

## الگوی جریان و استهلاك کارمایه در سرریزهای پلکانی با ارتفاع پله‌ی غیر یکنواخت

حمزه ابراهیم نژادیان<sup>۱\*</sup>، محمود رضا ملایی نیا<sup>۲</sup>

### چکیده

بهره‌وری از سرریزهای پلکانی، به علت هزینه‌ی ساخت پایین و بازدهی بالای آنها بطور فزاینده‌ای رو به افزایش است. از این رو، تحقیقات نیز در این زمینه با رشد و توجه زیادی از سوی مهندسين سد همراه بوده، ولی اغلب این مطالعات در زمینه‌ی سرریزهای پلکانی با ارتفاع پله‌ی یکنواخت می‌باشد، در حالی که ارتفاع پله‌ی غیر یکنواخت نیز می‌تواند در بعضی حالات به عنوان یک گزینه مطرح گردد. در این تحقیق از یک نمونه‌ی فیزیکی از سد هرات برای تند آب پلکانی با ارتفاع ۱/۳ متر و شیب ۱۹/۲ درجه برای صحت سنجی شبیه عددی استفاده شد، سپس سه نوع پیکر بندی پلکانی با استفاده از پویایی سیال محاسباتی در قالب نرم افزار ANSYS CFX برای محدوده جریان  $16.15 \# \frac{Q}{h} \# 1.54$  مورد آزمایش قرار گرفتند. شبیه سازی جریان دو حالتی آب و هوا برای هر یک از پیکر بندیها و تمامی محدوده‌های بده ها صورت پذیرفت و نتایج در زمینه های الگوی جریان، استهلاك کارمایه و نقطه‌ی شروع هوادهی جریان مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان از تفاوت حداقلی استهلاك کارمایه را در محدوده‌ی نوع جریان ریزشی و تفاوت حداکثری در نوع لغزشی داشتند.

**واژه‌های کلیدی:** سرریز پلکانی، پویایی سیال محاسباتی، نرم افزار ANSYS CFX، استهلاك کارمایه

<sup>۱</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد عمران آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

<sup>۲</sup> - استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

\* - نویسنده مسوول مقاله: H.ebrahimnejadian@gmail.com

## مقدمه

کاربرد سرریزهای پلکانی به حدود ۳۵۰۰ سال پیش بر می‌گردد. از جمله اولین سدهایی که از سرریز پلکانی در بدنه آن برای تخلیه سیلاب‌های اضافی استفاده شد، سدی در کشور یونان و مربوط به هزار سال قبل از میلاد مسیح بوده است (چانسون، ۱۳۸۴). سرریزهای پلکانی در انواع مختلف سد ها از جمله سد های بتن غلتکی<sup>۱</sup> کارایی داشته و در دهه های اخیر، با توجه به پیشرفت دانش و فنهای جدید و کاربرد مصالح بتن غلتکی (RCC)، این سرریزها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله مزایای این سامانه‌ی استهلاک کارمایه می‌توان به این موارد اشاره کرد: ۱- هزینه‌ی اجرای پایین، ۲- کوتاه شدن زمان اجرا، ۳- بهره برداری و نگهداری آسان، ۴- افزایش میزان افت کارمایه ۵- زیبایی در حین بهره برداری ۶- سازگاری با دانش و فن جدید (سد های بتن غلتکی).

پیشرفت دانش و فن سبب شده است که امروزه سد های بسیار بزرگی ساخته شوند. برای نمونه، سدهای کرخه و کارون که ساخته شده اند، و سد بختیاری که در دست مطالعه است، از سدهای بزرگ ایران به شمار می‌روند. حتی سد بختیاری با ارتفاع بیش از ۳۰۰ متر بلندترین سد بتنی دو قوسی دنیا به حساب می‌آید. به جهت دانش و فن ساخت نیز سدهایی جدید در دست مطالعه و ساختمان است. سد RCC (بتن غلتکی) جزو دانش و فنهای روز دنیا به شمار آمده، و در کشور ما در حال حاضر در سیاه بیشه، هرات یزد (سرریز مورد مطالعه در این تحقیق) و دیگر نقاط کشور سدهایی با این دانش و فن در دست ساختمان است.

ارتفاع زیاد سد ها سبب می‌شود کارمایه زیادی در پشت سد ها ذخیره شود که هنگام تخلیه و آبیگری سرعت آب به میزان بسیار بالایی افزایش یافته و پدیده‌هایی همچون حفره سازی، فرسایش و تخریب بستر نهرها و رودخانه‌های پایین دست را به وجود آورد. از این رو، یک سامانه‌ی استهلاک کارمایه به نام سرریز در پایاب سد طراحی و ساخته می‌شود. هر چه سد از ارتفاع بیشتری

برخوردار باشد، به سامانه‌ی استهلاک کارمایه کارآمدتری نیاز دارد. سدهای بتن غلتکی نیز، اگر چه اجرایی شبکه‌ای با سدهای خاکی دارند، ولی به دلیل ارتفاع بیشتر که می‌توانند داشته باشند، نیازمند سرریزها و سامانه‌های استهلاک کارآمدتری هستند.

## پیشینه‌ی تحقیق

ابراهیمی و همکاران (۱۳۸۴) با انجام یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، متغیرهای هیدرولیکی جریان همچون فشار، سرعت و میزان استهلاک کارمایه را در مورد یک نمونه‌ی سرریز پلکانی توریسنگی با سه شیب کلی ۱:۱، ۲:۱ و ۳:۱ مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌ی ساخته شده برای بده های ۸۰، ۶۰، ۴۰، ۲۰، ۱۰۰، و برای شرایط نفوذپذیری و نفوذناپذیری کف مورد آزمایش قرار گرفت و فراسنج های هیدرولیکی مزبور اندازه گیری شدند. نتایج حاصله نشان دادند که با افزایش بده‌ی جریان، استهلاک کارمایه کاهش می‌یابد، بطوریکه در نمونه‌ی نفوذ پذیر با شیب ۳:۱ و بده حداکثر کمترین درصد افت کارمایه، و در نمونه‌ی نفوذ ناپذیر با شیب ۳:۱ و بده‌ی حداقل، بیشترین درصد افت کارمایه ایجاد شد. از طرفی با کم شدن شیب پایین دست، افت کارمایه جریان افزایش پیدا کرد.

حیدری و همکاران (۱۳۸۸) با ساختن ۵۴ نمونه‌ی آزمایشگاهی در سه شیب با نسبت ارتفاع به طول پله‌ی متفاوت از سرریز های پلکانی و انجام آزمایشهای جهشمار در مورد نمونه‌ی آزمایشگاهی، میزان افت کارمایه ذت در سرریزها مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصله نشان دادند که افت کارمایه نسبی تابعی از بده‌ی جریان بوده، و با افزایش بده از مقدار افت کارمایه نسبی کاسته می‌شود. با افزایش شیب سرریز از ۲۱/۸ درجه به ۳۰ درجه، به ازای افزایش تعداد پلکانها، میزان افت کارمایه در نمونه‌ها سیر صعودی را نشان می‌دهد.

