

بررسی عددی هندسه دیوارهای هدایت در جریان ورودی به سرریز سد (مطالعه موردی سد کارون ۳)

مهری صادقی^۱، سید تقی امید نائینی^۲، فؤاد کیلانتهئی^۱ و مجید گلوئی^{۱*}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۳۰)

چکیده

یکی از اجزا مهم در هیدرولیک سدها، سرریزها هستند. مبنای طراحی سرریزهای اوجی، پروفیل زیرین جریان عبوری از سرریز لبه تیز است. چنانچه پروفیل سرریز اوجی در حالت دبی حداکثر از پروفیل زیرین جریان عبوری از سرریز لبه تیز تبعیت نماید، فشار وارده به کف سرریز برابر با صفر می شود. بنابراین، در این مقاله به طراحی سرریز اوجی براساس پروفیل زیرین جریان عبوری از سرریز لبه تیز مستطیلی حاصل از شبیه سازی عددی در حالت دو بعدی قائم و سه بعدی و مقایسه آن با پروفیل استاندارد سرریز اوجی پرداخته شده است. نتایج نشان داد که پروفیل استاندارد سرریز اوجی و پروفیل زیرین به دست آمده از حالت دو بعدی کاملاً بر یکدیگر منطبق شدند ولی در مقایسه با پروفیل سه بعدی تفاوت هایی مشاهده شد، که این مهم به عدم در نظر گرفتن دیوار هدایت ها در داخل مخزن سد مرتبط بود. با توجه به تحلیل ها، در صورتی که جریان ورودی به سرریز به صورت موازی با محور آن باشد پروفیل زیرین سرریز لبه تیز در تطابق کامل با پروفیل استاندارد خواهد بود. از آنجا که هندسه دیوار هدایت سرریزها معمولاً بوسیله ساخت مدل فیزیکی در آزمایشگاه بوده و این عمل نیز اغلب بصورت سعی و خطا و با هزینه زیاد انجام می شود، در این مقاله بر اساس مطالعه موردی سرریز سد کارون ۳، سعی شده است با استفاده از مدل سازی عددی نزدیکترین هندسه به هندسه دیوار هدایت سرریز که کمترین اختلاف را در سرعت های عرضی ایجاد نماید، به دست آید. این روش باعث خواهد شد تا روند طراحی و مدل سازی فیزیکی سرریز نیز از نظر زمانی و اقتصادی بهینه تر و سریعتر انجام شود.

واژه های کلیدی: سرریز اوجی، پروفیل استاندارد، سرریز لبه تیز، دیوار هدایت، شبیه سازی عددی

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲. دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: galavi@eng.ikiu.ac.ir

مقدمه

سرریز اوجی یکی از معمول‌ترین انواع سرریزها است. این سازه به‌طور معمول شامل سه بخش شیب دیواره بالادست، ناحیه انحنا دار محدب اوجی و پنجه پروفیل است. نمایی از هندسه سرریز اوجی در شکل ۱ نشان داده شده است. کارایی سرریز اوجی تابع هد جریان، نحوه اتصال دیواره بالادست به سرریز اوجی و ارتفاع تاج سرریز از کف است.

اولسین و جلسویگ (۱۵)، به بررسی معادلات رینولدز میانگین‌گیری شده در زمان (RANS) و نیز معادلات K-e استاندارد به روش حجم محدود جریان عبوری از روی سرریز به صورت دوبعدی و سه‌بعدی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که اثر الگوی پخش در تعیین ضریب دبی سرریز بسیار کم و ناچیز است.

بورگسیر و روشمن (۵) به مطالعه جریان دوبعدی قائم بر روی تاج سرریز به روش المان محدود با فرض جریان تراکم‌ناپذیر و آشفتنه پرداختند. تعیین ضریب دبی سرریز و نحوه توزیع فشار با نتایج تجربی در این پژوهش بسیار نزدیک بوده است. آنان برای به دست آوردن سطح آزاد جریان آب، سطح آزاد جریانی که به وسیله مدل آزمایشگاهی به دست آمده بود را مدل کردند و سپس میدان جریان را حل کردند و به این نتیجه رسیدند که چنانچه سطح مرزی سطح آزاد آب در سلول مدنظر ارضا نشود، جریان در راستای قائم جابه‌جا خواهد شد.

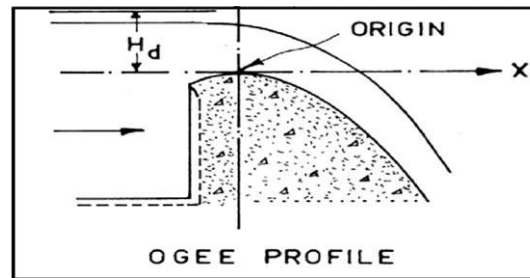
حیدری (۱۰) در نرم افزار FLUENT به شبیه‌سازی میدان جریان عبوری از روی سرریز اوجی و به بررسی اثرات تغییر هندسه و بلندای آب بالادست سرریز بر میدان جریان و توزیع فشار روی تاج سرریز پرداخته است. در بحث آشفتگی نیز به تأثیر مدل‌های مختلف K-E پرداخته است. نتایج نشان داد که مدل‌های Realizable و RNG نتایج نزدیک‌تری به داده‌های آزمایشگاهی و عددی در توزیع فشار روی سطح سرریز نسبت به مدل استاندارد دارند. در بحث تغییر هندسه سرریز، با استفاده از مدل‌های استاندارد بیان شده است که این موضوع باعث تغییر در توزیع فشار روی سطح سرریز و دبی عبوری از سرریز می

شود که می‌توان از این نتیجه در کاهش هزینه سرریز و افزایش ظرفیت سرریز استفاده نمود. نتایج نشان داد توزیع فشار و دبی عبوری از روی سرریز با نتایج آزمایشگاهی USBR مطابقت دارد.

جانسون و سویچ (۹) به مقایسه مدل عددی و فیزیکی جریان روی سرریز اوجی با در نظر گرفتن پایاب پرداختند. آنها در این پژوهش دریافتند که نیمرخ سطح آب و ضرایب دبی برای مدل آزمایشگاهی، وابسته به هد آب موجود بر روی سرریز است.

فرودی خور و همکاران (۷) به بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریز اوجی با قوس در پلان و دیواره متقارب پرداخته است. در این مقاله به مدل فیزیکی سرریز سد گرمی‌چای که از نوع اوجی با قوس در پلان و دیواره‌های متقارب به سمت پایین است، به‌طوری که طول مؤثر خود را از تاج تا پنجه چند برابر کاهش می‌دهد پرداخته شده است. این آزمایش‌ها در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری انجام شده است. در این مرحله مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۵۰ از طرح نمونه واقعی مورد آزمایش قرار گرفته است. مدل سرریز با استفاده از جنس پلی اتیلن که ضد آب است ساخته شده است و برای ساخت دیواره‌ها و کانال از پلکسی کلاس استفاده شده است. آزمایش‌ها به‌ازای ۸ دبی مختلف شامل مقادیر ۲۵٪ تا ۱۵۰٪ دبی طراحی، معادل نمونه واقعی در طبیعت انجام شده است. نتایج نشان داد که سرریز عملکرد مناسبی را تا دبی طراحی داشته است. به تدریج با افزوده شدن دبی، کارایی سرریز کاهش پیدا کرده است، به گونه‌ای که سرریز به‌طور کامل مستغرق شد و کانال پایین‌دست کنترل‌کننده دبی عبوری شد. با افزایش دبی، فشار در تاج کاهش و در شوت و پنجه در حال افزایش گزارش شده است. به‌ازای دبی‌های بالاتر و مستغرق شدن سرریز با تغییر رژیم جریان روی سرریز از فوق بحرانی به زیر بحرانی فشار افزوده شده است.

عشرتی و فضل اول (۶) به بررسی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی سرریز اوجی و کانال پایین‌دست در شرایط قوس



شکل ۱. پروفیل جریان عبوری از سرریز اوجی (۱۴)

جریان مانند نحوه توزیع سرعت متوسط، فشار متوسط کف و عمق متوسط جریان و همچنین احتمال وقوع کاویتاسیون پرداخته شده است. برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از تحلیل عددی، از نتایج آزمایشگاهی مدل هیدرولیکی سرریز استفاده شده است. نتایج حاکی از افزایش سرعت متوسط و عمق متوسط جریان با افزایش جمع شدگی دیواره‌های سرریز است. همچنین موقعیت کمینه عمق جریان روی سرریز با افزایش جمع شدگی دیواره‌ها به تاج سرریز نزدیک‌تر شده است. جمع شدگی دیواره‌ها باعث ایجاد دو دسته موج‌های ثانویه در کناره‌ها و محور سرریز شد که منجر به افزایش آشفتگی در جریان و افزایش ارتفاع دیواره‌های سرریز شده است. نتایج نشان داد با افزایش زاویه همگرایی، عدد فرود در طول مسیر جریان کاهش یافته است. با بررسی مقادیر فشار مشخص شد که به علت بالآمدن عمق جریان در امتداد دیواره‌ها، فشار نیز در نزدیک دیواره‌های شوت افزایش یافته است. همچنین، 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 است.

فولادگر (۸) با تحلیل جریان دوبعدی روی سرریز اوجی استاندارد با روش عددی و با استفاده از نرم افزار FLUENT از سه مدل آشفتگی جهت صحت‌سنجی استفاده کرد که مدل آشفتگی RNG مناسب‌ترین مدل شناخته شد. برای نشان دادن تغییرات دبی، عمق و سرعت جریان از منحنی‌های بی‌بعد به ازای هدهای مختلف استفاده شده است. مقایسه دبی به دست آمده از تحلیل عددی با منحنی مؤسسه WES و مقایسه سرعت

محوری پرداخته است. در این پژوهش یک مدل فیزیکی از سرریز سد که از نوع اوجی آزاد با پلان قوسی است، مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنین، به منظور بررسی اثر انحنای سرریز بر عملکرد جریان، مدل دوم سرریز در شکل نرمال و با شرایط هندسی و هیدرولیکی مشابه، مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج مربوط به مدل اول نشان داد که با افزایش نسبت هد جریان به هد طراحی ضریب دبی سرریز تا مقدار $72/1$ افزایش یافته و پس از آن استغراق سرریز رخ داده و ضریب دبی تا مقدار $23/1$ کاهش یافته است. همچنین، با افزایش سرعت در هر دبی و کاهش فشار در طول سرریز، امکان خلأزایی و خوردگی سازه افزایش و ضریب خوردگی که معرف آن شاخص خلأزایی است، کاهش یافته است. بررسی نتایج مربوط به کارایی سرریز نشان داد برای مدل سرریز در شکل نرمال، استغراق سریعتر و به‌ازای مقادیر دبی یکسان با سرریز قوسی، مقدار ضریب دبی برای سرریز در شکل نرمال، کمتر است. در این پژوهش میزان تأثیر افزایش ضریب دبی در سرریز با قوس محوری در مقایسه با سرریز با تاج مستقیم و در شرایط هیدرولیکی و هندسی مشابه، برابر ۲۱ درصد محاسبه شده است.

