

# مطالعه عددی سه بعدی اثر زبری بر شکل گیری کاویتاسیون در سرریز سد شهید عباسپور

مهدی روحانی قوچانی<sup>۱</sup>، سید علی اکبر صالحی نیشابوری<sup>۲</sup>، سید ابراهیم حسینی<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران-مهندسی آب، شرکت آبادگران بنا و ساختمان

۲- استاد بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- کارشناسی ارشد مهندسی عمران-مهندسی آب، سازمان آب و برق خوزستان

e-mail: mehdirouh@yahoo.com

## خلاصه

بدترین مشکل و خطری که ساختمان سرریز سدها را تهدید می کند پدیده کاویتاسیون است که در نقاطی از سازه که سرعت جریان آب زیاد است به وجود می آید. پس از آنکه سیستم‌هایی هیدرولیکی طراحی گردید که در آنها قسمتی در معرض سرعت جریان زیاد سیال و به دنبال آن ایجاد پدیده کاویتاسیون بود طراحان را بر آن داشت که با این پدیده به طور جدی برخورد نمایند. در این تحقیق پدیده کاویتاسیون بر روی سرریز سد شهید عباسپور با استفاده از نرم افزار Flow-3D مدل سازی عددی شده و تاثیر پارامتر زبری بر ایجاد کاویتاسیون در سرریز سد فوق الذکر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. مدل گردید. نتایج مدل هیدرولیکی این سد با نتایج حاصل از این نرم افزار و نرم افزار W.S.77 مقایسه گردید که نتایج نشان دهنده اینست که نتایج مدل سه بعدی Flow-3D از دقت مناسبی برای بررسی زبری در پدیده کاویتاسیون برخوردار می باشد.

کلمات کلیدی: سرریز، مدل سه بعدی، سد شهید عباسپور، کاویتاسیون، Flow-3D

## ۱. مقدمه

پدیده کاویتاسیون هم در سیستم‌های بسته و هم در سیستم‌های باز مسأله آفرین است. در حال حاضر برای جبران و یا به حداقل رساندن خسارت ناشی از کاویتاسیون و با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی موارد زیر مطرح می باشد:

(الف) رعایت مواردی در طراحی سازه‌های هیدرولیکی به شکلی که وقوع پدیده کاویتاسیون را از بین ببرد (نظیر احداث هواده در سرریزها).

(ب) کاهش اثر کاویتاسیون بر روی سازه که در این مورد سطوحی را که در معرض تخریب قرار می‌گیرد توسط روکشهای مقاوم تجهیز می‌نمایند.

مایعات در اثر عوامل استاتیکی یا دینامیکی تحت فشار ثابت، درجه حرارتشان افزایش می یابد و با ادامه این حالات در مایع حبابهای محتوی هوا ( و یا مخلوطی از هوا و بخار آب ) تولید شده و در اثر ارتباط با هم بزرگ می شوند. اگر این فرآیند در دمای ثابت در اثر کاهش فشار دینامیکی صورت گیرد، هنگامی که حبابهای تولید شده به سمت ناحیه ای با فشار بیشتر هدایت شوند، در هم فرو رفته، انفجار در آنها صورت خواهد گرفت و سبب تولید فشار و ضربه بر روی سازه

شده، تولید خسارت می نمایند. مجموعه این اعمال تحت نام کاویتاسیون شناخته می شود که یک پدیده دینامیکی است [1].

شاخص ترین نوع تأثیری که کاویتاسیون بر جای می گذارد و در معرض دید قرار می دهد صدمه ایست که بر روی سطح جداره جریان وارد می کند. تجربیات عملی در بهره برداری از سرریزها و همچنین آزمایشات و مطالعات متعدد بر روی مدل و پروتوتیپ حاکی از آنست که خسارات ناشی از کاویتاسیون در اثر علل و شرایط متنوعی است و عموماً یک مسأله به تنهایی در ایجاد پدیده کاویتاسیون کافی نمی باشد؛ اما ترکیبی از عوامل هندسی و هیدرولیکی و سایر عوامل وابسته در ایجاد خرابی دخیل هستند. ناهمواریهای ناشی از وجود ناصافی و نامنظمی در سطح مجرا می تواند سبب ایجاد کاویتاسیون گردد [1]. به همین جهت در سازه های هیدرولیکی با هد زیاد و سرعت بالا لزوم استفاده از سطوح صاف و منظم و پیوسته از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بدین ترتیب دقت در اجرای سطوح جریان به خصوص در مکانهای بحرانی یعنی در محلهایی با فشار کم و سرعت بالا (بیش از ۳۰-۲۰ متر بر ثانیه) از اهمیت بیشتری برخوردار است. نامنظمی های سطحی سبب افت فشار موضعی جریان شده و باعث شکل گرفتن حبابها و هدایت آنها به محدوده با فشار زیاد شده، در نتیجه به انفجار حبابها ختم می گردد. انفجار حبابها به نوبه خود بر روی سطح جداره جریان صدمه وارد می کند [1].

