عددی سرریز اوجی در شرایط قوس محوری 120° درجه و دبی 22.6 L/s لیتر بر ثانیه با مقادیر آزمایشگاهی قابل مشاهده است. در این شکل محور قائم عمق جریان و محور افقی جهت طولی کانال مستطیلی است. همان گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود مدل عددی مقادیر آزمایشگاهی را برای حالت 120° درجه با دقت مناسبی پیش‌بینی نموده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هماهنگی نتایج عددی در فاصله 0.4 به بعد بیشتر از سایر نواحی است. مقایسه پروفیل سطح آزاد جریان شبیه‌سازی شده واقع بر محور مرکزی سرریز اوجی در شرایط قوس محوری برای مدل 90° درجه و دبی 34 L/s لیتر بر ثانیه با نتایج آزمایشگاهی در شکل (۷-ب) به تصویر کشیده شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، مدل عددی سطح آزاد آب را در شرایطی که قوس محوری 90° درجه باشد نیز با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نموده است. با توجه به شکل (۷-ب)، مدل عددی تغییرات سطح آزاد جریان در فاصله 0.6 به بعد را با دقت بیشتری پیش‌بینی کرده و در مقابل در فاصله 0.2 تا 0.6 بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، اختلاف محسوسی مشاهده می‌شود. (شکل ۷-ج) نتایج مدل عددی را در شرایط قوس محوری 60° درجه برای دبی 34 L/s لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل عددی تغییرات سطح آزاد جریان در شرایط قوس محوری 60°

را نیز به خوبی مدل‌سازی کرده است. همچنین برای سرریز اوجی در شرایط قوس محوری 60° درجه، تغییرات سطح آزاد از ابتدای سرریز تا فاصله 0.2 با مقادیر آزمایشگاهی اختلاف دارد اما با پیشروی به سمت پائین‌دست، این اختلاف کاهش می‌یابد و نتایج عددی و آزمایشگاهی از انطباق بیشتری برخوردار هستند. همچنین مقادیر REP پروفیل‌های سطح آزاد جریان برای مدل 120° درجه با دبی 22.6 L/s لیتر بر ثانیه، 90° درجه با دبی 34 L/s لیتر بر ثانیه و 60° درجه با دبی 34 L/s لیتر بر ثانیه توسط رابطه مذکور محاسبه و در جدول (۳) مرتب شده است.

شکل ۷. مقایسه سطح آزاد آزمایشگاهی و مدل عددی الف- قوس 120° و دبی 22.6 L/s ب- قوس 90° و دبی 34 L/s ج- قوس 60° و دبی 34 L/s

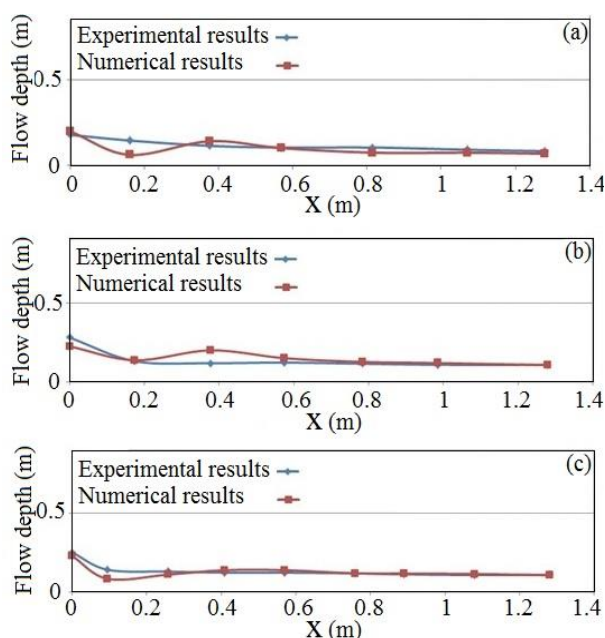


Fig. 7. Comparison between experimental and numerical results for (a) 120° and $Q=22.6 \text{ L/s}$ (b) 90° and $Q=34 \text{ L/s}$ (c) 60° and $Q=34 \text{ L/s}$