ابراهیم نژادیان و همکاران (۱۱) به بررسی عددی اثر همگرایی دیواره‌های سرریز روی مشخصات هیدرولیکی جریان در سرریز سد و احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون پرداخته است. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار Flow3D، مدل آشفتگی و روش حجم محدود به شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز همگرا سد گاوشان پرداخته شده است و سپس به تأثیر همگرایی دیواره‌های سرریز سد گاوشان تحت زوایای مختلف همگرایی شامل ۰، ۱، ۲، ۵/۲ و ۳ درجه بر مشخصه‌های هیدرولیکی

کمک شبیه‌سازی عددی، با استفاده از نرم افزار FLOW3D پرداخت و همچنین به بررسی تأثیرات قرار گرفتن پایه‌های پل روی سرریز و تأثیر تغییر در پارامترهای هندسی این پایه‌ها بر الگو و مشخصات جریان عبوری از روی سرریز پرداخت. در این پژوهش که با بررسی ۸ نمونه پایه پل با هندسه‌های متفاوت روی سرریز انجام شد و نتایج آن را با حالت بدون پایه پل مقایسه شد، به این نتیجه رسید که پروفیل سطح آزاد جریان در مدل‌های همراه با پایه نسبت به مدل بدون پایه دچار افت شده است و تغییر در هندسه پایه‌ها، تغییرات چندانی در پروفیل سطح آزاد جریان ایجاد نمی‌کند.

ستاری (۱۷) به بررسی عددی پروفیل سطح آب، توزیع فشار و سرعت در سرریز اوجی شکل، با استفاده از نرم افزار FLUENT پرداخت، که هدف این پژوهش شبیه‌سازی عددی رفتار جریان سیال روی سرریز اوجی و مقایسه نتایج به دست آمده با داده‌های اندازه‌گیری شده رابطه استاندارد USBR بود. نتایج پژوهش نشان داد که مقادیر سطح آب از مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی موجود و مدل فیزیکی ساخته شده کاملاً منطبق است. در این پژوهش همچنین با شبیه‌سازی فشار هیدرواستاتیک در بعضی مقاطع فشار منفی مشاهده شد.

در پژوهش کاوه‌نسب (۱۳) به بررسی تأثیر خصوصیات وجه بالادست بر ضریب دبی سرریز لبه پهن و اوجی پرداخته شد. تغییرات ضریب تخلیه جریان در حالت آزاد و مستغرق، پروفیل سطح آب در طول تاج سرریز، موقعیت عمق بحرانی، زبری وجه بالادست سرریزها و شیب وجه بالادست مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش با ساخت مدل فیزیکی سرریزها با ابعاد معین و با در نظر گرفتن دبی ۵ تا ۲۰ لیتر بر ثانیه و سطح شیب‌دار با زاویه‌های مختلف و همچنین ۳ نوع زبری با اندازه‌های ۱۰، ۳۰، ۵۰ میلی‌متر و بستر بدون زبری آزمایش‌ها انجام شد. مطالعات انجام شده نشان داد که با تغییر شیب وجه بالادست سرریز، ضریب دبی جریان و در نتیجه ضریب تخلیه سرریز، متناسب با کاهش شیب بالادست سرریزهای لبه پهن و اوجی استاندارد افزایش می‌یابد. همچنین، آزمایش‌ها نشان داد

در پنجه سرریز با منحنی سرعت موسسه USBR نشان داد که منحنی‌های تجربی WES و USBR برای هدهای بزرگتر از یک سوم هد طراحی مناسب هستند و در هدهای کمتر جواب‌های دقیقی نمی‌دهند.

وکیلی و همکاران (۱۹) با بررسی عددی تأثیر شیب و انحنای بالادست سرریز اوجی روی الگوی جریان به این نتیجه رسیدند که شیب‌دار کردن وجه بالادست سرریز باعث تغییر توزیع فشار روی تاج و ضریب تخلیه و در نهایت دبی تخلیه می‌شود و دبی بیشتری نسبت به سرریز با دیواره قائم، جریان می‌یابد.

شیخ کاظمی (۱۸) با بررسی اثر مقیاس بر عملکرد هیدرولیکی سرریز اوجی با ساخت مدل فیزیکی در سه مقیاس متفاوت و گذراندن دبی‌های مختلف از روی سرریز، به بررسی فشار پیرومتریک، پروفیل سطح آب، ارتفاع آب بالادست سرریز و ضریب دبی سرریز اوجی با انحنای در پلان و با دیواره جانبی همگرا پرداخت. در این پژوهش در دبی‌های بین ۰/۲۵ تا ۰/۸۹ به دلیل همگرایی دیواره در پنجه سرریز، موج دم‌خروسی و در دبی‌های بین ۰/۸۹ تا ۱/۱۸ در پنجه سرریز پرش هیدرولیکی مشاهده شد. اختلاف نتایج مدل فیزیکی سرریز با مقیاس ۱:۱۰۰ و ۱:۷۵ نسبت به مدل با مقیاس ۱:۵۰ نشان داد که هر چه مقیاس کوچکتر باشد خصوصیات سیال مانند تأثیر نیروی لزجت و کشش سطحی بیشتر است. همچنین، در این پژوهش رابطه‌ای برای تعیین میزان تأثیر مقیاس در ضریب دبی سرریز اوجی با انحنای در پلان و با دیواره جانبی همگرا ارائه شد.

اکبری (۳) با بررسی مدل‌سازی عددی سرریزهای لبه‌تیز با نرم افزار FLOW3D، به مدل‌سازی سه نوع سرریز مستطیلی، مثلثی، سیپولیتی با دو مدل آشفتگی K-e و RNG پرداخت و نتایج نشان داد که مدل FLOW3D برای شبیه‌سازی الگوی جریان و تخمین میزان دبی عبوری از روی سرریز لبه‌تیز از قابلیت بالایی برخوردار است.

افشاری (۲) به تأثیر پارامترهای دیواره جداکننده روی الگوی جریان روی سرریز اوجی به منظور یافتن حالت بهینه به

به دست آمده در پژوهش حاضر به اهمیت دیوار هدایت‌ها در پروفیل عبوری از سرریز لبه‌تیز مستطیلی در حالت سه‌بعدی پرداخته شده است. همچنین، با توجه به این مهم هندسه دیوار هدایت‌ها بر اساس خطوط جریان به دست آمده است و با هندسه مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش با مدل‌سازی سرریز لبه‌تیز مستطیلی در حالت دوبعدی، پروفیل زیرین جریان عبوری از سرریز لبه‌تیز در حالت دوبعدی به دست آمده است و با پروفیل استاندارد سرریز اوجی مقایسه شده است. با توجه به اینکه سرریزها در طبیعت به صورت سه‌بعدی ساخته می‌شوند، سرریز لبه‌تیز مستطیلی سه‌بعدی بدون در نظر گرفتن دیوار هدایت، مدل‌سازی شده است و پروفیل زیرین این حالت در سه مقطع با پروفیل استاندارد سرریز اوجی مقایسه شده است. با توجه به نتایج حاصل شده در طول جریان پژوهش، مدل‌سازی سرریز لبه‌تیز مستطیلی در حالت سه‌بعدی با در نظر گرفتن دیوار هدایت انجام شده است و پروفیل زیرین در این حالت نیز در سه مقطع با پروفیل استاندارد سرریز اوجی مقایسه شده است. نظر به اینکه دیوار هدایت‌های مدل آزمایشگاهی بر اساس سعی و خطا است با مطالعه موردی سد کارون ۳، مدل‌سازی بدون دیوار هدایت‌ها برای سرریز در این سد انجام شده است. برای ارتفاع آب حداکثر سیلاب محتمل، خطوط جریان عبوری از سرریز رسم شده است. سپس هندسه دیوار هدایت‌های راست و چپ سرریز بر اساس این خطوط جریان به دست آمده است. مدل‌سازی بر اساس دیوار هدایت‌های به دست آمده از خطوط جریان انجام شده است. به منظور اینکه در ساخت هر پروژه زمان ساخت و هزینه اجرا از اهمیت بسزایی برخوردار است، دوباره مدل‌سازی سد کارون ۳ با دیوار هدایت‌های مدل آزمایشگاهی انجام شده است. همچنین، هندسه و سرعت‌های عرضی بین دهانه‌های سرریز برای دیوار هدایت‌های مدل آزمایشگاهی و مدل عددی با یکدیگر مقایسه شده است. با بررسی نتایج بهینه‌ترین هندسه دیوار هدایت پیشنهاد شده است.

با تشکیل عمق بحرانی روی سرریز و ایجاد عمق فوق بحرانی در محدوده مقطع بحرانی تا انتهای تاج سرریز در تمامی سرریزها با شرایط جریان آزاد وجود دارد.

در پژوهش کریم پور (۱۲) به بررسی عددی تغییر هندسه دیوار هادی بر روی آبگذری سرریز اوجی با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D پرداخته شد. در این پژوهش با مدل‌سازی عددی سد چمشیر و با در نظر گرفتن هندسه‌های مختلف برای دیوار هدایت در سمت چپ جریان بالادست سرریز به تأثیر ضریب آبگذری سرریز پرداخته شد. تغییر در هندسه دیوار هادی با تغییر در سه پارامتر هندسی از جمله طول مستقیم، شعاع خم و طول خم انجام شد. نتایج حاصل از مطالعات نشان داد که تغییر در هندسه دیوار هادی در برخی موارد باعث افزایش آبگذری در سرریز اوجی می‌شود.