در مورد بررسی کاویتاسیون در جریانهای سطح آزاد تاکنون به استفاده از بررسی اندیس کاویتاسیون بسنده می شد که این امر باعث می شود طراحان به اتخاذ مقادیر دست بالا و تحمیل هزینه اضافی بپردازند. در صورتی که با استفاده از نرم افزار Flow-3D می توان شرایط واقعی طرح را مدل نمود و حالت های مختلف را در زمان اندک و با صرف هزینه کم بررسی کرد و به شرایط بهینه رسید. لذا در این مقاله سعی بر آن شده است با استفاده از این نرم افزار پدیده کاویتاسیون را بر روی سرریز سد شهید عباسپور شبیه سازی نموده و اثر تغییرات زبری را بر روی آن مطالعه و بررسی نمود.

## ۲. مروری بر کارهای انجام شده

فالوی در کتاب خود، زبری را به دو دسته تقسیم نموده است [1]:

الف- زبری غیر یکنواخت که منظور، نامنظمی های مقطعی در طول جریان می باشد (مانند پله).

ب- زبری یکنواخت که منظور، نامنظمی های یکنواخت در طول جریان می باشد

لایه برشی در المانهای با زبری یکنواخت، در ناحیه ای خاص از میدان جریان رخ می دهد. کاویتاسیون در محل این ناحیه برشی رخ می دهد. در هر صورت، همراه با جریان بر روی زبری یکنواخت (مانند جریان روی لایه ای از ذرات ماسه)، یک لایه برشی در سرتاسر سطح جریان وجود دارد. بنابراین، کاویتاسیون به طور تصادفی در خلال جریان رخ می دهد. چنانچه اندیس کاویتاسیون از مقدار آن در شرایط آغازین کاویتاسیون کمتر گردد، کاویتاسیون در لایه های ورقه ایی مانند روی سطح زبری رخ می دهد. محل این لایه های ورقه ایی به اندازه و طیف نوسانات آشفتگی در لایه مرزی بستگی دارد [1].

همچنین نای در سال ۲۰۰۱ تاثیر زبری بر شکل گیری کاویتاسیون را مطالعه نموده است و نتیجه گرفته است که زبری باعث کاهش احتمال وقوع کاویتاسیون می گردد [2].

آقای فالوی در سال ۱۹۹۰ نرم افزاری به نام W.S.77 ارائه کرد که به آنالیز عددی پدیده کاویتاسیون در سرریزها می پرداخت [1]. برای پیش بینی وقوع کاویتاسیون از شاخص کاویتاسیون استفاده نمود. مدل عددی ارائه شده به صورت پرسش و پاسخ عمل می کند. بعد از این که در منوی اصلی نوع سرریز مورد نظر برای طراحی (اوجی و یا از نوع شوت) مشخص گردید باید مقدار پارامترهای زیر به مدل داده شود: دبی طراحی سرریز ( $m^3/s$ )، دمای محیط بر حسب درجه سانتیگراد، رقوم کف دریاچه در محل سرریز (بر حسب متر از سطح دریا)، رقوم تاج سرریز، رقوم کف حوضچه آرامش و یا انتهایی سرریز و شیب انتهایی سرریز. اگر کاربر خواستار فایل خروجی باشد، برنامه چهار صفحه خروجی خواهد داشت که

صفحه اول شامل مشخصات جریان ورودی و در دومی سرعت، فشار پیزومتری، عمق جریان و ... و صفحه سوم شامل مشخصات و ابعاد سه نوع هواده قابل استفاده در سرریز است. صفحه چهارم نیز شامل دبی، عمق و نوع جریان، ضخامت لایه مرزی، اندیس کاویتاسیون و پتانسیل خسارت برای تمامی مقاطع است.