رسانی و همکاران (۱۳۹۰)، با استفاده از نمونه‌های فیزیکی ساخته شده در دانشگاه شهید چمران، اهواز، و عبور جریان را بر روی سرریزهای پلکانی، عمق آب قبل و بعد از وقوع جهش هیدرولیکی اندازه گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داند که به علت ورود هوا به داخل جریان آب عبوری از روی سرریز های پلکانی، استفاده از عمق آب

<sup>۱</sup> roller compacted concrete

عامل اصلی استهلاک در این نوع عبارتند از: ۱- انتشار فشانه در هوا ۲- برخورد فشانه با کف پلکان ۳- تشکیل جهش هیدرولیکی کامل یا ناقص

۲- **جریان لغزشی**<sup>۲</sup>: در بده‌های بزرگ، جریان بر روی تنداب پلکانی، به صورت یک جریان سایشی چسبیده به لبه‌ی پله‌ها عبور می‌کند. لبه‌های بیرونی پله‌ها تشکیل یک کف کاذب را می‌دهند که جریان سایشی روی آنها حرکت می‌کند. جریان روی این خط جریان اصلی به صورت لغزشی حرکت کرده، دارای نیمرخ سرعت توانی بوده (مانند نهرهای رو باز)، و در زیر این خط جریان، به مرور جریان‌های چرخشی شروع به پدید آمدن می‌کنند (Chanson and Gonzalez, 2005).

**جریان انتقالی**<sup>۳</sup>: این نوع جریان، در حد مرز بین دو جریان ریزشی و لغزشی روی می‌دهد (Chanson and Gonzalez, 2005).

برای تشخیص نوع جریان حاکم بر سرریزهای پلکانی روابط آزمایشگاهی و انگاره فراوانی ارائه شده‌اند که در ادامه به ذکر آنها می‌پردازیم.

### چگونگی تشخیص نوع جریان در انواع سرریز:

محققان مختلفی روابطی را برای تشخیص نوع جریان در سرریزهای پلکانی به صورت آزمایشگاهی ارائه داده. چانسون (۲۰۰۱) آزمایش‌هایی را در مورد سرریزهای پلکانی را انجام داد و نتایج کار خود را برای تشخیص در سرریزهای پلکانی برای محدوده‌ی  $1.54 \leq \frac{d_c}{h} \leq 16.15$  به صورت دو رابطه‌ی (۴) و (۵) ارائه نمود که در آنها  $\alpha$  شیب سرریز و  $d_c$  عمق بحرانی مورد نیاز برای تغییر نوع جریان است:

$$\frac{d_c}{h} \# 0.89 - 0.4 \tan \alpha \quad (4)$$

$$\frac{d_c}{h} \# 1.2 - 0.325 \tan \alpha \quad (5)$$

قبل از جهش هیدرولیکی در پایین دست جهت تعیین افت کارمایه، باعث برآورد بیشتر (غیر واقعی) افت کارمایه نسبی می‌گردد. در واقع، با ورود حبابهای هوا به داخل جریان (کاهش گرانروی)، از میزان تنش برشی کاسته شده و در نتیجه خاصیت استهلاک کارمایه نسبی تقلیل می‌یابد. همچنین، ورود حبابهای هوا به داخل جریان باعث افزایش حجم جریان شده و اندازه‌گیری آن را با خطا همراه می‌سازد.

اقبال زاده و جوان (۲۰۱۲) برای بررسی قابلیت و توانایی نمونه‌های اختلاطی VOF و Mixture، ساز و کار هواگیری و ورود هوا به جریان را در جریان لغزشی بر روی سرریزهای پلکانی را با استفاده از نرم افزار Fluent شبیه سازی کردند. آنها نتایج شبیه سازی عددی سطح آزاد، و مولفه‌های سرعت و غلظت هوا در آب را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. آنها دریافتند که در پایین دست نقطه‌ی شروع هوادهی، در جایی که هوادهی سریع سطح آزاد قابل شبکه‌دهنده است، سطح آزاد به وسیله‌ی برنامه‌ی اختلاطی Mixture بهتر شبیه سازی می‌گردد.

### انواع جریان بر روی سرریزهای پلکانی

جریان بر روی سرریزهای پلکانی بسته به میزان بده عبوری از روی بدنه و هندسه‌ی پله‌های آن در یکی از دسته‌های زیر قرار می‌گیرد (Chanson, 2002):

**جریان ریزشی**<sup>۱</sup>: در بده‌های کم، جریان عبوری از سازه پلکانی به صورت جریان‌ها فشانه‌ای ریزشی آزاد کوچک و متوالی خواهد بود. جریان خروجی از هر پله به صورت یک فشانه‌ی ریزشی آزاد به کف پله پایین دست برخورد کرده و بر حسب مقدار بده‌ی عبوری ممکن است بعد از برخورد، با یک جهش هیدرولیکی کامل (NA 1)، یا یک جهش هیدرولیکی ناقص (NA 2)، و یا بدون تشکیل جهش هیدرولیکی (NA 3) توام باشد (Chanson and Toombes, 2001).

<sup>2</sup>- skimming flow

<sup>3</sup>- transition flow

<sup>1</sup>- nappe flow

### شبیه‌سازیهای عددی جریان بر روی سرریزهای پلکانی

تابارا و همکاران (۲۰۰۵) به کمک نرم افزار ADINA و شبیه‌آسفتگی K-ε شبیهی عددی را از یک نمونه‌ی فیزیکی تهیه کرده، و این دو شبیه را در دوزمینه‌ی ی استهلاک کارمایه و عمق جریان با نمونه‌ی واقعی مورد مقایسه قرار داده و نتیجه گرفت که ساخت شبیه عددی از سرریزهای پلکانی می‌تواند نتایج مناسبی را از شبکه مشخصه‌های جریان به همراه داشته باشد.

ژیانگ جو و همکاران (۲۰۰۶) به کمک نرم افزار Fluent و با انتخاب شبیه‌سازی فازی آسفتگی RNG و اختلاطی Mixture شبیه‌سازی عددی خود را با نمونه‌ی فیزیکی مورد مقایسه قرار دادند. ایشان این مقایسه را در زمینهای نیمرخ سرعت، جریان چرخشی و توزیع فشار انجام داده و اعلام کردند که انطباق مناسبی بین شبیه عددی و نمونه‌ی فیزیکی وجود دارد.