صادقی و همکاران (۱۶) به بررسی و مقایسه نتایج مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی جریان از روی سرریز لبه‌تیز با پروفیل استاندارد سرریز اوجی پرداخت و نتایج نشان داد که پروفیل زیرین عبوری از سرریز لبه‌تیز مستطیلی در حالت دوبعدی بر پروفیل استاندارد سرریز اوجی کاملاً منطبق است ولی پروفیل زیرین عبوری از سرریز لبه‌تیز مستطیلی در حالت سه‌بعدی با پروفیل استاندارد سرریز اوجی اختلافاتی دارد.

در پژوهش‌های اخیر در بخش آزمایشگاهی، اغلب با ساخت مدل‌های فیزیکی در مقیاس‌های متفاوت به بررسی مواردی مثل ضریب آبگذری، تعیین رژیم جریان، تخمین فشار در تاج پرداخته شده است. در بخش عددی نیز با مدل‌سازی سرریز لبه‌تیز و اوجی با نرم‌افزارهای FLOW3D، FLUENT به بررسی پارامترهای مؤثر در سرریز لبه‌تیز و سرریز اوجی پرداخته شده است. با توجه به پژوهش‌های اخیر بر اساس طراحی سرریز اوجی که بر اساس پروفیل زیرین به دست آمده از سرریز لبه‌تیز است، توجهی نشده است. بنابراین، در این پژوهش با تأکید بر این نکته به مدل‌سازی سرریز لبه‌تیز در حالت دوبعدی و سه‌بعدی پرداخته شده است و پروفیل زیرین هر دو حالت با پروفیل استاندارد USBR مقایسه و بررسی شده است. با توجه به نتایج

مدلسازی سرریز لبه تیز مستطیلی در حالت دو بعدی

طراحی سرریز اوجی در حالت دوبعدی قائم بر اساس پروفیل زیرین عبوری از سرریز لبه تیز است. بنابراین، در این مرحله سرریز لبه تیز مستطیلی با عرض واحد و ارتفاع ۵۲ متر در نرم افزار SOLID WORKS رسم شده است. با در نظر گرفتن شرایط مدلسازی به شرح زیر شبیه سازی در نرم افزار FLOW3D تا رسیدن به پایداری مطلوب انجام شده است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل مذکور به این صورت است: شرط مرزی ورودی: ارتفاع آب ۲۶/۶۵ متر از تاج سرریز است، شرط مرزی خروجی: خروج آب (Out flow) و شرط مرزی کف کانال: دیوار (Wall) و شرط مرزی اطراف کانال و بالای کانال نیز شرط مرزی متقارن (Symmetry) در نظر گرفته شده است. مقدار زبری بتن نیز ۰/۰۱۵ است. برای اینکه هدف این مدلسازی به دست آوردن پروفیل زیرین عبوری جریان با دقت مناسب است، بنابراین، شبیه سازی های مختلفی با اندازه مش های متفاوت به منظور آنالیز حساسیت مش بندی جهت شکل دقیق پروفیل عبوری از سرریز انجام شده است. نظر به اینکه در پژوهش های اخیر مدل آشفتگی RNG کمترین درصد خطا را داشته است، در تمامی مدلسازی ها با در نظر گرفتن مدل آشفتگی RNG، و در نظر گرفتن یک بلوک برای کل مدل سرریز لبه تیز مستطیلی و اندازه مش ۰/۵ متر در راستای طول مخزن و ۰/۳ برای عرض سرریز لبه تیز و اندازه مش ۱ متر در ارتفاع سرریز، مدلسازی انجام شده است. تعداد کل مش ها در این حالت ۱۸۷۶۵۰ به دست آمده است. شکل ۲ نمایی از جریان عبوری از این حالت را نشان می دهد.

به منظور به دست آوردن پروفیل دقیق تر از جریان عبوری با چند بلوک کردن مدل و در نظر گرفتن مش بندی ۰/۲۵ متر برای بلوک در قسمت پروفیل عبوری از سرریز، مدلسازی انجام شده است. تعداد کل مش ها در این حالت ۲۱۵۴۶۰ به دست آمده است. در این حالت به دلیل استفاده از مش بندی چند بلوک شرط مرزی بین بلوک ها متقارن در نظر گرفته شده است، همچنین دیگر شرایط شبیه سازی مانند مرحله ی قبل است. نمایی از چند

بلوک کردن مدل به جهت مش بندی ۰/۲۵ متر برای بلوک در قسمت پروفیل عبوری، در شکل ۳ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن شرایط شبیه سازی مانند حالت قبل و در نظر گرفتن مش بندی ۰/۱۲۵ متر برای بلوک در قسمت جریان عبوری، مجدد شبیه سازی در این مرحله نیز انجام شده است و تعداد کل مش ها در این حالت ۲۲۳۵۶۰ به دست آمده است. با توجه به اینکه با ریز تر شدن اندازه مش بندی تغییری در منحنی زیرین جریان عبوری از سرریز حاصل نشد، برای به دست آوردن مختصات نقاط منحنی زیرین جریان عبوری از سرریز لبه تیز از نرم افزار Get Data Gragh Digitize استفاده شده است. در شکل ۴ نمایی از پروفیل جریان عبوری و نقاط زیرین در نرم افزار Get Data Gragh Digitize نشان داده شده است. همچنین، مختصات نقاط زیرین جریان عبوری در شکل ۵ نشان داده شده است.

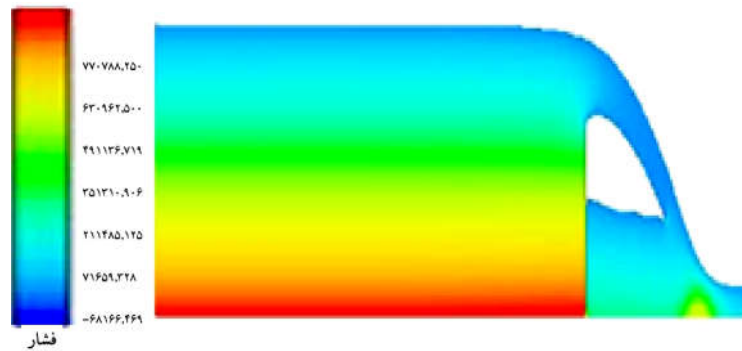
برای اطمینان از روند شبیه سازی، مقدار دبی عبوری از سرریز لبه تیز مستطیلی در حالت دو بعدی در نرم افزار FLOW3D با حل تحلیلی رابطه سرریز لبه تیز مستطیلی مقایسه شده است (۱). در شکل ۶ خروجی دبی نرم افزار نشان داده شده است. همچنین، با استفاده از رابطه ۱ مقدار حل تحلیلی به دست آمده است.

$$Q = CLH_d^{3/2} \quad (1)$$

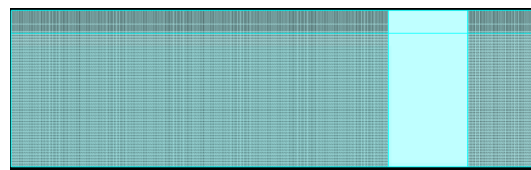
در رابطه فوق Q, C, L و H_d به ترتیب دبی، ضریب آبگذری، عرض سرریز، بار آبی روی سرریز هستند. با در نظر گرفتن ۱/۹۲ برای متغیر C ، عرض واحد برای L و مقدار ۲۶/۶۵ متر برای H_d مقدار Q برابر با ۲۶۴/۴۰ متر مکعب بر ثانیه به دست آمده است. همچنین، دبی حاصل از مدلسازی عددی مقدار ۲۷۶ متر مکعب بر ثانیه به دست آمده است. با مقایسه مقدار حل تحلیلی و مقدار به دست آمده از مدل عددی، خطای نسبی دبی، با رابطه ۲ محاسبه شده است و مقدار ۴ درصد به دست آمده است.

$$\frac{(X_{\text{model}} - X_{\text{solve}})}{X_{\text{solve}}} * 100 \quad (2)$$

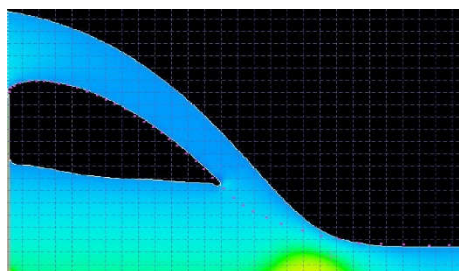
در رابطه فوق X_{model} مقدار حاصل از مدل عددی و X_{solve} مقدار حاصل از حل تحلیلی است.



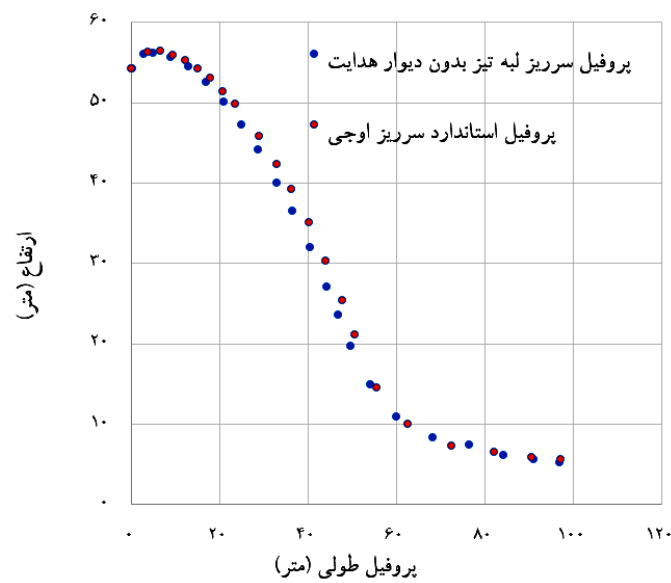
شکل ۲. نمایی از بلوک و جریان عبوری با اندازه مش ۰/۵ متر (رنگی در نسخه الکترونیکی)