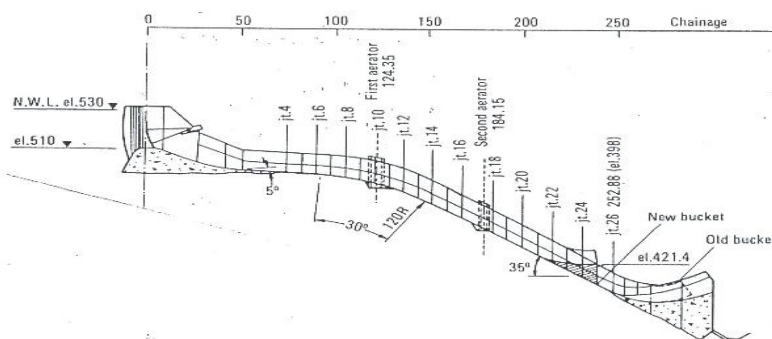
آقای احمدی نیز در سال ۱۳۸۱ در پایان نامه خود روشهای موجود در کاهش دادن احتمال وقوع کاویتاسیون را با استفاده از اصلاح نیمرخ سرریزها مطالعه و بررسی کرده است [۳]. در تحقیق مذکور از دو روش "طراحی انحنای با عدد کاویتاسیون ثابت" و "طراحی انحنای با فشار کنترل شده" استفاده شده است. در روش اول سعی می شود شاخص کاویتاسیون مربوط به پروفیل آب بر روی انحنای ثابت بماند. در روش دوم سعی می شود که تغییرات شاخص کاویتاسیون بر روی انحنای بیشتر از شاخص کاویتاسیون بحرانی باشد؛ بنابراین برنامه ای به زبان فرترن تهیه شده است تا نیمرخ سرریزها را با استفاده از روشهای فوق طراحی یا اصلاح نماید و اثر روشهای فوق الذکر را در شرایط مختلف هیدرولیکی مقایسه نماید.

### ۳. مشخصات میدان

هدف از ارائه این بخش از مقاله، بررسی مشخصات میدان حل در نرم افزار Flow-3D جهت شبیه سازی جریان روی سرریز سد شهید عباسپور می باشد. سد مخزنی شهید عباسپور (کارون) از نوع سد بتنی دو قوسی است که بر روی رودخانه کارون در نزدیکی مسجد سلیمان (شمال شرقی) احداث گردیده است. مشخصات فنی سد به شرح زیر می باشد [۴].

- نوع سد: بتنی دو قوسی - ارتفاع سد از پی: ۲۰۰ متر - حجم مخزن: ۲۹۰۰ میلیون متر مکعب
- طول تاج سد: ۳۸۰ متر - رقوم سطح آب در حالت نرمال: ۵۳۰ متر (دبی ۸۱۰۰ متر مکعب بر ثانیه)
- رقوم تاج سرریز: ۵۱۰ متر - رقوم سطح آب در حالت بیشترین سیلاب احتمالی: ۵۴۰ متر (دبی ۱۶۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه)

سرریز سد از سه گذرگاه، هر کدام به عرض ۱۸/۵ متر تشکیل شده است و به وسیله سه دريچه قطاعی به ابعاد ۱۵\*۲۰ متر کنترل می شود. این گذر گاهها در مجموع برای سیلاب ۱۶۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه طرح و آزمایش گردیده است. نمایی از مقطع سرریز سد در شکل ۱ مشاهده می شود.



شکل ۱- نمایی از مقطع سد شهید عباسپور

تحقیق حاضر بر اساس مدل هیدرولیکی سرریز این سد که توسط مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو ساخته شده است، صورت گرفته است [۴]. محدوده ساخت مدل هیدرولیکی سرریز با مقیاس ۶۲/۵ : ۱ شامل قسمتی از بدنه سد در

مجاورت ورودی سرریز، سرریز اصلی سد، دریچه های قطاعی، ۲۵۰ متر از دریاچه بالا دست و حدود ۸۰۰ متر از طول رودخانه در پایاب سد می باشد.