### مواد و روشها

#### پویایی سیال محاسباتی

در حقیقت پویایی سیال محاسباتی علم جایگزین نمودن معادلات دیفرانسیل حاکم بر مساله با اعداد، و پیشروی این اعداد در مکان و یا زمان برای به دست آوردن یک توصیف عددی از میدان جریان می‌باشد. از جمله‌ی دلایل رشد پویایی سیال محاسباتی را می‌توان ارائه‌ی حل تقریبی برای معادلات ناویر استوکس، کاهش بازه‌ی زمانی برای تغییر متغیرها، بالا بودن سرعت محاسبات و ارزانتر بودن آن نسبت به نمونه‌سازی‌های آزمایشگاهی بیان کرد. برای بهره‌گیری از روشهای عددی، به دلیل بالا بودن حجم محاسبات، ناگزیر به استفاده از نرم افزارهای محاسباتی هستیم (ورس‌تینگ و مالاسکرا، ۲۰۰۶). این نرم افزارهای امکان دستیابی را به اطلاعات کامل با جزئیات دقیقتر و اطلاعاتی که در آزمایشگاه امکان اندازه‌گیری آنها به راحتی میسر نیست، و یا نیاز به ابزارهای پیشرفته اندازه‌گیری دارند را فراهم می‌سازند. در ادامه به معرفی نرم افزار مورد استفاده در این تحقیق پرداخته می‌شود.

اگر نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله  $\frac{d_c}{h}$  از رابطه‌ی (۴) کوچکتر و از رابطه (۵) بزرگتر باشد، جریان انتقالی را نشان می‌دهد.

بویس و هگر (۲۰۰۳) نیز رابطه‌ی (۶) را برای تشخیص نوع جریان در سرریزهای پلکانی در تحقیق خود ارائه دادند.

$$\frac{d_c}{h} \# 0.91 - 0.41 \tan a \quad (6)$$

در صورتی که نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله  $\frac{d_c}{h}$  از رابطه (۶) بزرگتر باشد، جریان لغزشی، و در غیر این صورت نوع جریان ریزشی خواهد بود.

#### ۳-۱- روابط انگاره در زمینهای استهلاک کارمایه

چانسون و تومبس (۱۹۹۴) رابطه‌ی (۷) را برای محاسبه‌ی استهلاک کارمایه در سرریزهای پلکانی ارائه نمودند. در این رابطه ( $f$ ) ضریب اصطکاک جریان نام دارد که چانسون مقدار آن را بر اساس آزمایشهای خود برای  $10 < \alpha < 5$  حدود  $1/3$  در نظر گرفته است:

(۷)

$$\frac{F_L}{E^1} = 1 - \frac{f_b}{8 \sin a} \# \cos i + \frac{1}{2} \frac{f_b}{8 \sin a} \# \frac{H_{dam}^2}{d^3} + \frac{H_{dam}}{d^2}$$

چانسون (۱۹۹۴) محاسبه‌ی افت کارمایه را در نوع جریان ریزشی در سرریزهای پلکانی به صورت رابطه‌ی (۸) ارائه داد که در آن ارتفاع کل سرریز،  $d_c$  عمق بحرانی و  $h$  ارتفاع پله،  $E_1$  کارمایه کل در بالادست و  $E_L$  کارمایه مستهلک کننده می‌باشند.

(۸)

$$\frac{F_L}{E^1} = 1 - \frac{0.54 \frac{d_c^{275}}{h} + 1.715 \frac{d_c^{0.55}}{h}}{1.5 + \frac{H_{dam}}{d^2}}$$

بویس و هگر (۲۰۰۳) رابطه‌ی (۹) را برای محاسبه‌ی ی استهلاک کارمایه در نوع جریان لغزشی بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی خود ارائه داده:

(۹)

$$\frac{DH}{H_{max}} = 1 - \exp \left\{ -0.45 \frac{K}{Nh} \sin i \frac{h^2 H_{dam}}{d^2} \right\}$$

## نرم افزار ANSYS CFX

نرم افزار ANSYS CFX، وسیله‌ای با هدف عمومی پویایی سیال محاسباتی است که یک حلگر پیشرفته را با قابلیت‌های پیش و پس پردازشگر قدرتمند ترکیب کرده، و توانایی شبیه سازی مواردی را از قبیل جریانهای پایدار و ناپایدار، دائمی و غیر دائمی، آرام و آشفته، مادون صوت و در حد صوت و مافوق صوت، نیروهای شناوری را دارا می‌باشد. نرم افزار ANSYS CFX برای گسسته سازی معادلات حاکم بر محیط جریان از روش حجم محدود مبتنی بر بنپار استفاده می‌کند. در این نرم افزار دو شبیه مجزای اویلرین- اویلرین برای جریان چند حالت، و شبیه رد یابی ذرات لاگرانژی موجودند. جهت شبیه سازی سطح آزاد، دو زیر شبیه جریان همگن چند حالت و جریان غیر همگن چند حالت ارائه شده اند (ANSYS CFX user Manual, 2010).

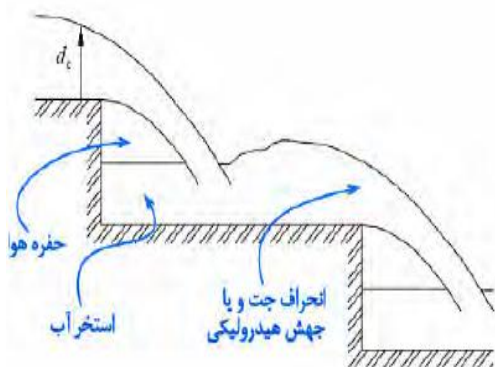
## شبیه سازی عددی سرریز های پلکانی

یکی از راههای مطالعه‌ی پدیده‌های فیزیکی بهره گیری از پویایی سال محاسباتی (CFD) است. از جمله این پدیده‌های فیزیکی، مسائل هیدرولیکی پیچیده ای است که امکان برر سی تحلیلی آنها به دلیل تعدد فراسنج های اثر گذار وجود نداشته و از لحاظ بررسی‌های آزمایشگاهی نیز با شبکه کلاتی همچون تاثیرهای مقیاسی و هزینه بر بودن مواجه می‌باشند. برای بهره گیری از (CFD) در هر مساله ای نخست باید دستاوردهای آن را با نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار داده، و پس از صحت سنجی و انطباق قابل قبول نتایج آن بر بررسی های آزمایشگاهی به آن استناد نمود (سلطانی و رحیمی، ۱۳۸۶). در تحقیق حاضر نخست برای صحت سنجی نتایج شبیه عددی از نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی سرریز سد هرات (خوانسار یزد) بهره گرفته شد. شبکه خصات این نمونه‌ی آزمایشگاهی که در موسسه تحقیقات آب ساخته شده است در جدول ۱ آمده اند.