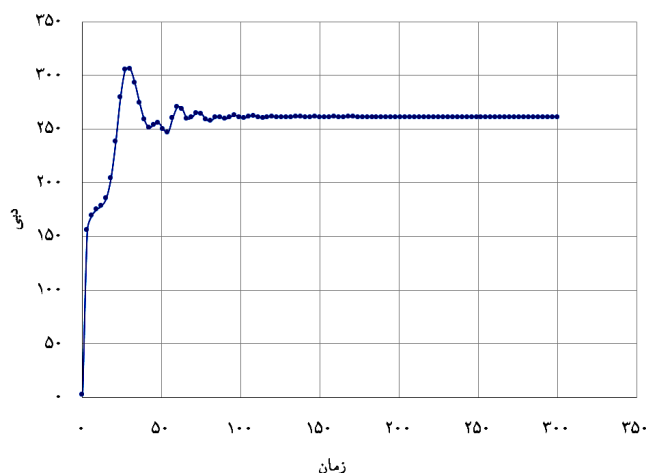
شکل ۳. نمایی از بلوک با اندازه مش ۰/۲۵ متر (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۴. پروفیل جریان و نقاط زیرین پروفیل عبوری در نرم افزار گت دیتاگراف دیجی تاز (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۵. مختصات نقاط پروفیل زیرین عبوری با مش بندی ۰/۱۲۵ متر (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۶. خروجی دبی نرم افزار در حالت دوبعدی

نتایج و بحث

مدل سازی سرریز لبه تیز مستطیلی در حالت سه بعدی بدون

در نظر گرفتن دیوار هدایت

با توجه به اینکه سرریزها در واقعیت به صورت سه بعدی ساخته می شوند، در این مرحله با در نظر گرفتن سرریز لبه تیز مستطیلی با عرض ۷۵ متر باز شدگی در دهانه سرریز و ارتفاع ۵۲ متر و همچنین مشخصات مدل سازی مشابه سرریز لبه تیز در حالت دوبعدی، شبیه سازی انجام شده است.

به منظور مقایسه پروفیل زیرین عبوری از سرریز لبه تیز مستطیلی در حالت سه بعدی، با پروفیل استاندارد سرریز اوجی، در سه مقطع راست و چپ و وسط سرریز، مختصات پروفیل زیرین جریان با نرم افزار Get Data Gragh Digitize به دست آمده است، و با پروفیل استاندارد سرریز اوجی مقایسه شده است. در شکل ۸ نمای سه بعدی سرریز لبه تیز مستطیلی بدون در نظر گرفتن دیوار هدایتها نشان داده شده است. همچنین، پروفیل عبوری جریان در حالت سه بعدی نشان داده شده است. در شکل ۹ مقایسه پروفیل زیرین عبوری در حالت سه بعدی در سه مقطع با پروفیل استاندارد نشان داده شده است.

با توجه به اهمیت منحنی سرریز اوجی در میزان خصوصیات هیدرولیکی سرریز و همچنین پیروی کردن از پروفیل استاندارد سرریز اوجی در نمودارهای (۹) در قسمت تاج پروفیل عبوری از سرریز درصد خطای نسبی بیشترین در قسمت اوجی پروفیل

طراحی سرریز اوجی بر اساس رابطه پروفیل استاندارد

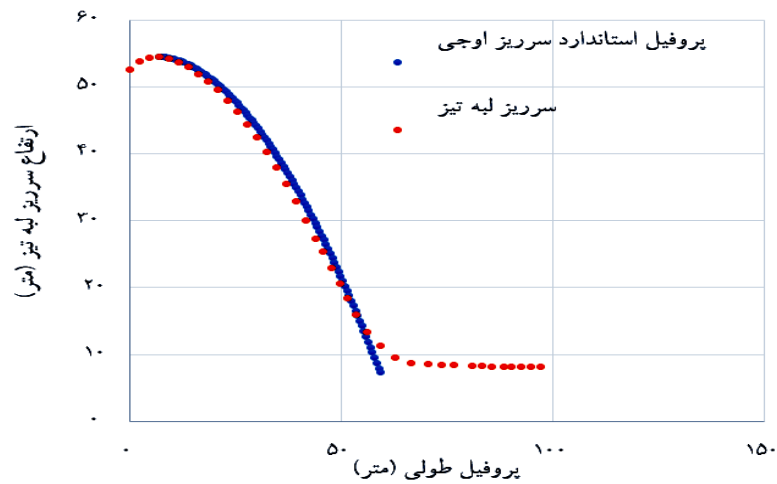
سرریز اوجی

اساس طراحی سرریز اوجی بر اساس رابطه پروفیل استاندارد سرریز اوجی است و این رابطه با فرض دوبعدی بودن جریان در صفحه قائم حاکم است. بنابراین، برای مقایسه پروفیل زیرین عبوری از حالت دو بعدی سرریز لبه تیز با پروفیل به دست آمده از رابطه پروفیل استاندارد سرریز اوجی، حل تحلیلی به منظور به دست آوردن نقاط پروفیل استاندارد با این رابطه صورت گرفته است (۴). رابطه ۳ پروفیل استاندارد سرریز اوجی است.

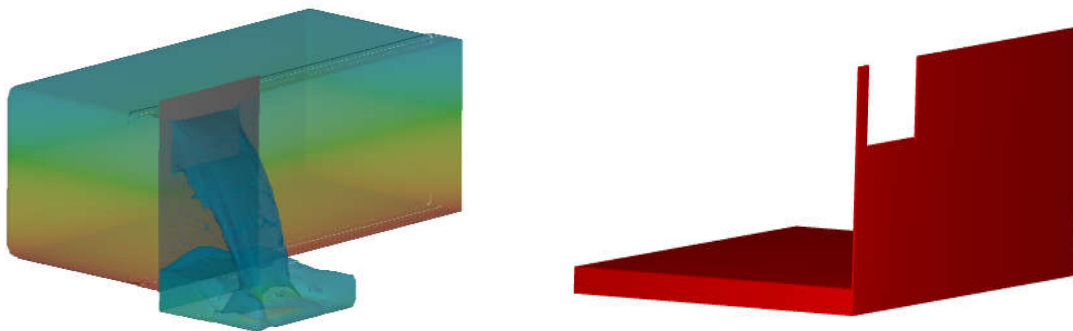
$$(y/H_d) = -k(x/H_d)^n \quad (3)$$

در رابطه فوق x و y مختصات های سرریز در راستای افقی و قائم هستند، H_d معرف هد طراحی و برابر ۲۶/۶۵ متر است. k و n ضرایب ثابتی هستند که بستگی به شیب بالادست سرریز و سرعت جریان ورودی به سرریز دارند. پروفیل رسم شده در این حالت با پروفیل زیرین عبوری از سرریز لبه تیز مستطیلی در حالت دو بعدی (شکل ۴)، در شکل ۷ مقایسه شده است.

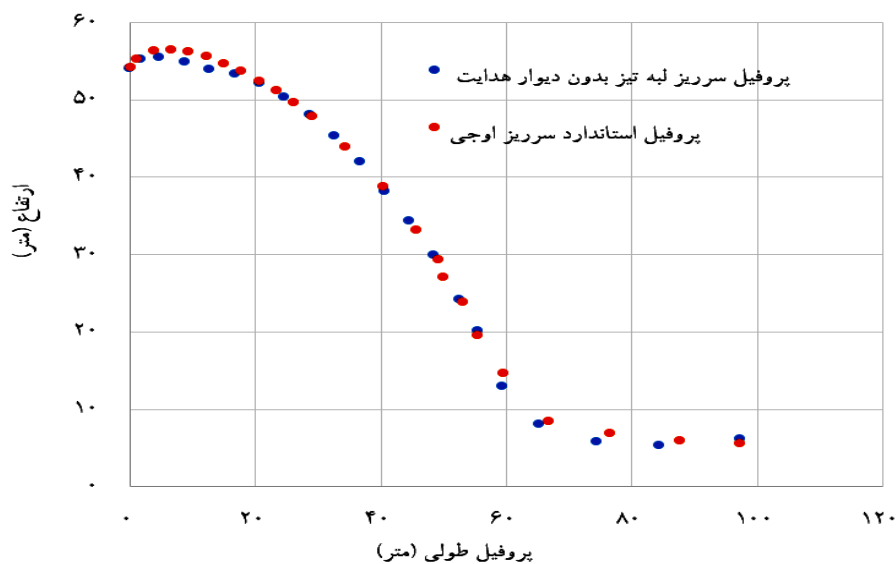
با توجه به شکل ۷ دو پروفیل استاندارد سرریز اوجی و پروفیل به دست آمده از حالت دوبعدی از مدل عددی بسیار به هم نزدیک هستند. همچنین، مقدار خطای نسبی حداکثر در شکل فوق با استفاده از رابطه ۲ مقدار ۴/۴ درصد محاسبه شده است.