جدول ۳. مقادیر خطای سطح آزاد شبیه‌سازی شده برای مدل‌های مختلف

Models	Average error %	Maximum error %	Minimum error %
120° and Q=22.6 L/s	12.83	20.41	5.25
90° and Q=34 L/s	13.60	18.90	8.30
60° and Q=34 L/s	3.48	4.56	2.40

Table 3. Error values of simulated free surface for different models

۳- نتایج و بحث

۱-۳- تغییرات سطح آزاد

در شکل (۸) تغییرات سه بعدی سطح آزاد جریان برای مدل‌های مختلف سرریز اوجی در شرایط قوس محوری به تصویر کشیده شده است. با عبور جریان از روی بدنه سرریز یک رژیم فوق‌بحرانی تشکیل می‌شود که در شرایط مذکور به علت همگرایی جریان در قسمت پائین‌دست سرریز، یک موج سطحی در هنگام عبور جریان از روی سرریز به وجود می‌آید. به این موج سطحی پدیده دم خروسی^۱ گفته می‌شود. در محل تشکیل پدیده دم خروسی عمق جریان به شکل قابل مقایسه‌ای افزایش می‌یابد و سطح آب دچار انحنای می‌شود. در این مطالعه نیز پدیده مذکور تشکیل شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه همگرایی دیواره‌های جانبی، پدیده دم خروسی به صورت کامل تشکیل شده و در مقابل با کاهش زاویه مذکور شدت این پدیده کمتر می‌شود. به گونه‌ای که پدیده دم خروسی در حالت ۱۲۰ درجه کاملاً توسعه یافته و در حالت صفر درجه کاملاً حذف شده است. در واقع، با کاهش زاویه همگرایی، عمق جریان در کانال پائین‌دست به سمت تاج سرریز اوجی حرکت می‌کند و پدیده مذکور ناپدید می‌شود. بر اساس نتایج مدل‌سازی‌ها، با کاهش زاویه همگرایی سرریز اوجی، سطح آب در کانال پائین‌دست افزایش می‌یابد، در واقع بیشترین سطح آب مربوط به مدل سرریز اوجی در وضعیت صفر و ۶۰ درجه است و کمترین تراز آب برای مدل سرریز اوجی در شرایط قوس محوری با زاویه ۱۲۰ درجه پیش‌بینی شده است. در این مطالعه، عدد فروود جریان در انتهای سرریز

اوجی به عنوان عدد فروود جریان در پای سرریز معرفی می‌شود (شکل ۱ نقطه O). در ادامه آثار عدد فروود جریان در پای سرریز اوجی بر روی تغییرات سه بعدی سطح آزاد و پدیده دم خروسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۹) تغییرات سه بعدی سطح آزاد جریان مدل سرریز اوجی ۱۲۰ درجه برای عددهای فروود مختلف نشان داده شده است. همچنین تغییرات دو بعدی سطح آزاد جریان واقع بر محور مرکزی مدل مذکور در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. دلیل انتخاب مدل سرریز اوجی با دیواره‌های جانبی ۱۲۰ درجه این است که پدیده دم خروسی در این مدل به صورت کامل تشکیل شده است. بر اساس نتایج مدل‌سازی، از پای سرریز اوجی تا بیشینه ارتفاع آب در محل پدیده دم خروسی، عمق جریان با افزایش همراه شد و از این نقطه تا پایین‌دست کانال مستطیلی، عمق جریان کاهش یافت. با توجه به شکل (۱۰)، با افزایش عدد فروود جریان در پای سرریز، ارتفاع پدیده دم خروسی کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که ارتفاع آن در مدل با عدد فروود ۲/۰۱۳ کمتر از مدل با عدد فروود ۱/۳۷۸ پیش‌بینی شده است.

به طور کلی با کاهش زاویه همگرایی، سرریز دچار استغراق کامل می‌شود و عملکرد هیدرولیکی خود را از دست می‌دهد و همچنین جریان در کانال به صورت یکنواخت در می‌آید. پروفیل سطح آب در اثر افزایش زاویه افزایش می‌یابد که این افزایش در ارتفاع پدیده دم خروسی ملموس‌تر است. به بیان دیگر، افزایش میزان زاویه همگرایی و تغییر شرایط جریان در ابتدای کانال منجر به افزایش ارتفاع سطح آب در جریان دم خروسی می‌شود.