با توجه به گزینه های موجود در نرم افزار Flow-3D، برای مدل کردن سرریز سد شهید عباسپور در آن، مشخصات سرریز به صورتی که در ذیل مشاهده می شود، تعریف شده است:

- زمان به گونه ای تعریف شده است که جریان به حالت ماندگار برسد، یعنی تغییرات میدان جریان تقریباً به روندی ثابت منتهی شود. پس از سعی و خطاهای متعدد زمان ۷۰ ثانیه به عنوان زمان اتمام محاسبات انتخاب شد.  
 - جریان به صورت یک سیاله و تراکم ناپذیر و به صورت سطح آزاد تعریف می گردد. لازم است ذکر شود که در این نرم افزار برای استفاده از روش VOF نیاز نیست دو سیال آب و هوا تعریف گردد؛ بلکه با انتخاب یک سیال ( آب ) و در نظر گرفتن گزینه سطح آزاد، خود نرم افزار از روش VOF برای حل میدان جریان استفاده می کند.  
 - سیال، لزج و برای حل آن از مدل آشفتگی RNG و مقدار شتاب ثقل در راستای Z،  $9/81$ - متر بر مجذور ثانیه در نظر گرفته می شود.

- متغیر فشار کاویتاسیون با توجه به فاصله از سطح دریا ۲۴۵۰ پاسکال تعیین و زمان شکل گیری کاویتاسیون برای در نظر گرفتن تغییرات شعاع حباب کاویتاسیون در برنامه به صورت پیش فرض، نصف فاصله زمانی در نظر گرفته شده برای ارائه خروجیها می باشد.

- برای در نظر گرفتن مشخصات سیال (جرم حجمی، لزجت)، آب در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد تعریف شده است.  
 - برای مشخص کردن حدود شبکه بندی بلوکهایی مشخص می شود که کلیه اندازه های سازه مورد نظر و فضای آزاد در داخل آن تعریف می شود. می توان همه جزئیات سازه مورد نظر را در یک بلوک هم در نظر گرفت. مختصات، با استفاده از سیستم مختصات کارتزین در داخل بلوک شبکه بندی در جهات سه گانه با استفاده از یک سری نقاط ثابت تعریف می شوند.

- در تحقیق حاضر تعداد سلولها در جهت جریان ۲۵۰، در عرض سرریز ۵ و در ارتفاع ۱۱۵ عدد در نظر گرفته شده است. باید در نظر داشت که فضای حل میدان جریان مکعبی به ابعاد  $۷۵۰ * ۱۸/۵ * ۲۳۰$  متر بوده است و جریان از ۱۵۰ متر قبل از تاج سرریز تا ۳۰۰ متر بعد از انتهای پرتاب کننده جامی، شبیه سازی شده است. همچنین در ارتفاع، تقریباً تا ۵۰ متر بالای تاج سرریز در میدان حل در نظر گرفته شده اندازه شبکه بندی به ابعاد  $۳ * ۳/۷ * ۲$  به ترتیب در راستای طولی، عرضی و ارتفاعی جریان که مربوط به مدل معرفی گردید.

- در مختصات کارتزین برای تعریف شرایط مرزی شش وجه مشخص است که با توجه به جهت مثبت محورها شامل X Min, X Max, Y Min, Y Max, Z Min, Z Max می باشد. لازم به ذکر است که کلیه این مشخصات در یک بلوک تعریف می شوند. برای انجام محاسبات حل میدان جریان، برای Z MAX شرط مرزی تقارن، Z MIN شرط مرزی دیواره، Y MIN و Y MAX شرط مرزی تقارن و X MIN شرط مرزی فشار ثابت به صورت ارتفاع آب تعریف شده است. دبی، از حاصلضرب سرعت وسط عمق جریان روی سرریز در عمق جریان روی سرریز تعیین شده است. همچنین برای X MAX شرط مرزی خروجی در نظر گرفته شده است. در جدول (۱) برای ارتفاعهای متفاوت آب، دبیهای معادل آنها آمده است.