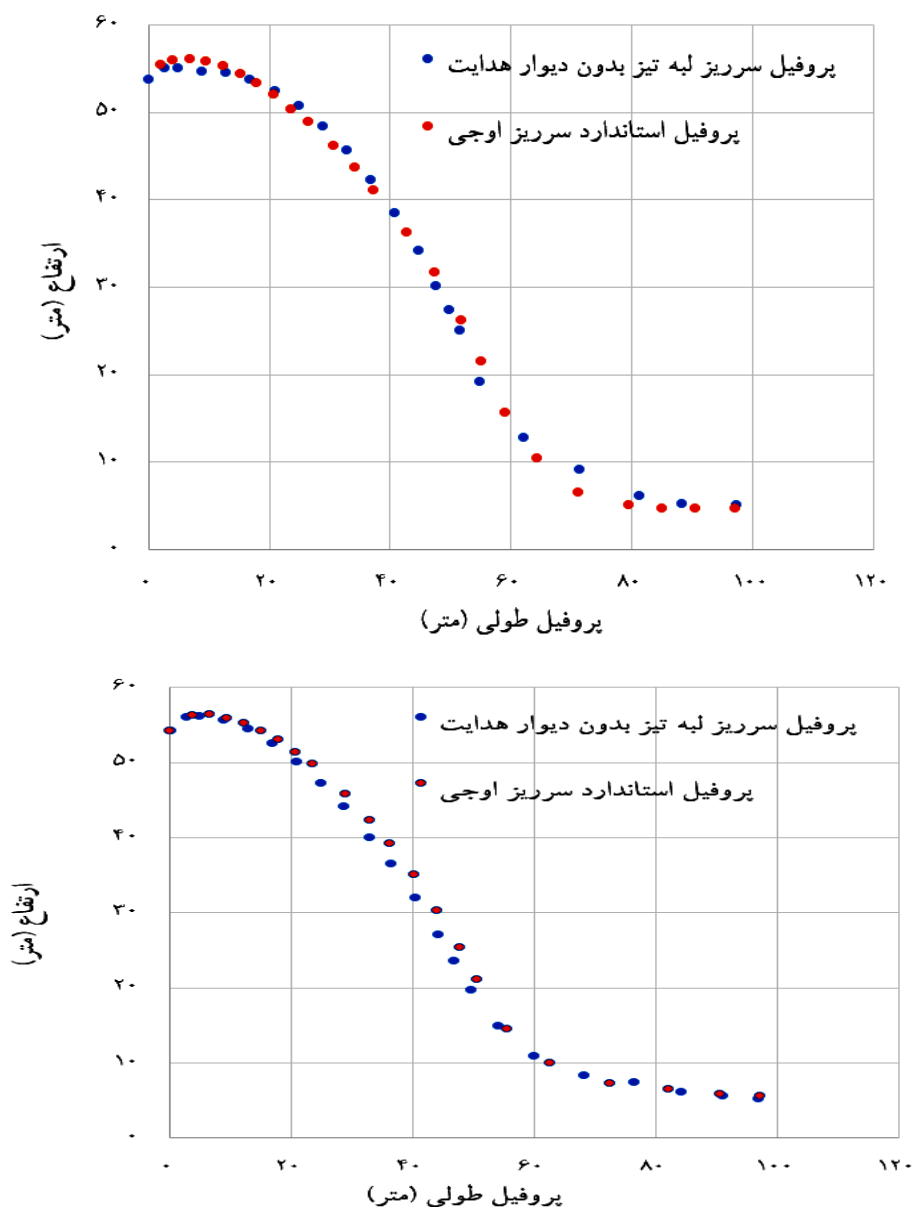
شکل ۷. مقایسه پروفیل زیرین حالت دوبعدی حاصل از مدل عددی با پروفیل رابطه تحلیلی (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۸. نمای سه بعدی سرریز لبه تیز مستطیلی بدون دیوار هدایت (سمت راست) و پروفیل عبوری از آن (سمت چپ) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۹. مقایسه پروفیل استاندارد با مقطع راست (تصویر بالا-راست)، با مقطع چپ (تصویر بالا-چپ) و با مقطع وسط (تصویر پایین) پروفیل زیرین عبوری در حالت سه بعدی بدون دیوار هدایت (رنگی در نسخه الکترونیکی)



ادامه شکل ۹

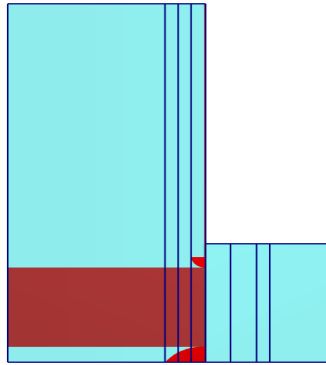
با پروفیل استاندارد سرریز اوجی، در این مرحله با در نظر گرفتن دیوار هدایت‌ها برای سرریز لبه‌تیز مستطیلی در حالت سه‌بعدی و با در نظر گرفتن شرایط مدل‌سازی قبلی، شبیه‌سازی انجام شده است. لازم به ذکر است که هندسه دیوار هدایت‌های در نظر گرفته شده در این مرحله، هندسه دیوار هدایت‌های سد کارون ۳ است. در شکل ۱۰ پلان از هندسه دیوار هدایت‌ها نشان داده شده است.

همچنین، پروفیل زیرین این حالت نیز همانند بند قبل با

عبوری از سرریز لبه تیز در حالت بدون دیوار هدایت در مقطع چپ و راست و وسط به ترتیب با رابطه استاندارد سرریز اوجی مقدار $2/23$ و $2/23$ و $1/45$ درصد به دست آمده است.

مدل‌سازی سرریز لبه‌تیز مستطیلی در حالت سه‌بعدی با در نظر گرفتن دیوار هدایت

با توجه به عدم تطابق پروفیل زیرین عبوری از سرریز لبه‌تیز مستطیلی در حالت سه‌بعدی بدون در نظر گرفتن دیوار هدایت‌ها



شکل ۱۰. پلان از سرریز لبه تیز مستطیلی با دیوار هدایت (رنگی در نسخه الکترونیکی)

ارتفاع سرریز این سد، در مشخصات سرریز اوجی سد کارون ۳ جانمایی شده است. برای مدل‌سازی مدل مذکور با در نظر گرفتن زمان ۱۸۰ ثانیه به منظور رسیدن به پایداری سطح آب و مدل آشفتگی RNG به دلیل خطای کمتر، شبیه‌سازی انجام شده است. همچنین، به منظور کاهش زمان شبیه‌سازی و کاهش تعداد شبکه مش‌بندی، از چند بلوک برای مدل‌سازی استفاده شده است. با توجه به اینکه مدل‌سازی در حالت سه‌بعدی در نظر گرفته شده است برای بلوک اول که کل مخزن سد را در بر می‌گیرد مش‌بندی یکنواخت ۳ متر در نظر گرفته شده است و بلوک دوم که در داخل بلوک اول قرار دارد و در محدوده سرریز است، مش‌بندی یکنواخت ۱/۵ متر را دارد. همچنین، بلوکی با اندازه مش ۱/۵ متر در پایین‌دست سرریز در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن خطوط توپوگرافی مخزن سد کارون ۳ و رسم این خطوط در توپوگرافی در نرم افزار SOLID WORKS هندسه این خطوط در نرم افزار FLOW 3D فراخوانی شده است.

در شکل ۱۲ نمایی از سد کارون ۳ بدون در نظر گرفتن دیوار هدایت‌ها برای سرریز نشان داده است. همچنین، شمای سه‌بعدی از توپوگرافی مخزن این سد در همین شکل نشان داده شده است. با شبیه‌سازی مدل فوق و با استفاده از قابلیت نرم افزار FLOW3D، خطوط جریان عبوری از سرریز رسم شده است. در شکل ۱۳ این خطوط نشان داده شده است.

نظر به اینکه طراحی سرریزها بر اساس حداکثر سیلاب محتمل انجام می‌شود، با در نظر گرفتن ارتفاع آب ۲۶/۶۵ متر که ارتفاع آب حداکثر بر روی سرریز سد کارون ۳ است، هندسه دیوار

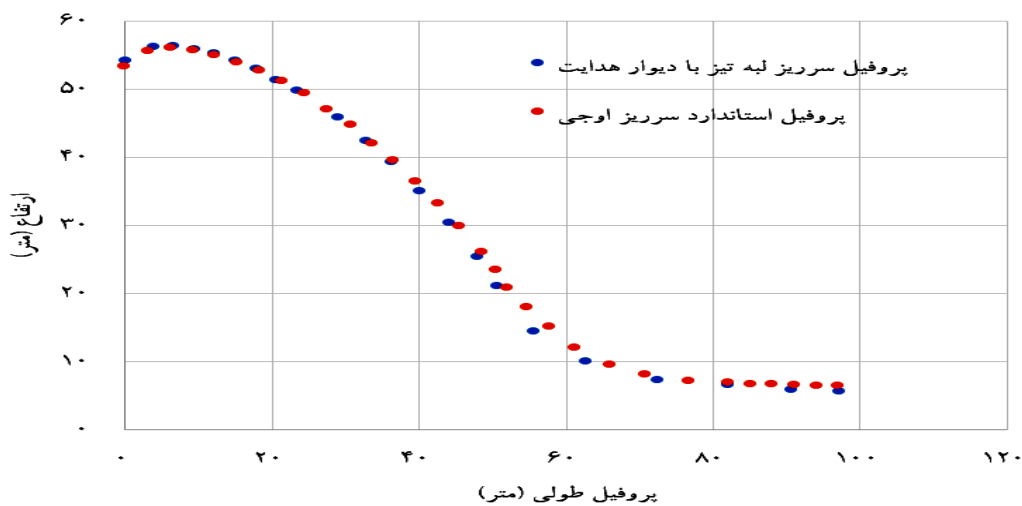
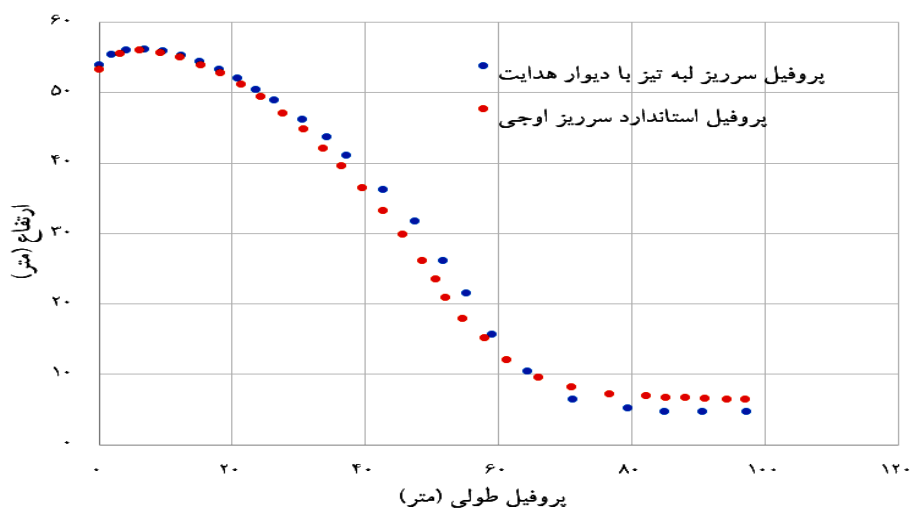
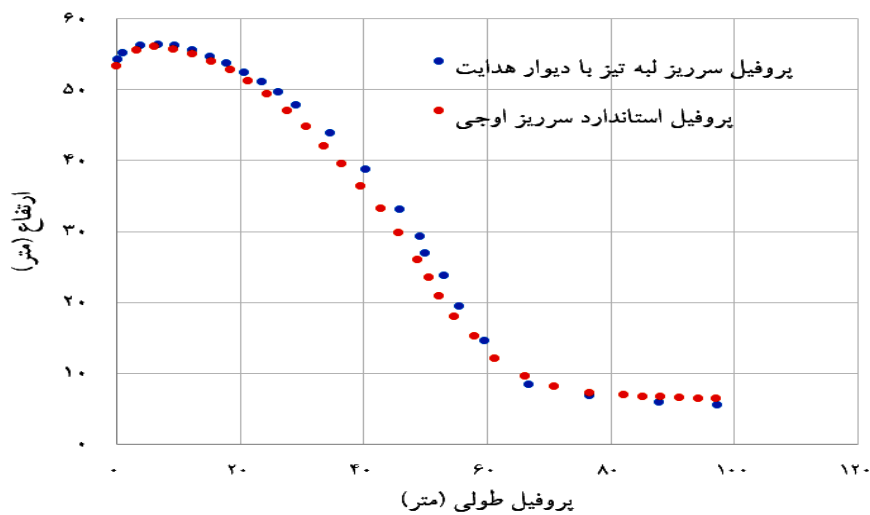
پروفیل استاندارد سرریز اوجی مقایسه شده است. در شکل ۱۱ مقایسه دو پروفیل استاندارد سرریز اوجی و پروفیل زیرین عبوری در حالت سه‌بعدی با دیوار هدایت نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها تطابق دو پروفیل مذکور با در نظر گرفتن دیوار هدایت‌ها برای حالت سه‌بعدی سرریز لبه تیز ممکن شده است.