لازم به ذکر است که نمونه‌ی آزمایشگاهی فوق برای محدوده‌ی جریان  $16.15 \# \frac{d_c}{h} \# 1.54$ ، که شامل ۱۴ بده می‌باشد انجام گرفته است.

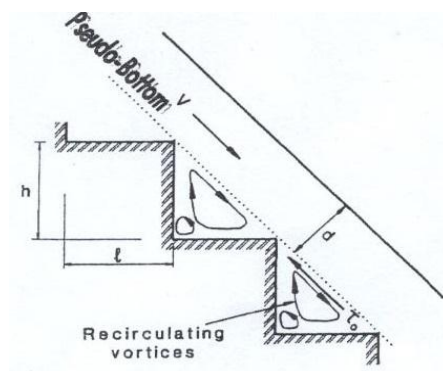
## شبکه بندی شبیه عددی

ایجاد شبکه بندی مناسب برای حل معادلات اساسی حاکم بر شبیه، یکی از بخشهای مهم در شبیه سازی می‌باشد. با ایجاد یک شبکه بندی مناسب می‌توان در حل معادلات به یک همگرایی مناسب دست یافت و بالعکس انتخاب نامناسب شبکه می‌تواند باعث ایجاد ناپایداری یا عدم همگرایی در محاسبات گردد. در روش CFD از شبکه های مختلفی مثل سازمان یافته و بی سازمان برای ایجاد دامنه‌ی محاسباتی استفاده می‌گردد. شبکه ساختار یافته دارای شبکه‌ی مربعی در حالت دو بعدی و مکعبی در حالت سه بعدی است و شبکه‌ی بی سازمان، که بیشتر برای پوشش دادن هندسه‌های نامنظم مناسب است؛ در این مطالعه برای شبکه بندی محدوده جریان از بخش Meshing در محیط Workbench بهره گرفته شده است. از آن جا که مساله مورد نظر به شدت به شبکه بندی جریان بویژه در محدوده‌ی سطح پله ها تا سطح شبکه ترک آب و هوا حساس است و شبکه بندی در این محدوده کاملاً در نتایج حاصل از تحقیق تاثیر گذار است، از اینرو در این راستا تعداد گرهای موجود در جهات و قسمت های مختلف سرریز متفاوت بوده و بعد چند مرحله‌ای حساسیت سنجی نتایج نسبت به شبکه بندی، شبکه بندی مناسب انتخاب گردید.



شکل ۱- نمایی از جریان ریزشی

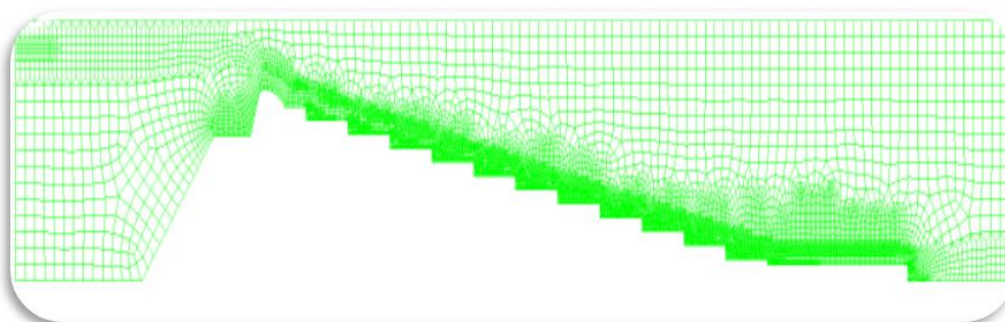
بنپارهای مورد استفاده برای این شبکه بندی از نوع مکعبی بوده و همان طور که مشخص است، ابعاد آنها در محدوده‌ی سطح پله و دیواره ها تا سطح شبکه ترک آب و هوا ریز تر، در سایر نواحی ابعاد شبکه ها درشت تر انتخاب گردیده اند (ابراهیم نژادیان، ۱۳۹۲). شبکه بندی به کمک این نرم افزار در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲- گردابه های باز چرخشی مثلثی شکل در زیر کف کاذب

جدول ۱- شبکه خصات شبیه آزمایشگاهی

نوع نمونه	تعداد پله	ارتفاع پله، متر	طول پله، متر	شیب سرریز، درجه	طول کف بند، متر
آزمایشگاهی	۱۱	۱/۳	۶/۷۵	۱۹/۲	۲۲/۵



شکل ۳ شبکه بندی به کمک نرم افزار ANSYS CFX

### شرایط مرزی

شرایط مرزی اعمال شده برای شبیه سازی عددی موضوع مورد نظر در نرم افزار ANSYS CFX به ترتیب عبارتند از: شرط مرزی ورودی (INLET)، شرط مرزی خروجی (OUTLET)، شرط مرزی (OPENING)، شرط مرزی دیواره (WALL) و شرط مرزی تقارن (SYMMETRY). شرط مرزی بده جرمی برای تعریف بده جریان، با تمام ویژگیهای غیر برداری جریان در ورودی به کار می رود. برای مرز خروجی، با توجه به زیر بحرانی بودن جریان، از یک ارتفاع شبکه خص که در قالب فشار ایستایی به مقطع اعمال گردید، بهره گرفته شد. شرط مرزی دیواره نیز برای محدود کردن نواحی سیال با مرز جامد به کار می رود که در کف حوزه‌ی محاسباتی مورد

استفاده قرار گرفت، و در نهایت برای معرفی سطح آزاد جریان به نرم افزار از شرط مرزی سطح آزاد (OPENING) بهره گرفته شد.

### انتخاب شبیه آشفتگی

یک شبیه آشفتگی عبارت است از یک رویه‌ی محاسباتی برای بستن سامانه‌ی معادلات جریان متوسط، یا معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده‌ی رینولدز (RANS) به گونه‌ای که کم و بیش بخش وسیعی از مسائل جریان را بتوان حل کرد (ورستینگ و مالاسکرا، ۱۳۸۶). در این تحقیق برای شبیه سازی مشخصه‌های آشفتگی جریان از شبیه های دو معادله‌ای استفاده شده است. برای انتخاب مناسب‌ترین شبیه‌های اغتشاشی جهت

جریان خروجی از آستانه‌ی سرریز، وارد تنداب پلکانی شده و پس از حذف کارمایه آن، و عبور از یک کف بند<sup>۱</sup> از طریق یک آبراهه شیب دار به رودخانه‌ی پایاب هدایت می‌گردد. عرض تنداب پلکانی از ابتدا تا انتها ثابت و برابر با ۶۵ متر می‌باشد. تنداب پلکانی مجموعاً از ۱۱ پله تشکیل شده است که ارتفاع هر یک برابر با ۱/۳ متر، و طول هر پله ۶/۷۵ متر می‌باشد.