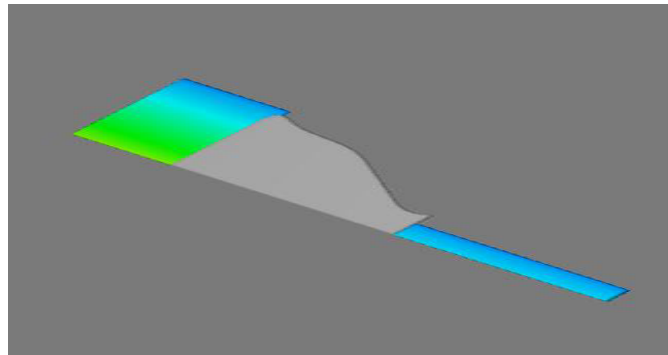
جدول ۱- هد آب معادل دبی مورد نظر

دبی معادل (متر مکعب بر ثانیه)	ارتفاع آب پشت سد (متر)
5500	211.2
4500	207.4
4000	205.7

- در شرایط اولیه جریان، فشار به صورت هیدروستاتیک در راستای مختصات Z در نظر گرفته شده است.

- فضای اولیه پر شده با سیال در فضای بلوک از ۱۵۰ متر قبل از سرریز تا روی تاج سرریز به ارتفاع ۱۸۷/۵ متر از کف می باشد.

در شکل ۲ وضعیت جریان را روی سرریز در شرایط اولیه نشان می دهد. تغییر رنگها مربوط به تغییر در مقدار فشار می باشد. برای پایین دست جریان، دریاچه ای به عمق ۲۰ متر متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- وضعیت جریان در شرایط اولیه

#### ۴. معادلات حاکم

##### ۴.۱. معادله پیوستگی جرم

معادله پیوستگی جرم به طور کلی به صورت زیر است:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\partial \rho u A_x}{x} = RDIF + RSOR \quad (1)$$

که ضریب  $\nu p$  برابر  $\mu/\rho$ ،  $Cp$ ،  $\mu$  برابر ضریب نفوذ ممنتوم و  $Cp$  یک ثابت است که معکوس آن مربوط به عدد آشفنگی اشمیت است.

##### ۴.۲. معادله مومنتوم

معادلات ممنتوم برای اجزای سرعت سیال ( $u, v, w$ ) در سه جهت مختصات، معادلات ناویر-استوکس با یکسری ترمهای اضافی به شرح زیر هستند  $G_X$  شتابهای بدنه،  $f_x$  شتاب ناشی از لزجت،  $b_x$  افت جریان در محیطهای دارای خلل و فرج است:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} u \quad (2)$$

##### ۴.۳. سطوح مشترک و سطوح آزاد

ترکیب سیال به صورت ترمهای یک تابع حجم سیال و  $F(x, y, z, t)$  این تابع بیانگر حجم سیال بر واحد حجم و به صورت زیر است:

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

ضرایب نفوذ به صورت  $\nu f = CF \cdot \mu/\rho$  که  $CF$  یک ثابت است که عکس آن گاهی اوقات مربوط به عدد اشمیت آشفنگی می شود، تعریف می شود. این ترم نفوذ تنها یک دید برای اختلاط آشفنگی دو سیال که توزیع آن با تابع  $F$  بیان

می شود، ایجاد می کند. ترم FSOR مربوط به دانسیته RSOR در معادله پیوستگی جرم است و برابر سرعت زمانی تغییرات تابع حجم یک سیال است که همراه با منبع جرم می باشد. بیان  $F$  وابسته به نوع مساله ای است که مدل می شود. برای یک سیال،  $F$  بیانگر کسر جمعی اشغال شده با سیال است؛ بنابراین جاهایی که  $F=1$  است سیال و جاهایی که  $F=0$  است حباب و حفره وجود دارد.

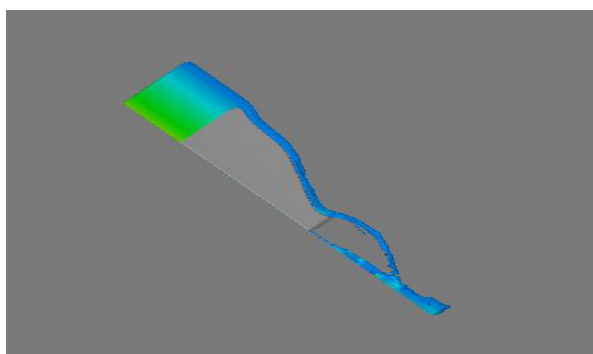
## ۵. حل عددی میدان و بررسی اثر زبری بر شکل گیری کاویتاسیون