شکل ۸. تغییرات سه بعدی سطح آزاد جریان الف- صفر ب- ۶۰ ج- ۹۰ د- ۱۲۰ درجه

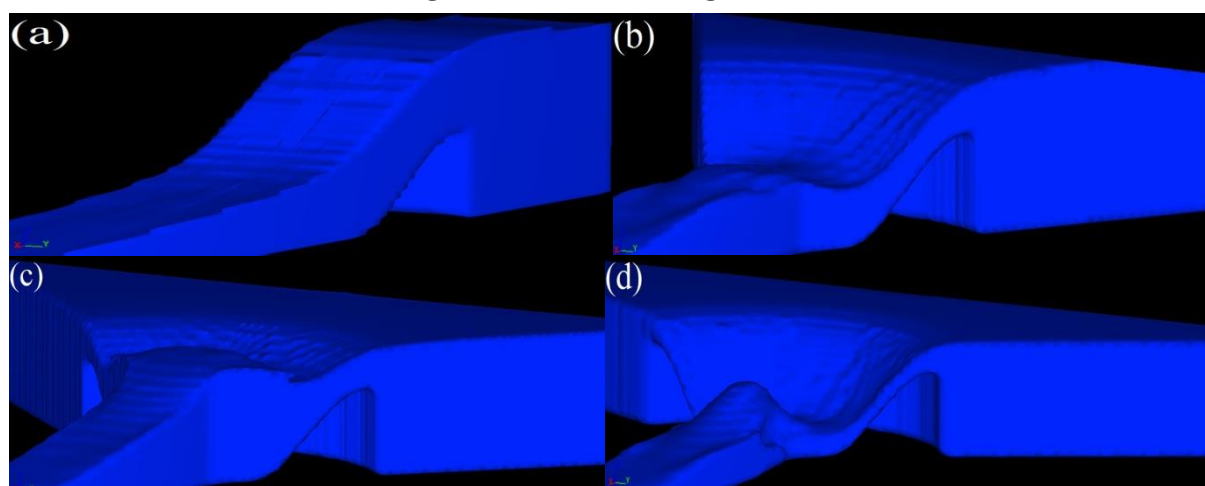


Fig. 8. 3D variation of free surface flow (a) 0° (b) 60° (c) 90° (d) 120°

صورت پس فرض در محلی که جزء حجمی معادله (۳) برابر ۰/۵ بدست می‌آید، مرز آب و هوا را ترسیم می‌کند. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش طول هر بردار مقدار سرعت با افزایش همراه است. همچنین بزرگای بردارهای سرعت روی بدنه سرریز اوجی در شرایط قوس محوری بیشتر از سایر نواحی است. همچنین اختلاط آب و هوا در ناحیه مذکور بیشتر از سایر مناطق موجود در مدل عددی است.

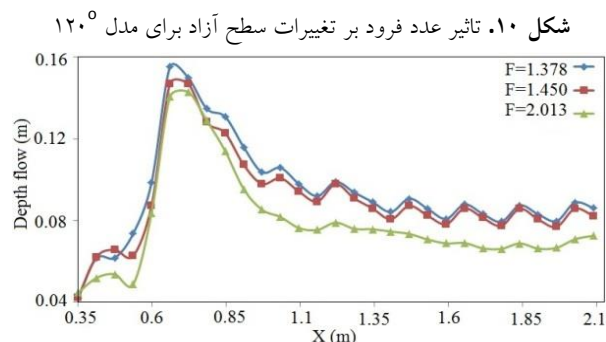


Fig. 10. Effects of Froude number on free surface variation for model 120°

۳-۳- ضریب دبی

در ادامه تغییرات ضریب دبی سرریز اوجی در شرایط قوس محوری برای مدل‌های مختلف، بررسی می‌شود. برای محاسبه ضریب دبی از رابطه (۵) که توسط USBR برای سرریزهای اوجی ارائه شده استفاده می‌شود:

$$C_d = \frac{Q}{L_e \sqrt{2g H_d^{3/2}}} \quad (5)$$

شکل (۹) تاثیر عدد فرود بر تغییرات سطح آزاد الف- عدد فرود ۲/۰۱۳

ب- عدد فرود ۱/۴۵۰ ج- عدد فرود ۱/۳۷۸

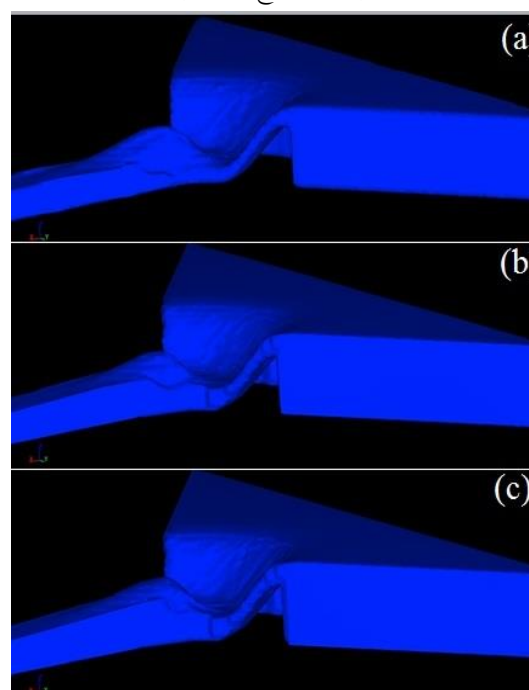


Fig. 9- Effects of Froude number on free surface variation (a) F=2.013 (b) F=1.450 (c) F=1.378

۲-۳- بردارهای سرعت

در شکل (۱۱) بردارهای سرعت و چگونگی اختلاط آب و هوا در مجاورت بدنه سرریزهای اوجی به تصویر کشیده شده است. محل اختلاط آب و هوا در بالاترین بخش آب و پائین ترین فاز هوا قابل مشاهده است، که نرم افزار FLOW-3D به

شکل ۱۰. تغییرات بردارهای سرعت بر روی سرریز الف- صفر ب- ۶۰ ج- ۹۰ د- ۱۲۰ درجه

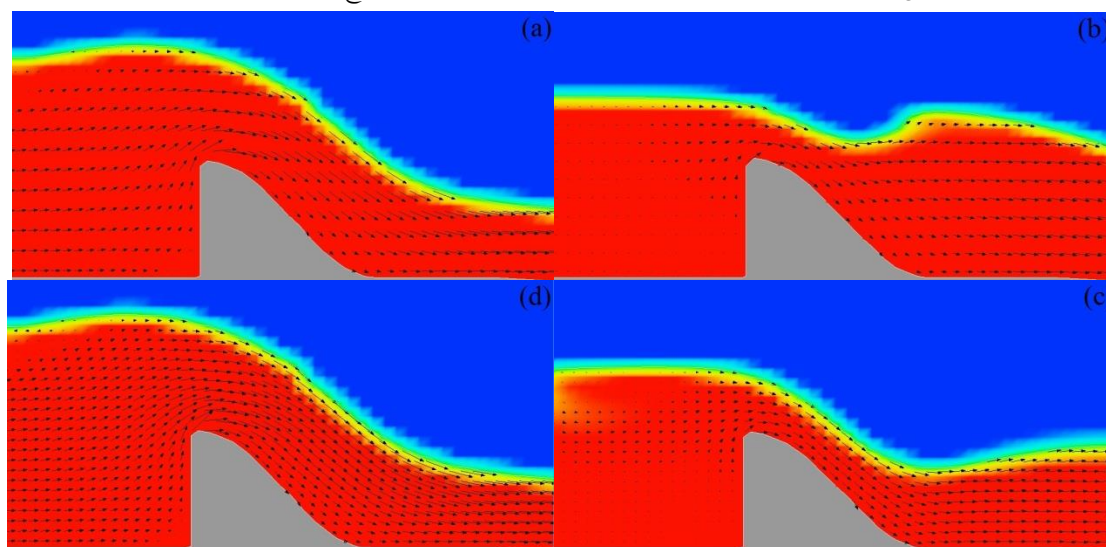


Fig. 9. Variations of velocity vectors over spillway (a) 0° (b) 60° (c) 90° (d) 120°