در نمودارهای (۱۱) در قسمت تاج پروفیل عبوری از سرریز درصد خطای نسبی بیشترین در قسمت اوجی پروفیل عبوری از سرریز لبه تیز با دیوار هدایت در مقطع چپ و راست و وسط به ترتیب با رابطه استاندارد سرریز اوجی مقدار ۰/۸۵ و ۰/۴۲ و ۰/۳۰ درصد به دست آمده است. با توجه به نتایج، به نسبت زمانی که دیوار هدایت در نظر گرفته نشده بود این مقدار در مقاطع چپ و وسط و راست سرریز به ترتیب مقدار ۱/۳۸ و ۱/۸۱ و ۱/۱۵ درصد کاهش یافته است.

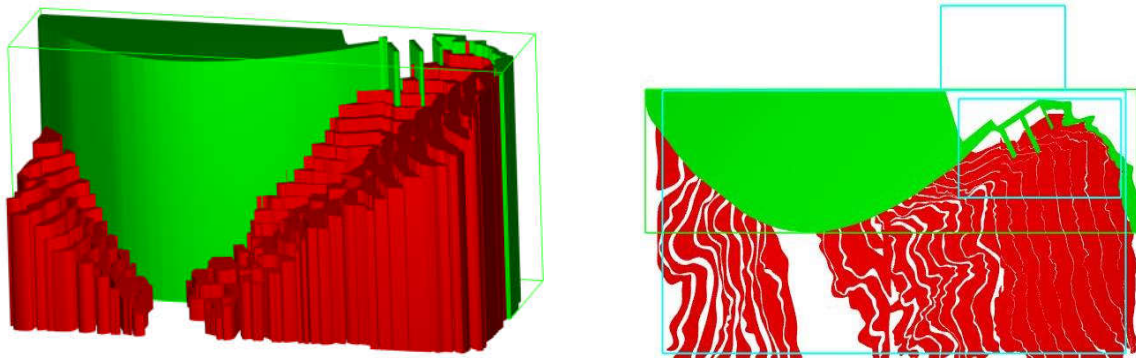
مدل‌سازی سد کارون ۳ به منظور به دست آوردن هندسه دیوار

هدایت‌ها با استفاده از خطوط جریان

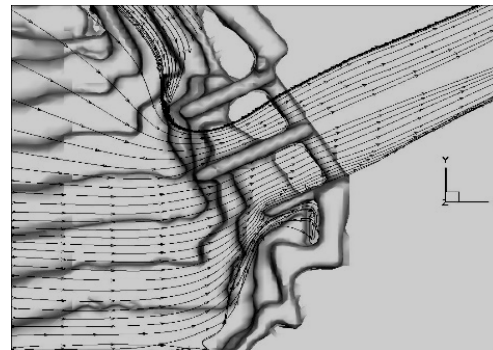
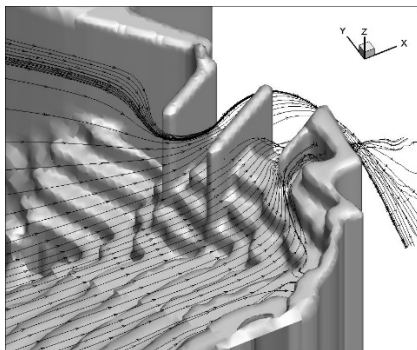
سد کارون ۳، سد دو قوسی است که ارتفاع این سد ۲۰۵ متر و ارتفاع سرریز ۵۲ متر است. سرریز این سد، از نوع سرریز اوجی با دو دهانه ۱۶/۵ متر در ساحل راست سد قرار دارد. تراز تاج سرریز ۸۲۴ متر و حداکثر تراز آب برای حداکثر سیلاب محتمل سرریز ۸۵۶/۵ متر از سطح دریا است. هدف از این مرحله به دست آوردن عددی است. به این منظور، سرریز لبه تیز مستطیلی بدون در نظر گرفتن دیوار هدایت‌ها و با در نظر گرفتن دیوارهای جداکننده دهانه‌ها، با عرض بازشدگی دهانه سرریز اوجی سد کارون ۳ و



شکل ۱۱. مقایسه پروفیل استاندارد با مقطع راست (تصویر بالا- راست)، با مقطع چپ (تصویر بالا- چپ) و با مقطع وسط (تصویر پایین) پروفیل زیرین عبوری در حالت سه بعدی با دیوار هدایت (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۲. پلان (سمت راست) و نمای سه بعدی از مخزن (سمت چپ) از سد کارون ۳ بدون دیوار هدایت (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۳. خطوط جریان عبوری از سرریز

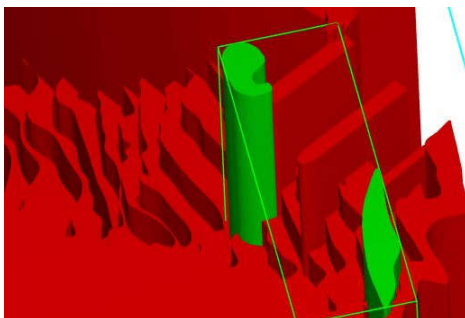
معرفی شده برای شبیه‌سازی نشان داده شده است. به منظور بررسی مشخصات هیدرولیکی به بررسی دبی نیز پرداخته شده است. مقدار دبی عبوری اندازه‌گیری شده از سرریز توسط نرم افزار FLOW3D برای این حالت مقدار $66/42$ مترمکعب بر ثانیه به دست آمده است.

در شکل ۱۵ برای نقاط شماره‌گذاری شده سرعت‌های عرضی بررسی شده است. به منظور بررسی سرعت‌های عرضی به دلیل اینکه سرریز سد در راستای قوس سد کارون قرار دارد، و به صورت عمود بر راستای جریان اجرا نشده است، زاویه محور عمود بر سرریز لبه‌تیز با محور افقی مقدار $28/76$ درجه به دست آمده است و با زاویه محور برآیند سرعت‌ها، در راستای طول و عرض در نقاط مشخص شده مقایسه شده است. برای نقاط مشخص شده در شکل ۱۵ سرعت‌های میانگین نقاط در بازه ارتفاعی تاج سرریز تا ارتفاع آب 26 متر بالاتر از تاج سرریز در نظر گرفته شده است که مطابق جدول ۱ این مقادیر سرعت‌ها در راستای طول با حرف u و مقادیر میانگین سرعت‌ها در راستای

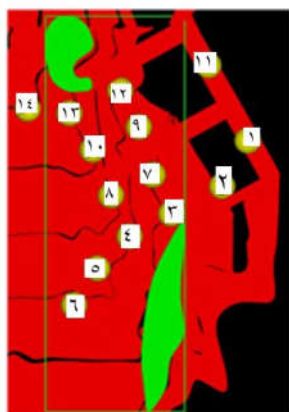
هدایت‌ها بر اساس این خطوط جریان در این ارتفاع ملاک است. به همین جهت با استفاده از نرم‌افزار Get data graph digitize مختصات‌های خطوط جریانی که از لبه سرریز عبور کردند، به دست آمده است و هندسه دیوار هدایت‌ها بر اساس مختصات‌های به دست آمده در نرم افزار SOLID WORKS رسم شده است. در شکل ۱۴ این دیوار هدایت‌ها نشان داده شده است.

مدل‌سازی سد کارون ۳ با دیوار هدایت‌های به دست آمده از خطوط جریان

در قسمت پیشین دیوار هدایت‌ها بر اساس خطوط جریانی که از لبه سرریز عبور کند، به دست آمدند. بنابراین، به منظور مقایسه سرعت‌های عرضی بین دهانه‌ها در این حالت، با زمانی که دیوار هدایت‌ها بر اساس مدل فیزیکی ساخته شده برای سد کارون ۳ باشد، نقاطی در عرض سرریز برای بررسی سرعت‌های عرضی بین دهانه‌ها مشخص شده است و با در نظر گرفتن تمام شرایط مدل‌سازی، شبیه‌سازی انجام شده است. در شکل ۱۵ نمایی از نقاط



شکل ۱۴. دیوار هدایت‌های رسم شده بر اساس خطوط جریان (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۵. نقاط تعریف شده در نرم‌افزار (رنگی در نسخه الکترونیکی)

مقایسه سرعت‌های عرضی این نقاط نیز مانند بند ۲-۶ انجام شده است. مقدار دبی عبوری اندازه‌گیری شده از سرریز توسط نرم‌افزار در این حالت نیز مقدار $69/86$ متر مکعب بر ثانیه به دست آمده است. در شکل ۱۶ نمایی از دیوار هدایت‌های سد کارون ۳ و نمایی سه‌بعدی از مخزن با توپوگرافی نشان داده شده است. در جدول ۲ مقایسه سرعت‌ها نیز آورده شده است.