### استهلاک کارمایه

مقدار استهلاک کارمایه بین دو نقطه از جریان عبارت است از: نسبت اختلاف کارمایه کلی بین آب دو نقطه، به کارمایه کل اولیه‌ی جریان، که غالباً به صورت درصد اعلام گردیده و در قالب رابطه ۱۰ نشان داده می‌شود:

$$\eta\% = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{H_1 - H_0}{H_0} \quad (10)$$

که در آن  $H_1$  بار آبی کارمایه در بالادست جریان، که در این تحقیق محل محاسبه این بار آبی کمی قبل از تاج سرریز است.  $H_0$  بار آبی کارمایه در پایین دست جریان است که در این تحقیق محل محاسبه این بار آبی در انتهای کف بند جهت جلوگیری از تأثیرات آشفتگی بر نتایج جریان، انتخاب گردید، که جهت محاسبه کارمایه کل اولیه‌ی جریان به کار می‌رود. از آن جا که ارتفاع سرریز، عمق و سرعت ورودی جریان به سرریز مشخص است، می‌توان به کمک رابطه‌ی برنولی کارمایه یک نقطه را بر روی سطح آب روی سرریز به صورت رابطه ۱۱ محاسبه نمود.

$$H_0 = y + \frac{V^2}{2 * g} + z \quad (11)$$

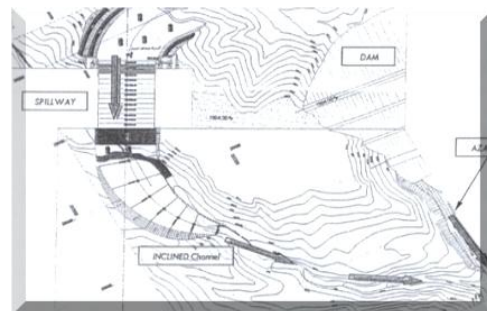
برای محاسبه کارمایه ثانویه، که معمولاً در پایین دست سرریز پلکانی در روی لبه هر کدام از پله‌ها، و یا در کف بند محاسبه می‌گردد، توجه به نکاتی حائز اهمیت است. این که با توجه به ماهیت دو حالتی جریان و ترکیب

شبیه سازی سرریزهای پلکانی، سه شبیه K-ε، RNG K-ε و شبیه تنشهای رینولدز برای مقایسه انتخاب و پس از بررسی و مقایسه نتایج آنها، گزینه برتر که شبیه آشفتگی RNG K-ε بود گزیده شد. این شبیه قابلیت بالاتری را نسبت به سایر شبیه های آشفتگی در شبیه کردن گردابه های بازچرخشی در گوشه های پله های سرریز از خود نشان داد. شبیه RNG K-ε در دو مورد نسبت به K-ε معیار، اصلاح شده، که عبارت است از یک معادله انتقال اضافی و دیگری ضرایب ثابت در دو شبیه است که با هم متفاوتند. با انجام این اصلاحات در این شبیه قابلیت های آن در شبیه کردن جریانهایی که دچار جدایی و چرخش هستند، نسبت به شبیه K-ε معیار بیشتر می‌شود.

### نمونه‌ی آزمایشگاهی

الگوی ساخته شده در واقع نمونه‌ی هیدرولیکی جزئی سرریز سد هرات (خوانسار یزد) با مقیاس ۱:۲۰ می‌باشد. شامل مقطعی از سرریز به عرض ۱۱ متر (از کل ۶۵ متر) بدون احداث آبراهه‌ی ورودی بالادست، دیواره های هدایت جریان و پستی و بلندی پیرامون آن است. سد مخزنی هرات (خوانسار یزد) به منظور تامین آب مورد نیاز آبیاری اراضی منطقه احداث می‌گردد. این سد بر روی رودخانه اعظم و در جنوب شهر یزد و جنوب غربی شهر هرات ساخته می‌شود.

این سد از نوع خاکی با هسته‌ی ناتراوای رسی بوده و ارتفاع آن ۴۵/۵ متر از کف رودخانه‌ی می‌باشد. تراز تاج سد ۱۹۶۳/۵ متر بالاتر از سطح دریا قرار می‌گیرد. سامانه‌ی اصلی تخلیه سیلاب سد، یک سرریز آزاد منتهی به یک تنداب پلکانی است که در جناح راست سد واقع شده است



شکل ۴- جانمایی سرریز و پستی و بلندی منطقه احداث

سد

<sup>۱</sup> - apron

بنابراین، برای محاسبه‌ی کارمایه ثانویه نیز از همان رابطه- ۵۱-۳ در مکان مورد نظر استفاده می‌گردد با این تفاوت که عمق و سرعت در این رابطه، بنابر دلایل ذکر شده در بالا، معادل عمق و سرعت در ۷۰٪ هوا اندازه گیری می‌شوند.

### نتایج حاصل از شبیه سازی عددی

در ادامه، پس از ارائه‌ی نتایج مربوط به صحت سنجی، نتایج حاصل از تغییر در هندسه‌ی پله، که به صورت دو پیکر بندی متفاوت از هندسه نمونه‌ی فیزیکی می‌باشند، ارائه می‌گردند. در جدول ۲ مشخصات هر کدام از پیکر بندیها آمده‌اند.

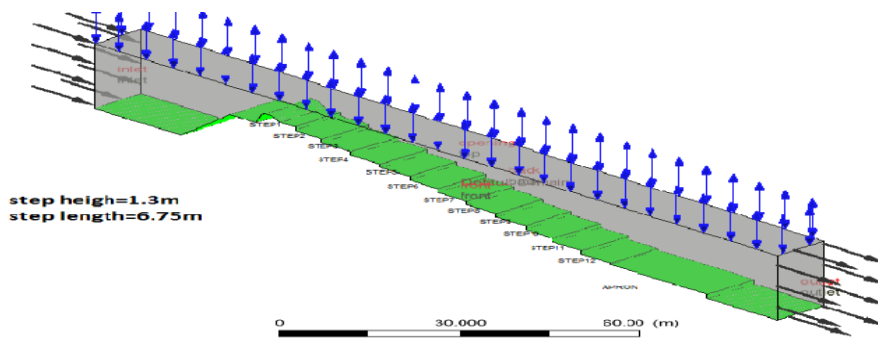
نمایی از سه نمونه عددی که در جدول ۲ ذکر گردیده و در نرم افزار ANSYS CFX ساخته شده، در شکل‌های ۴ تا ۶ ارائه گردیده‌اند.

شدن آب و هوا در حین جریان بر روی سرریز پلکانی، عمق خالصی که فقط شامل آب باشد کدام است، چه، جریان بر روی پله‌ها، شکل ورودی به سرریز را نداشته و بعد از نقطه‌ی شروع هوادهی، آب خالصی وجود ندارد که تحت عنوان عمق معرفی شود.