نرم افزار Flow-3D برای مشخص کردن کاویتاسیون در فایل خروجی، مقادیری با نام  $nf$  دارد که مشخص کننده وضعیت سیال در نقاط مورد نظر است. مقدار ۰ نمایانگر وجود سیال به طور کامل در آن نقطه، مقدار ۷ نمایانگر تشکیل سلول کاویتاسیون در آن نقطه و مقدار ۸ نمایانگر فضای آزاد در آن نقطه می باشد. جدول ۱ مقایسه نتایج مربوط به اندیس کاویتاسیون حاصل از مدل هیدرولیکی [5] و مدل W.S.77 و نیز مقادیر  $nf$  از Flow-3D را برای دبی ۵۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه ارائه می دهد. در این جدول و جداولی که بعداً می آیند، منظور از نمایانگر وضعیت نقطه در Flow-3D همان  $nf$  می باشد. همانگونه که در ادامه، مشاهده می شود، هنگامی نرم افزار Flow-3D وقوع کاویتاسیون را مشخص می نماید که اندیس کاویتاسیون مدل هیدرولیکی عدد ۰/۲۵ را نشان می دهد که بنابر توصیه بعضی مراجع، مقدار اندیس کاویتاسیون بحرانی می باشد [۹]، اما نرم افزار W.S.77 عدد ۰/۲۲۹ را نشان می دهد.

جدول ۱- مقایسه نشانگر کاویتاسیون حاصل از مدل‌های مختلف در دبی ۵۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه

فاصله از نقطه مبدا روی تاج سرریز (متر)	نمایانگر وضعیت جریان در سلول محاسباتی در Flow-3D	اندیس کاویتاسیون حاصل از W.S.77	اندیس کاویتاسیون حاصل از مدل هیدرولیکی
90	0	0.357	0.536
95	0	0.333	0.521
100	0	0.334	0.508
105	0	0.331	0.475
110	0	0.326	0.452
115	0	0.32	0.431
120	0	0.312	0.418
125	0	0.303	0.4
130	0	0.292	0.374
135	0	0.281	0.355
140	0	0.269	0.331
145	0	0.257	0.31
150	0	0.245	0.289
155	0	0.256	0.272
160	0	0.241	0.261
165	7	0.229	0.25
170	7	0.219	0.238
200	7	0.177	0.189
252.8	7	0.15	0.157

نهایتاً برای ارائه کیفی نتایج نرم افزار Flow-3D در شکل ۳ وضعیت جریان روی سرریز در پایان محاسبات نشان داده شده است. همانگونه که در شکل نمایانگر است، جریان از نظر کیفی به صورت قابل قبولی در آمده است و تغییر رنگها مربوط به تغییر فشار در مقاطع مختلف است که در اینجا مورد بحث نیست و هدف، تنها ارائه شکلی گرافیکی از جریان روی سرریز می باشد.



شکل ۳- وضعیت جریان در انتهای محاسبات

به منظور بررسی تاثیر زبری بر شکل گیری کاویتاسیون در سرریز سد شهید عباسپور زبریهای  $0.3/5$  و  $10$  میلیمتر انتخاب شده است. این مقادیر از آنرو انتخاب گشته است که بتوان با نتایج نرم افزار W.S.77 مقایسه نمود. دبی مورد مطالعه در نرم افزار W.S.77،  $4000$  متر مکعب بر ثانیه بوده است. در جدول ۲ اثر زبری در شکل گیری کاویتاسیون بر روی سد شهید عباسپور آمده است.