مقایسه هندسه و سرعت‌های عرضی

برای ایجاد جریان مناسب روی سرریز، باید خطوط جریان موازی با یکدیگر باشند. با توجه به این نکته باید زاویه محور برآیند سرعت در راستاهای X و Y در نقاط مشخص شده تا حد امکان به محور راستای سرریز نزدیک شوند، به این منظور جدول‌های ۱ و ۲ که در آنها میزان اختلاف این دو محور ذکر شده است، مقایسه شده است. مطابق نتایج برای زمانی که دیوار

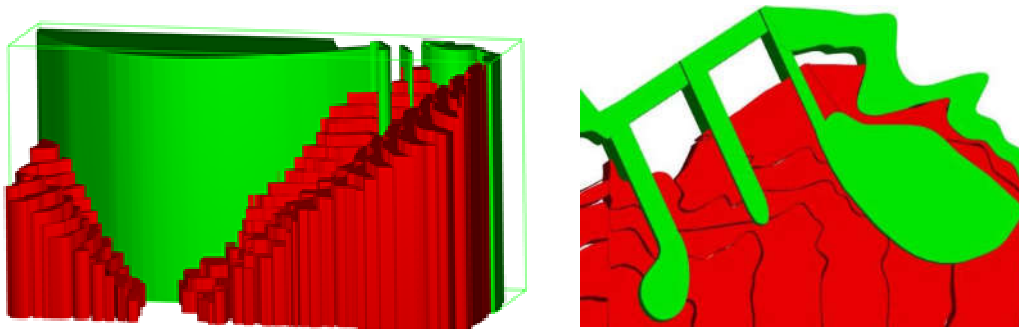
عرض با حرف V مشخص شده است. زاویه محور برآیند سرعت‌ها برای هر نقطه با راستای افق به دست آمده است و با مقدار زاویه محور عمود بر سرریز لبه‌تیز با راستای افق که مقدار $28/76$ درجه به دست آمده است، مقایسه شده است. در جدول ۱ این مقادیر در مقابل هر ایستگاه مقایسه، آورده شده است. همچنین، در گام بعد در وسط دهانه‌های سرریز نیز این مقایسه انجام شده است و در جدول ۱ آورده شده است.

مدل‌سازی سد کارون ۳ با دیوار هدایت‌های مدل فیزیکی

با در نظر گرفتن دیوار جداکننده دهانه‌ها و دیوار هدایت‌های سرریز سد کارون ۳ و تمام مشخصات مدل‌سازی مانند بند ۲-۶، شبیه‌سازی انجام شده است. به منظور مقایسه سرعت‌های عرضی با بند ۲-۶، نقاط اندازه‌گیری سرعت در این حالت نیز در همان مختصات معرفی شده‌اند. همچنین، روند محاسبه و

جدول ۱. مقایسه زاویه برآیند مقادیر سرعت با محور راستای سرریز

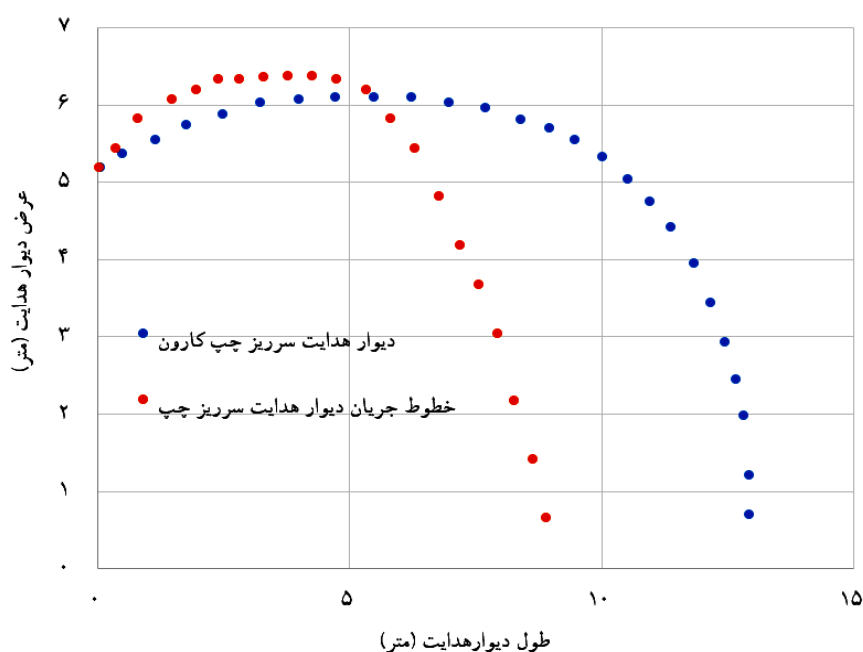
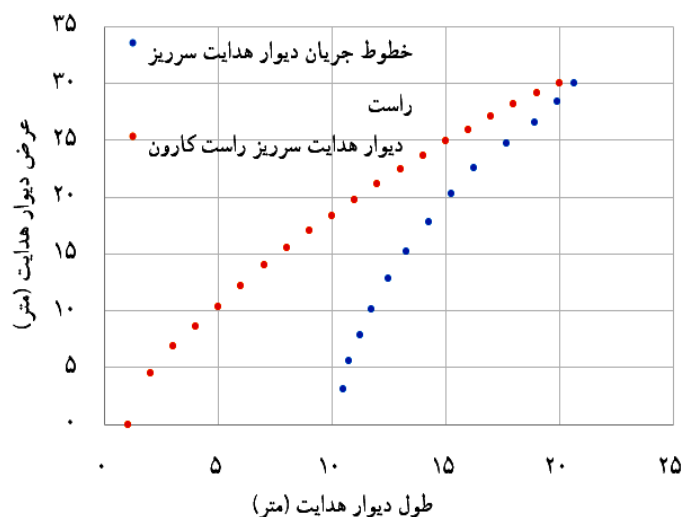
نقاط	u (m/s)	v(m/s)	Arc tan	Beta	اختلاف بر حسب درجه
۳	۲/۹۳	۲/۲۱	۳۶/۸۶	۲۸/۸۷	۷/۹۹
۷	۶/۵۸	۳/۶۰	۲۸/۳۶	۲۸/۸۷	۰/۵۱
۹	۸/۷۲	۵/۰۲	۲۹/۶۸	۲۸/۸۷	۰/۸۱
۱۲	۱۱/۸۰	۴/۹۷	۲۲/۷۸	۲۸/۸۷	۶/۰۹
۳-۷	۶/۳۰	۴/۰۰۴	۳۲/۲۱	۲۸/۸۷	۳/۳۴
۴-۸	۱/۵۱	۰/۹۰	۳۰/۵۴	۲۸/۸۷	۱/۶۷
۹-۱۲	۹/۳۹	۴/۶۴	۲۶/۱	۲۸/۸۷	۲/۷۷
۱۰-۱۳	۵/۰۰۹	۱/۰۹	۱۱/۸۵	۲۸/۸۷	۱۷/۰۲



شکل ۱۶. پلان (سمت راست) و نمای سه بعدی از مخزن (سمت چپ) از سد کارون ۳ با دیوار هدایت (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۲. مقایسه زاویه برآیند مقادیر سرعت با محور راستای سرریز

نقاط	u (m/s)	v(m/s)	Arc tan	Beta	Arc tan-Beta
۳	۳/۶۴	۱/۸۳	۲۶/۵۶	۲۸/۸۷	۲/۳۱
۷	۶/۶۲	۳/۳۷	۲۷/۰۲	۲۸/۸۷	۱/۸۵
۹	۹/۴۲	۵/۴۰	۲۹/۶۸	۲۸/۸۷	۰/۸۱
۱۲	۱۱/۳۹	۵/۲۹	۲۴/۷	۲۸/۸۷	۴/۱۷
۳-۷	۶/۶۸	۳/۳۳	۲۶/۱	۲۸/۸۷	۲/۷۷
۴-۸	۱/۹۵	۱/۲۱	۳۱/۳۸	۲۸/۸۷	۲/۵۱
۹-۱۲	۹/۸۰	۵/۶۲	۲۹/۶۸	۲۸/۸۷	۰/۸۱
۱۰-۱۳	۵/۷۲	۲/۰۹	۱۹/۷۹	۲۸/۸۷	۹/۰۸



شکل ۱۷. مقایسه میزان اختلاف در هندسه دیوار هدایت‌های راست سرریز (تصویر راست) و چپ سرریز (تصویر چپ) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

۱/۹۶ و ۷/۹۴ درجه افزایش یافته است. همچنین، با توجه به نتایج در نقطه ۹ این مقدار برای هر دو مدل‌سازی مقدار ثابت ۰/۸۱ درجه مشاهده شده است. نظر به اهمیت هندسه دیوار هدایت‌ها به جهت اقتصادی بودن طرح، دیوار هدایت‌های به دست آمده از خطوط جریان با هندسه دیوار هدایت‌های کارون مقایسه شده است. همچنین، با توجه به مختصات‌های به دست

هدایت بر اساس خطوط جریان به دست آمده است در نقطه ۷ و وسط نقاط ۴ و ۸ میزان اختلاف‌ها به ترتیب ۱/۳۴ درجه و ۰/۸۴ درجه نسبت به زمانی که دیوار هدایت مدل فیزیکی باشد کاهش یافته است. در نقاط ۳ و ۱۲ و وسط نقاط ۳ و ۷ و وسط نقاط ۹ و ۱۲ و وسط نقاط ۱۰ و ۱۳ میزان اختلاف‌های دو محور برآیند و راستای سرریز به ترتیب ۵/۶۸ و ۱/۹۲ و ۰/۵۷ و