در مطالعه حاضر با استفاده از نرم افزار FLOW-3D، الگو و میدان جریان عبوری از روی سرریزهای اوجی در شرایط قوس محوری شبیه‌سازی عددی شد. برای شبیه‌سازی آشفتگی میدان جریان از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG $k-\epsilon$ و برای بازسازی تغییرات سطح آزاد جریان از طرح VOF استفاده گردید. مقدار درصد خطای متوسط نتایج پیش-بینی شده به وسیله مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG $k-\epsilon$ به ترتیب برابر ۱۴/۷ و ۱۲/۸ درصد بدست آمد که حاکی از دقت بالاتر مدل آشفتگی RNG $k-\epsilon$ در مقایسه با دیگر مدل آشفتگی است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، مدل عددی از دقت مناسبی برخوردار بود به گونه‌ای که مقدار درصد خطای متوسط برای مدل‌های سرریز اوجی در شرایط قوس محوری ۱۲۰ درجه با دبی ۲۲/۶ لیتر بر ثانیه برابر ۱۲/۸۳ درصد، ۹۰ درجه با دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه مساوی ۱۳/۶۰ و برای مدل ۶۰ درجه با دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه مساوی ۳/۴۸ محاسبه شد. همچنین با افزایش زاویه همگرایی دیواره‌های جانبی، پدیده موسوم به دم خروسی تشکیل شد و با کاهش زاویه مذکور این پدیده کاملاً حذف گردید. علاوه بر این، با افزایش عدد فرود، ارتفاع پدیده دم خروسی کاهش یافت.

References

[1] Tullis, B.P. Behavior of submerged ogee crest weir

در اینجا H_d و g ، L_e ، Q ، C_d به ترتیب برابر ضریب دبی، دبی جریان، طول موثر سرریز، شتاب ثقل و هد جریان رو سرریز است. مشخصات هیدرولیکی جریان روی تاج سرریز اوجی برای مدل‌های مختلف در جدول (۴) مرتب شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش زاویه قوس محوری، مقدار عدد فرود روی تاج سرریز با کاهش همراه است. بزرگترین عدد فرود برای مدل ۱۲۰ درجه و کوچکترین عدد فرود نیز برای مدل ۹۰ درجه محاسبه شد. همچنین عشرتی و همکاران نشان دادند که عامل قوس محوری باعث افزایش ضریب دبی و به تبع آن افزایش کارایی سرریز می‌شود [10].

جدول ۴. ضریب دبی برای مدل‌های مختلف

Model	$Fr (-)$	$L_e (m)$	$H_e (m)$	$C_d (-)$
120°	0.913	0.830	0.077	0.285
90°	0.911	0.75	0.142	0.191
60°	0.986	0.610	0.134	0.256
0°	1/133	0.180	0.280	0.283

Table 4. Discharge coefficient for different models

۴- نتیجه گیری کلی

سرریز اوجی به دلیل شرایط هیدرولیکی مناسب یکی از پرکاربردترین انواع سرریزها است که در سدهای با محور مستقیم استفاده می‌شود. در مقابل، به دلیل شرایط توپوگرافی منطقه، گاهی مجبور به ساخت سد با محور قوس‌دار می‌شویم.

۵- مراجع

- [6] Chatila, J., Tabbara, M. 2004. Computational modeling of flow over an ogee spillway. Computers and structures, 82(22):1805-1812.
- [7] Sabbagh Yazdi, Shamloo H., Rostami F. The application of FLOW-3D software to investigate the turbulence of 3D flow simulation in a jumper jet with concrete obstacles, 2008. Technology and Education Journal, Vol. 4, Vol. 4, pp. 237-248.
- [8] Zandi Guohrazi F, Aghdari Moghaddam. Investigation of changes in the cavitation index in Ogee overflow using CFX model, 2010. 5th National Congress of Civil Engineering, Mashhad, Ferdowsi University of Mashhad.
- [9] FLOW 3D User's Manual. 2011. Version 10.0. Flow Science Inc
- [10] Eshrati Tou, Baptism of the First, Sanei, Imadi, AS. Laboratory study of hydraulic performance of Ogee overflow and downstream channel in axial conditions, Vol. 29, No. 4. Pages 874-885
- discharge coefficients. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2011, 137(10):677-681.
- [2] Kumar, S., Ahmad, Z., Mansoor, T., Himanshu, S.K. Discharge Characteristics of Sharp Crested Weir of Curved Plan-form. Research Journal of Engineering Sciences, 2012, 1(4):16-20.
- [3] Sheikh Kazemi, Eshrati T, Azhdari Moghadam, Fazl Oli R. Determination of peak flow profile in axial conditions. 1392 Seventh National Congress on Civil Engineering. Zahedan.
- [4] Olsen, N.B.R., Kjellesvig, H.M. Three-Dimensional numerical flow modeling for estimation of spillway capacity. Journal of Hydraulic Research, 1998, 36(5):775-784.
- [5] Savage, B.M., Johnson, M.C. Flow over ogee spillway: physical and numerical model case study, USA, Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(8): 640-649.