جدول ۲- اثر زبری در شکل گیری کاویتاسیون در دبی  $4000$  متر مکعب بر ثانیه

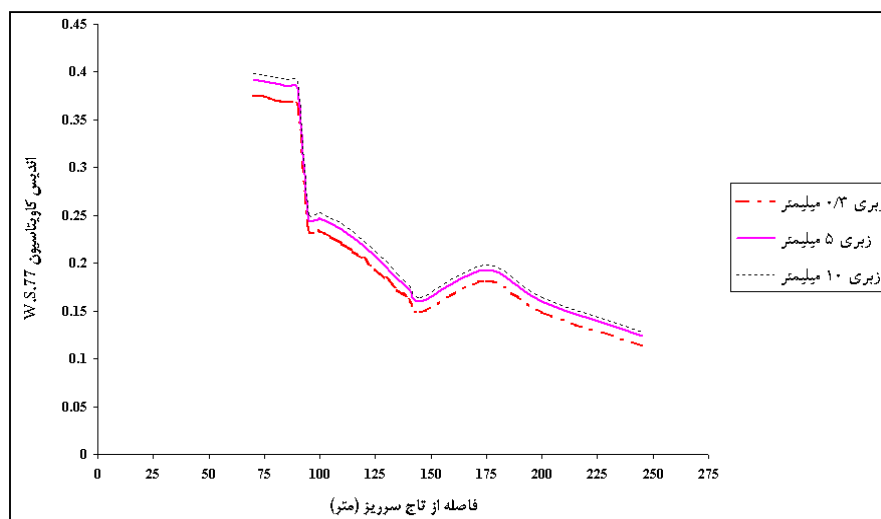
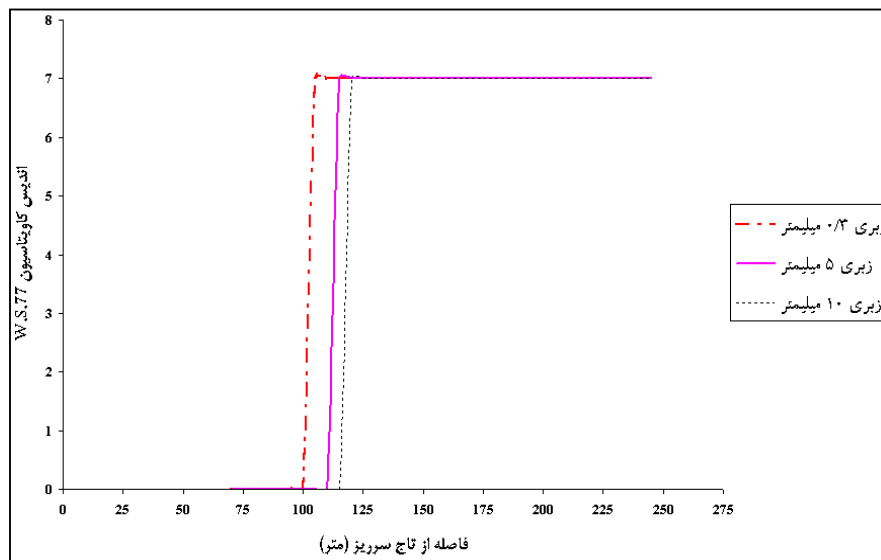
فاصله از نقطه مبدا روی تاج سرریز (متر)	زبری $3/$ میلیمتر		زبری $5$ میلیمتر		زبری $10$ میلیمتر	
	نمایانگر وضعیت جریان در سلول محاسباتی در Flow-3D	اندیس کاویتاسیون حاصل از W.S.77	نمایانگر وضعیت جریان در سلول محاسباتی در Flow-3D	اندیس کاویتاسیون حاصل از W.S.77	نمایانگر وضعیت جریان در سلول محاسباتی در Flow-3D	اندیس کاویتاسیون حاصل از W.S.77
70	0	0.375	0	0.392	0	0.398
75	0	0.375	0	0.39	0	0.396
80	0	0.371	0	0.388	0	0.394
85	0	0.368	0	0.385	0	0.392
90	0	0.365	0	0.383	0	0.39
95	0	0.233	0	0.246	0	0.251
100	0	0.233	0	0.247	0	0.253
105	7	0.228	0	0.242	0	0.247
110	7	0.221	0	0.235	0	0.241
115	7	0.213	7	0.227	0	0.233
120	7	0.204	7	0.218	7	0.223
125	7	0.194	7	0.207	7	0.213
130	7	0.184	7	0.196	7	0.202
135	7	0.172	7	0.184	7	0.189
140	7	0.161	7	0.172	7	0.177
145	7	0.149	7	0.16	7	0.164
175	7	0.182	7	0.193	7	0.198
200	7	0.149	7	0.16	7	0.164
245	7	0.114	7	0.124	7	0.128

با دقت در جدول ۲ معلوم می گردد، در زبری  $0.3/5$  میلیمتر، نرم افزار Flow-3D محل رخداد کاویتاسیون را در فاصله  $105$  متری از مبدا نشان می دهد، در حالی که در زبری  $5$  میلیمتر فاصله  $115$  متری و در زبری  $10$  میلیمتر فاصله  $120$  متری را نشان می دهد.