روی سرریز به حالت سه‌بعدی تغییر کند و بر پروفیل استاندارد سرریز اوجی منطبق شود، به اصلاح جریان ورودی به سرریز به وسیله دیوار هدایت‌ها و اهمیت آن در اصلاح پروفیل عبوری از سرریز پرداخته شد. به این منظور برای استفاده از قابلیت نرم افزار FLOW3D برای رسم خطوط جریان در ترازهای مختلف آب و با در نظر گرفتن سرریز لبه‌تیز در مشخصات سد کارون ۳، به بررسی شکل دیوار هدایت‌ها بر اساس خطوط جریان پرداخته شد که در این پژوهش هندسه دیوار هدایت‌ها بر اساس خطوط جریانی که از لبه سرریز عبور کند و نزدیک‌ترین هندسه به هندسه دیوار هدایت‌های کارون را داشته باشد، حاصل شد. بنابراین، با توجه به اینکه طراحی سرریزها بر اساس حداکثر سیلاب محتمل ملاک طراحی قرار می‌گیرد، مختصات‌های خطوط هندسه دیوار هدایت برای زمان حداکثر سیلاب محتمل به دست آمده است. با توجه به تراز سرریز سد کارون ۳ که دارای ارتفاع ۸۲۴ متر از سطح دریا است، ارتفاع آب حداکثر سیلاب محتمل برای سرریز این سد ۲۶/۶۵ متر به دست آمده است. بنابراین، خطوط جریان برای ارتفاع آب ۲۶/۶۵ متر از تاج سرریز لبه‌تیز در مدل‌سازی به دست آمد. با توجه به اهمیت این دیوار هدایت‌ها در کاهش سرعت‌های عرضی، به مقایسه سرعت‌های عرضی برای زمانی که سرریز با دیوار هدایت‌های به دست آمده از خطوط جریان باشد و زمانی که دیوار هدایت‌های مدل فیزیکی سد کارون ۳ باشند، پرداخته شد. با توجه به نتایج و با در نظر گرفتن بهینه‌ترین شکل از لحاظ ساخت و اقتصادی بودن طرح و نظر به اینکه مدل‌های فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه بر اساس سعی و خطا به دست می‌آیند، نزدیک‌ترین هندسه به هندسه دیوار هدایت‌های کارون که بتواند در کاهش سرعت‌های عرضی مؤثر باشد و اختلاف کمی در مقایسه با دیوار هدایت‌های کارون را داشته باشد پیشنهاد شده است. با بررسی مختصات های نقاط در نظر گرفته شده برای دیوار هدایت مدل فیزیکی و دیوار هدایت حاصل از خطوط جریان، هندسه دیوار هدایت حاصل از مدل عددی با توجه به شکل ۱۷ اقتصادی‌تر است.

آمده برای هر دو حالت مذکور، مقدار اختلاف در اندازه‌های دیوار هدایت‌های ساحل راست و دیوار هدایت‌های ساحل چپ در شکل ۱۷ نشان داده شده است که با توجه به این مقایسه، دیوار هدایت‌های به دست آمده از خطوط جریان هندسه کوچکتری را نسبت به مدل فیزیکی ساخته شده دارند.

نتیجه‌گیری

با توجه به مقادیر محاسبه شده در جدول‌های ۱ و ۲ سرعت‌های عرضی در زمانی که دیوار هدایت‌ها با استفاده از خطوط جریان به دست آمده‌اند نسبت به زمانی که دیوار هدایت‌ها بر اساس مدل آزمایشگاهی ساخته شده‌اند، اختلاف کمی دارند. همچنین، دیوار هدایت‌های به دست آمده از خطوط جریان هندسه کوچکتری را نسبت به مدل فیزیکی ساخته شده دارند. بنابراین، با توجه به اینکه در مقایسه با سرعت‌های عرضی اختلاف کمی با دیوار هدایت‌های مدل فیزیکی را دارند، هندسه دیوار هدایت‌های به دست آمده از خطوط جریان از نظر اقتصادی بهینه‌تر است. به‌منظور کاهش فشارهای منفی ناشی از کاویتاسیون و اهمیت مشخصه‌های هیدرولیکی در سرریز اوجی پیروی از پروفیل زیرین عبوری از سرریز لبه‌تیز برای ساخت سرریز ضروری است. با توجه به فرضیات حاکم برای مدل‌سازی سرریز لبه‌تیز مستطیلی در حالت دوبعدی، پیروی از پروفیل زیرین عبوری از سرریز لبه‌تیز مستلزم جریان دوبعدی بر روی سرریز است. بنابراین، در این مقاله با مدل‌سازی سرریز لبه‌تیز مستطیلی در حالت دوبعدی، پروفیل زیرین جریان عبوری از سرریز به دست آمد و با پروفیل استاندارد سرریز اوجی مقایسه شد. مطابق نتایج به دست آمده دو پروفیل کاملاً بر هم منطبق شدند. با توجه به اینکه سرریزها در واقعیت به صورت سه‌بعدی ساخته می‌شوند، بدین منظور سرریز لبه‌تیز مستطیلی به صورت سه‌بعدی در نظر گرفته شد و به مقایسه پروفیل زیرین جریان عبوری در مقاطع راست و چپ و وسط سرریز با پروفیل استاندارد سرریز اوجی پرداخته شد که با توجه به نتایج در حالت سه‌بعدی، اختلافاتی با پروفیل استاندارد سرریز اوجی مشاهده شد. بنابراین، به‌منظور اینکه جریان بر

منابع مورد استفاده

1. Abrishami, J. and S. M. Hosseini. 1993. Open Channel Hydraulics. First Edition. Mashhad Nashr Publications, Mashhad, Iran (In Farsi).
2. Afshari, H. 2015. The effect of partition wall parameters on the flow pattern on the peak overflow in order to find the optimal state using numerical simulation. Master Thesis, Civil Engineering Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran (In Farsi).
3. Akbari, M. 2014. Numerical modeling of sharp crested wair with FLOW3D software. Master Thesis, Civil Engineering Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran (In Farsi).
4. Beyrami, M. K. 2009. Water Transfer Structures, Third Edition, Isfahan University of Technology Publications, Isfahan, Iran (In Farsi).
5. Bürgisser, M. F. and P. Rutschmann. 1999. Numerical solution of viscous 2D free surface flow over spillway crests. *In: Proceeding of 28th Congress of IAHR, Graz, Austria.*
6. Eshrati, T. and A. Fazl Avail. 2015. Laboratory evaluation of hydraulic performance of peak and downstream overflow under axial arc conditions. *Journal of Water and Soil* 29(4): 874-885. (In Farsi).
7. Froudi, A., M. Saneie and M. A. Moghadam. 2014. Experimental study on hydraulic performance in ogee spillway with arc angle and converge walls. *Journal of Experimental Research in Civil Engineering* 1(2): 81-88. (In Farsi).
8. Fuladgar, A. 2005. Two dimensional flow analysis on standard peak overflow by numerical method. Master Thesis, Faculty of Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (In Farsi).
9. Johnson, M. C. and B. M. Savage. 2006. physical and numerical comparison of flow over ogee spillway in the presence of tailwater. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(12): 1353-1357.
10. Heydari, M. 2003. Simulation of flow on overflow using FLUENT software. Master Thesis, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (In Farsi).
11. Ibrahim Nejadian, H. and H. Manafpour. 2018. Numerical study of the effect of convergence of overflow walls on the hydraulic characteristics of the flow in the dam overflow and the possibility of cavitation. *Journal of Soil and Water Conservation Research* 25(5): 109-127. (In Farsi).
12. Karimpour, A. 2018. Numerical study of wall geometry change on the peak overflow using FLOW3D software. Master Thesis, Faculty of Engineering, Qom University, Qom, Iran (In Farsi).
13. Kaveh Nasab, M. 2018. Study of the effect of upstream features on the coefficient of ogee spillway and wide edge. Master Thesis, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran (In Farsi).
14. Khatsuria, R. M. 2004. Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. New York, Marsel Dekkeer.
15. Olsen, N. R. and H. M. Kjellesvig. 1998. Three-dimensional numerical flow modelling for estimation of spillway capacity. *Journal of Hydraulic Research* 36(5): 775-784.
16. Sadeghi, M., T. Naeeni and F. Kilanehei. 2020. Investigation and comparison of two-dimensional and three-dimensional modeling results of flow over sharp crested wair with ogee spillway standard profile. *In: Proceeding of 18th Hydraulic Conference of Faculty Civil Engineering, Tehran University, Tehran, Iran (In Farsi).*
17. Sattari, M. 2015. Numerical study of water level profiles, pressure distribution and velocity in peak overflow using Fluent software. Master Thesis, Faculty of Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran (In Farsi).
18. Sheikh Kazemi, J. 2013. Effect of scale on hydraulic performance of peak overflow. Master Thesis, Faculty of Engineering, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran (In Farsi).
19. Vakili, S., A. Shamsaii and M. Rostami. 2011. Numerical analysis of the effect of slope and curvature of the upstream face of the peak overflow on the flow pattern. *In: Sixth National Congress of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran (In Farsi).*

Numerical Investigation of Guide Walls Geometry at the Entrance of Dam Spillway (Case Study: Karun-3 Dam)

M. Sadeghi¹, S. T. Omid Naeeni², F. Kilanehei¹ and M. Galoie^{1*}

(Received: July 30-2021 ; Accepted: December 21-2021)

Abstract

One of the most important hydraulic structures in a dam is the spillway. The design of the ogee spillway crest is based on the lower profile of the free-flow jet passing through the sharp-crested weir. When the downstream ogee spillway profile for the design discharge conforms to the lower profile of the free-jet passing through the sharp-crested weir, the pressure on that surface of the spillway becomes zero. In this study, the design of the ogee spillway was performed initially based on both two- and three-dimensional numerical modeling and then compared to the USBR standard method. The comparison of the final numerical and analytical results showed that although the vertical two-dimensional outputs were completely in agreement with the USBR standard profile, the three-dimensional profiles were different because in this model, guide walls were not considered. According to the analysis, if the flow entering the spillway is parallel to its axis, the lower profile of the sharp-edge spillway will be in complete agreement with the standard profile. Since, the design of guide wall geometry for ogee spillways is carried out using physical modeling which iteratively revises during a high-cost trial and error procedure, this research based on the case study of the spillway of Karun-3 dam has been tried using numerical modeling. The closest geometry to the geometry of the overflow guide wall was obtained which creates the least difference in transverse velocities. In this way, the design of guide walls can be done with more accuracy and low cost in comparison to physical modeling.

Keywords: Ogee spillway, USBR standard profile, Sharp crested weir, Guide wall, Numerical simulation

1. Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2. School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

*: Corresponding author, Email: galavi@eng.ikiu.ac.ir