در این تحقیق عمق آب تا جایی محاسبه شده است که میزان هوا در آن حدود ۷۰ درصد حجمی باشد، چه، یکی از وسایل اندازه گیری سرعت لوله پیتوت است، و این لوله در درصد هوای بالای ۷۰٪ عملکرد خود را از دست می‌دهد، لذا، در نمونه‌ی آزمایشگاهی مجبور بودند که قرائت خود را تا این عمق انجام داده و میانگین گیری را نیز تا همان عمق انجام دهند. از آن جا که جریان با درصد هوای بالای ۷۰٪ به صورت پودر در می‌آید، و می‌توان گفت که در این محدوده تقریباً آبی وجود ندارد که بخواهد به عنوان بخشی از عمق جریان دخالت کند،

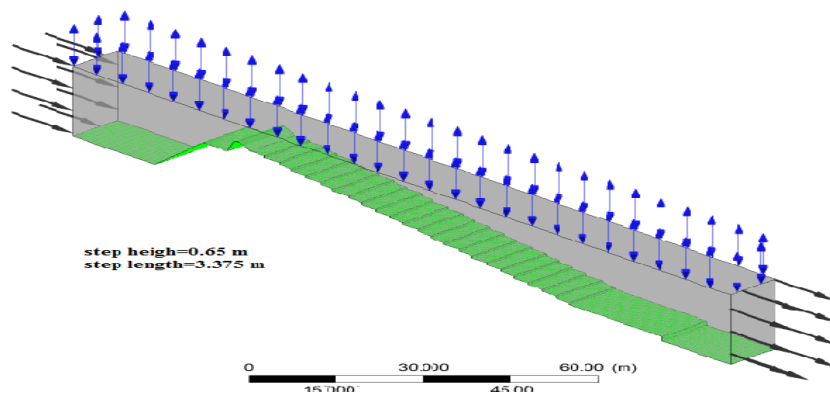
### جدول ۲- شبکه خصات پله ها در شبیه عددی و نمونه‌ی آزمایشگاهی

توضیحا	نوع شبیه
شامل ۱۲ پله، ۱۱ پله با ارتفاع ۱/۳ و طول ۶/۷۵ متر و پله ابتدایی با ارتفاع ۱/۳ و ۳/۴۰ متر هندسه شبکه ابه نمونه آزمایشگاهی	شبیه فیزیکی شبیه عددی ۱
شامل ۲۳ پله، ۲۲ پله با ارتفاع ۰/۶۵ و ۳/۳۷۵ متر و پله ابتدایی با ارتفاع ۰/۶۵ و ۳/۴۰ متر	شبیه عددی ۲
شامل ۱۷ پله، ۱۱ پله با ارتفاع ۰/۶۵ و ۳/۳۷۵ متر و ۶ پله با ارتفاع ۱/۳ و ۶/۷۵ متر	شبیه عددی ۳

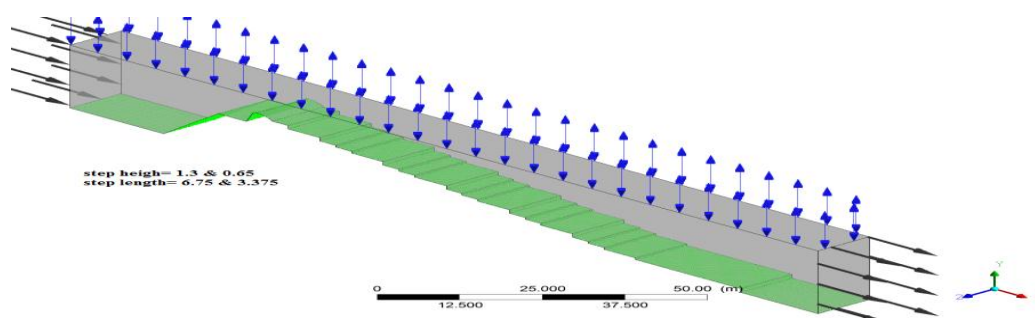


شکل ۴- هندسه‌ی شبیه عددی ۱





شکل ۵- هندسه‌ی شبیه عددی ۲



شکل ۶- هندسه‌ی شبیه عددی ۳

پیکر بندی متفاوت از نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته شد و نتایج مربوط به استهلاک بر اثر این تغییر هندسه استخراج و مورد مقایسه و بحث قرار می‌گیرند، که نتایج آن در جدول های ۴ تا ۶ ارائه شده اند.

نخست نتایج مربوط به صحت سنجی<sup>۱</sup> شبیه عددی ۱ با نتایج نمونه‌ی فیزیکی ارائه می‌گردند، که این صحت سنجی شامل مقایسه‌ی نتایج مربوط به استهلاک کارمایه<sup>۲</sup> و نوع جریان حاکم در دو شبیه مذکور می‌باشند.

مقدار خطای نتایج بنابر مقادیر جدول فوق بطور میانگین کمتر از ۲٪ است. (انطباق نتایج دو شبیه عددی و نمونه-ی آزمایشگاهی، درص خطای ناچیز هر دو، حکایت از صحت شبیه عددی دارد). در ادامه‌ی مقایسه‌ی بین نتایج شبیه عددی ۱ و نمونه‌ی فیزیکی، به انواع جریان حاکم بر سرریز به ازای محدوده‌ی بده‌های اعمالی در سرریز پلکانی مذکور اشاره می‌کنیم.

همان گونه که نتایج مربوط به نوع جریان حاکم و استهلاک کارمایه نشان می‌دهند نتایج شبیه عددی و نمونه‌ی آزمایشگاهی دارای انطباق قابل قبولی می‌باشند. پس از صحت سنجی شبیه عددی، دو شبیه عددی با

<sup>۱</sup>- Verification

<sup>۲</sup>- Energy Dissipation

جدول ۳- نتايج استهلاك كارمايه براي نمونه آزمايشگاهي و شبیه عددی ۱

Q(m <sup>3</sup> /s)	q(m <sup>3</sup> /s/m)	نوع جریان	استهلاك كارمايه(%)		
			PMOD(η%)	NMOD1(η%)	E(%)
۱۰۰	۱/۵۴	ريزشي	-	۹۱/۱۴	-
۱۵۰	۲/۳۱	ريزشي	۸۷/۸۱	۸۷/۰۳	۰/۷۸
۲۰۰	۳/۰۸	ريزشي	۸۳/۳۹	۸۲/۶۲	۰/۷۷
۲۶۴	۴/۰۶	انتقالي	۸۲/۵۴	۸۱/۶	۰/۹۴
۳۰۰	۴/۶۲	انتقالي	۷۹/۷	۷۸/۹۵	۰/۷۵
۴۰۰	۶/۱۵	انتقالي	۷۴/۳۹	۷۳/۱۹	۱/۱
۵۰۰	۷/۶۹	انتقالي	۷۲/۱۲	۷۱/۰۴	۱/۰۸
۵۵۵	۸/۵۴	انتقالي	۷۱/۴۲	۷۰/۱۹	۱/۲۳
۶۰۰	۹/۲۳	لغزشي	۶۶/۸۱	۶۵/۲۷	۱/۵۴
۷۰۰	۱۰/۷۷	لغزشي	۶۰/۰۶	۵۸/۵۵	۱/۵۱
۸۰۰	۱۲/۳۱	لغزشي	۵۸/۶۴	۵۷/۳۱	۱/۳۳
۹۰۰	۱۳/۸۵	لغزشي	۵۶/۵۵	۵۵/۳۸	۱/۱۷
۱۰۰۰	۱۵/۳۸	لغزشي	۵۴/۷۲	۵۳/۳۹	۱/۳۳
۱۰۵۰	۱۶/۱۵	لغزشي	۵۲/۶	۵۱/۵۶	۱/۰۴