Effects of side walls and Froude number on flow field over ogee spillway in axial arc condition

Seyed Eshagh Oftad^{1*}, Cyrus Ershadi², Mojtaba Saneie³

1- M.Sc. student, Dept., of Civil Eng., Azad University, Bandar Abas

2- Assistant Prof., Dept., of Civil Eng., hormozgan University , Bandar Abas

3- Associate Professor of Hydraulic Structures, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran

* sehagh_1357@yahoo.com

Abstract:

Generally, spillways are provided for the storage to release excess flood water, which cannot be contained in the allotted storage space. Also, spillway weirs are used to bypass the flow released into the system like irrigation canals, power canals, feeder canals, link canals, etc. In general, the excess flow is drawn from the top of the pool created by the dam and conveyed through a non-natural waterway, that is, a spillway, back into the same river or some other drainage channel. Due to the topography of the study area, sometimes we have to build the dam with axis arch; therefore if you use a ogee spillway in such cases, the conditions flow will change and because of this, in the dam upstream with central arc structural and hydraulic conditions are more suitable. In this study, the flow field over the ogee spillways in axial arc condition was simulated using FLOW-3D software. In the FLOW-3D model, the Navier-Stokes and continuity equations were discretized using the finite difference method. Also, the computational domain was divided into a mesh of rectangular cells. All variables (except for velocity values) were placed at the center of the computational cells (staggered grid arrangement). To solve the governing equations, control volumes were defined around each dependent variable. The surface fluxes, body forces and surface stresses were computed in terms of surrounding variables. Most terms in the governing equations were explicitly evaluated. To solve the flow field of a non-compressible fluid, the continuity and the Navier-Stokes equations were solved. On the other hand, to validate the numerical results, the experimental measurements that were performed in Soil Conservation and Watershed Management Research Institute at reservoir with dimensions 1.4 m length, 0.30 m width and 0.18 m height. The experimental model was made of plexiglas plates which was a model of prototype at the scale of 1:75. Moreover, to measure the flow discharge, a sharp triangular weir with apex angle of 90° in the output of channel was used. For numerical model, the flow field turbulence was modeled using the $k - \varepsilon$ standard and the RNG $k - \varepsilon$ turbulence model. According to numerical model results, the $k - \varepsilon$ RNG turbulence model had more accuracy than the $k - \varepsilon$ standard turbulence model. Also, variations of flow free surface reconstructed using volume of fluid (VOF) scheme. Then, the effects of the side symmetrical walls of ogee spillway were examined for models 60°, 90° and 120° in discharges 34, 34 and 22.6 lit/s, respectively. The applied boundary conditions were chosen according to the physical model. Therefore, the depth and discharge specific values were chosen for inlet boundary condition. At the outlet boundary condition, the outlet boundary condition was used. All the solid walls of the model were defined as the "Wall" boundary condition. Also, a symmetry plane was defined at the top layer of the computation field. According to numerical results, the acceptable agreement was obtained between numerical results and experimental measurements. For example, the relative error percent of longitudinal profiles of flow free surface were computed 12.83, 13.60 and 3.48 percentage for cases 120°, 90° and 60°, respectively. Also with increasing angle of axial arc, the height of rooster tail increased significantly. In addition, by increasing Froude number, the height of rooster tail reduced.

Keywords: Ogee spillway, Axis arch, Numerical simulation, FLOW-3D.