اندیس کاویتاسیون حاصل از نرم افزار W.S.77 در فاصله ۱۰۵ متری برای زبری ۰/۳ میلیمتر مقدار ۰/۲۲۸، برای زبری ۵ میلیمتر عدد ۰/۲۴۲ و برای زبری ۱۰ میلیمتر مقدار ۰/۲۴۷ را نشان می دهد. این نتایج همچنین صحت نرم افزار W.S.77 را برای در نظر گرفتن زبری تایید می کند.

با مقایسه آمار جدول فوق الذکر مشاهده می شود، محل شروع کاویتاسیون در نرم افزار Flow-3D در زبریهای مربوطه، با مقدار اندیس کاویتاسیون ۰/۲۲۸، ۰/۲۲۷ و ۰/۲۲۳ که از نرم افزار W.S.77 به دست می آید، معادل است که در واقع با نتایج مربوط به جدول ۱ که در آن مقدار اندیس کاویتاسیون بحرانی (آغازین) را در نرم افزار W.S.77 عدد ۰/۲۳ نشان می داد، مطابقت خوبی دارد.

برای مشاهده کیفی تر، شکل‌های (۴-۸) و (۴-۹) برای در نظر گرفتن تاثیر پارامتر زبری بر شکل گیری کاویتاسیون با استفاده از دو نرم افزار معرفی شده، ارائه شده است.



همانطور که در شکل‌های فوق مشاهده می گردد، افزایش زبری یکنواخت در دبی ثابت، موجب حرکت محل آغاز رخداد کاویتاسیون به سمت پایین دست جریان می شود.



این فرآیند با نتایج نای نیز همخوانی دارد. نای نتیجه گرفته است که افزایش زبری موجب کاهش احتمال وقوع کاویتاسیون می گردد. به عبارت دیگر، در یک موقعیت ثابت بر روی سرریز سد، با افزایش زبری، اندیس کاویتاسیون در آن نقطه، افزایش و احتمال وقوع کاویتاسیون، کاهش می یابد. به همین علت، محل رخداد کاویتاسیون روی سرریز با افزایش زبری به سمت پایین دست جریان حرکت می کند.

#### ۶. نتیجه گیری

- با توجه به استفاده از شبیه سازی عددی جریان روی سرریز در شرایط متفاوت، کاویتاسیون روی سرریز سد عباسپور در سرعتهای بالای ۲۵-۳۰ متر بر ثانیه شکل می گیرد.  
- محل شروع کاویتاسیون در نرم افزار Flow-3D در زبریهای ۰/۳، ۵ و ۱۰ میلیمتر، به ترتیب با مقدار اندیس کاویتاسیون ۰/۲۲۸، ۰/۲۲۷ و ۰/۲۲۳ که از نرم افزار W.S.77 به دست می آید، معادل است که در واقع با نتایج مربوط به جدول ۱ که در آن مقدار اندیس کاویتاسیون بحرانی (اغازین) را در نرم افزار W.S.77 عدد ۰/۲۳ نشان می داد، مطابقت خوبی دارد.  
- افزایش زبری یکنواخت در دبی ثابت، موجب حرکت محل آغاز رخداد کاویتاسیون به سمت پایین دست جریان می شود. این فرآیند با نتایج نای نیز همخوانی دارد. به عبارت دیگر، در یک موقعیت ثابت بر روی سرریز سد، با افزایش زبری، اندیس کاویتاسیون در آن نقطه، افزایش یافته و احتمال وقوع کاویتاسیون، کاهش می یابد.

#### ۷. تقدیر و تشکر

از دفتر تحقیقات و استانداردهای مهندسی آب سازمان آب و برق خوزستان به عنوان حمایت کننده مقاله تشکر می نمایم.

#### ۸. مراجع

- [1] Falvey, H.T., (1990). " Cavitation in chutes and spillways", Bureau of Reclamation, Denver.
- [2] Nie, Meng-Xi, 2001, "Cavitation prevention with roughened surface", ASCE, 127 (10), pp. 878-880
- [۳] احمدی، حسن، ۱۳۸۱، "اصلاح انحنای قائم در شوتها"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.
- [۴] "گزارش مدل هیدرولیکی سرریز سد شهید عباسپور (کارون)"، ۱۳۶۳، مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو.
- [5] Jalalzadeh A.A., 1994, "Spillway damage and the construction of a new bucket at Karun I", Hydropower & Dams, 1, pp. 77-84.