جدول ۴- نتايج روند استهلاك كارمايه بين شبیه عددی ۲ با شبیه عددی ۱ و نمونهی آزمايشگاهي

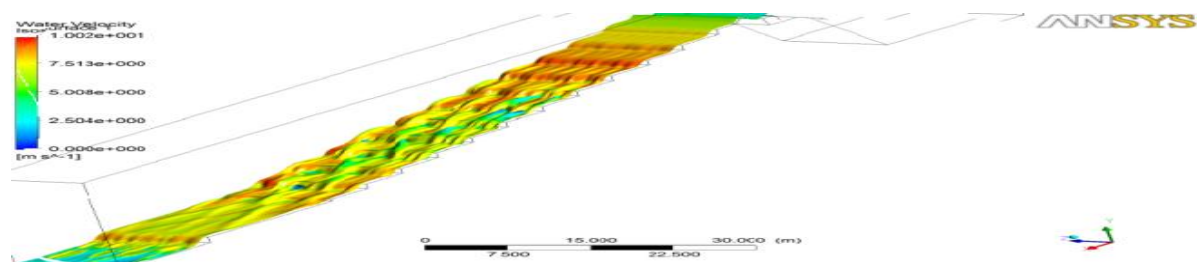
Q(m <sup>3</sup> /s)	q(m <sup>3</sup> /s/m)	نوع جریان	استهلاك كارمايه(η%)					
			PMOD	NMOD1	E1(%)	NMOD2	E2(%)	E3(%)
100	1.54	ريزشي	-	91.14	-	87.66	-	-
150	2.31	ريزشي	87.81	87.03	0.78	85.44	2.37	1.59
200	3.08	ريزشي	83.39	82.62	0.77	78.82	4.57	3.8
264	4.06	انتقالي	82.54	81.6	0.94	74.43	8.11	7.17
300	4.62	انتقالي	79.7	78.95	0.75	72.79	6.91	6.16
400	6.15	انتقالي	74.29	73.19	1.1	67.43	6.86	5.76
500	7.69	انتقالي	72.12	71.04	1.08	60.17	11.95	10.87
555	8.54	انتقالي	71.42	70.19	1.23	57.68	13.74	12.51
600	9.23	لغزشي	66.81	65.27	1.54	53.775	13.035	11.49
700	10.77	لغزشي	60.06	58.55	1.51	46.28	13.78	12.27
800	12.31	لغزشي	58.64	57.31	1.33	40.24	18.4	17.07
900	13.85	لغزشي	56.55	55.38	1.17	37.65	18.9	17.73
1000	15.38	لغزشي	54.72	53.39	1.33	34.44	20.28	18.95
1050	16.15	لغزشي	52.6	51.56	1.04	32.05	20.55	19.51

جدول ۵- نتایج روند استهلاک کارمایه برای شبیه عددی NMOD3 و نمونه‌ی آزمایشگاهی

Q(m <sup>3</sup> /s)	q(m <sup>3</sup> /s/m)	نوع جریان	استهلاک کارمایه(%)					
			PMOD	NMOD1	E1(%)	NMOD3	E3(%)	E4(%)
100	1.54	ریزشی	-	-	-	-	-	-
150	2.31	ریزشی	87.81	87.03	0.78	85.61	2.2	1.42
200	3.08	ریزشی	83.39	82.62	0.77	77.54	5.85	5.08
264	4.06	انتقالی	82.54	81.6	0.94	75.15	7.39	6.45
300	4.62	انتقالی	79.7	78.95	0.75	73.03	6.67	5.92
400	6.15	انتقالی	74.29	73.19	1.1	68.51	5.78	4.68
500	7.69	انتقالی	72.12	71.04	1.08	63.01	9.11	8.03
555	8.54	انتقالی	71.42	70.19	1.23	60.74	10.68	9.45
600	9.23	لغزشی	66.81	65.27	1.54	58.04	8.77	7.23
700	10.77	لغزشی	60.06	58.55	1.51	50.93	9.13	7.62
800	12.31	لغزشی	58.64	57.31	1.33	47.55	11.09	9.76
900	13.85	لغزشی	56.55	55.38	1.17	44.89	11.66	10.49
1000	15.38	لغزشی	54.72	53.39	1.33	42.86	11.86	10.53
1050	16.15	لغزشی	52.6	51.56	1.04	40.49	12.11	11.07

حالی که در نوع جریان ریزشی، که عامل اصلی استهلاک کارمایه تشکیل آبشارهای متوالی و برخورد فشانه‌ها با کف پله است، با افزایش تعداد پله، استهلاک افزایش می‌یابد. نمایی از گردابه‌های بازچرخشی تشکیل یافته در دو شبیه عددی در شکل‌های ۱۰ ارائه شده است.

مقایسه نتایج شبیه عددی ۲ با شبیه عددی ۱ و نمونه‌ی آزمایشگاهی حاکی از کاهش میزان استهلاک کارمایه در این شبیه بود. البته روند کاهش استهلاک کارمایه در نوع جریان ریزشی کمتر از نوع جریان لغزشی است. دلیل این امر آن است که در نوع جریان لغزشی عامل اصلی استهلاک، گردابه‌های باز چرخشی مثلثی شکل در گوشه‌ی پله‌ها می‌باشد که در هندسه‌ی عددی ۲ با کاهش همزمان طول و ارتفاع پله ابعاد این گردابه‌ی بازچرخشی به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، و در نتیجه، میزان استهلاک کارمایه کاستی می‌پذیرد در



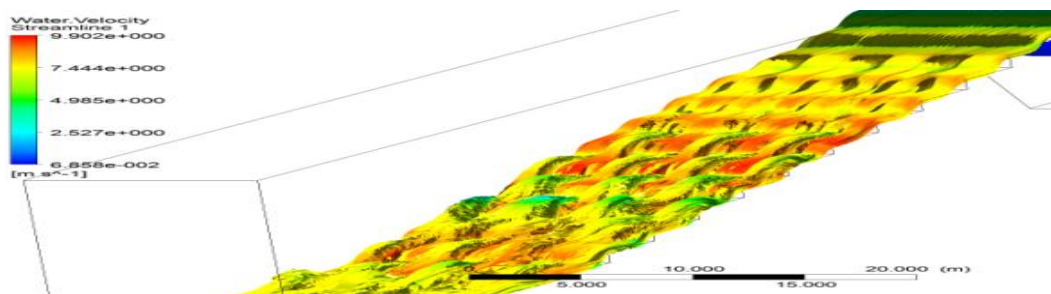
شکل ۷- سطح آب در جریان ریزشی و انتقالی در بدهی ۱۵۰  $\frac{m^3}{s}$

پیکر بندی و هندسه‌ی متفاوت و غیر یکنواخت نسبت به شبیه عددی شماره ۱ می‌باشد، ارائه می‌شود.

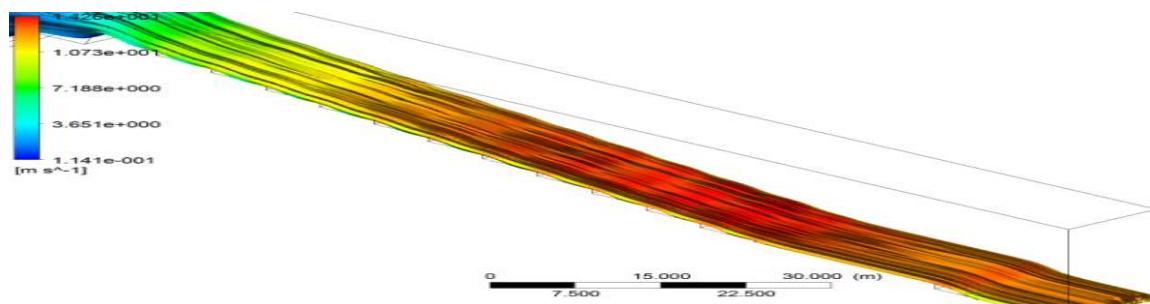
در ادامه این تحقیق نتایج مربوط به استهلاک کارمایه به ازای تمامی بده‌های اعمالی در شبیه عددی ۳، که دارای

كارمايه در اين شبويه نسبت به شبويه ۲ كمتر بود كه آن هم به دليل وجود پله هايي با ارتفاع ۱/۳ در پيكر بندي اين شبويه نسبت به شبويه ۲ مي باشد.

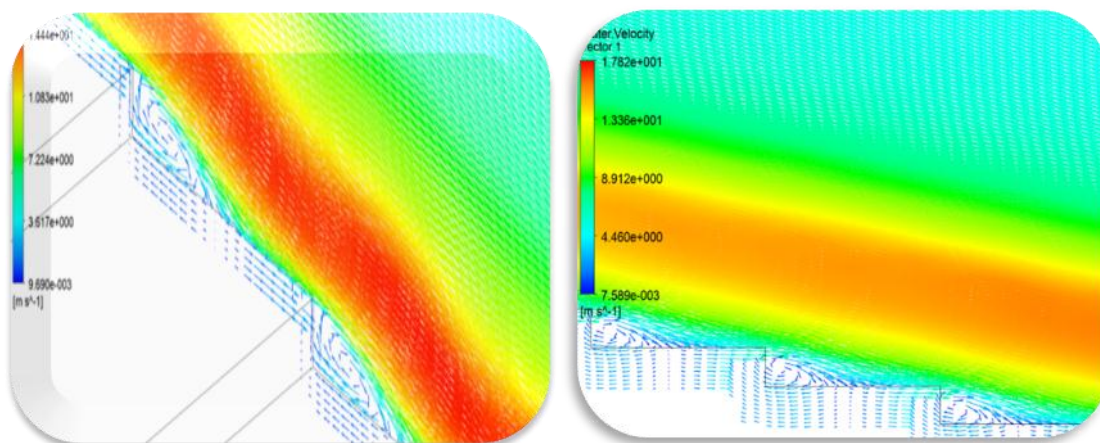
مقايسه و بررسي نتايج شبويه عددي ۳ با نتايج شبويه عددي ۱ و نمونه‌ي آزمايشگاهي حاكي از كاهش ميزان استهلاك در اين شبويه بود. البته كاهش ميزان استهلاك



شكل ۸- سطح آب در جريان انتقالی در بدهی  $\frac{m^3}{s}$  ۲۶۴



شكل ۹- خطوط جريان در جريان لغزشی در بدهی  $\frac{m^3}{s}$  ۶۰۰



شكل ۱۰- نمايي از گردابه هاي باز چرخشي مثلثي شكل در شبويه هاي عددي ۱ و ۲

## نتیجه گیری

بررسی نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی و شبیه عددی ۱ حاکی از صحت شبیه عددی و نشان از قابلیت بالای نرم افزار پویایی سیال محاسباتی ANSYS CFX برای شبیه سازی جریان بر روی سرریزهای پلکانی دارد.

در تمامی هندسه‌ها، با افزایش بده، نرخ استهلاک کارمایه کاهش پیدا می کند.

نرخ استهلاک کارمایه در سرریزهای پلکانی با کاهش ارتفاع پله‌ها کاستی می پذیرد. علاوه بر این، با کاهش ارتفاع پله، نقطه‌ی شروع هوادهی به پایین دست سرریز میل می کند.

نتایج در تمامی هندسه‌ها و پله‌ها با ارتفاع غیر یکنواخت نشان از تفاوت حداقلی استهلاک کارمایه در محدوده‌ی نوع جریان ریزشی و تفاوت حداکثری در نوع لغزشی را داشت، و این تفاوت در هر دو پیکر بندی با ارتفاع پله‌ی یکنواخت و غیر یکنواخت مشاهده گردید.

غیر یکنواخت کردن پله‌ها تاثیری در روند کاهش استهلاک کارمایه در سرریزهای پلکانی نسبت به پله با ارتفاع یکنواخت با افزایش بده ندارد؛ و به عبارتی، با افزایش بده، کاهش نرخ استهلاک کارمایه در هر دو پیکربندی با ارتفاع پله یکنواخت و غیر یکنواخت رخ می - دهد.

غیر یکنواخت کردن ارتفاع پله‌ها باعث ایجاد ناپایداری در جریان بر روی سرریزهای پلکانی نسبت به پله با ارتفاع یکنواخت می گردد.

## Refrence

۱. ابراهیم نژادیان، حمزه. ۱۳۹۲. تعیین تاثیر هندسه پله بر نرخ استهلاک کارمایه در سرریزهای پلکانی با شبیه عددی ANSYS CFX. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب، دانشگاه زابل
۲. ابراهیمی، ن.، م. کاشفی پور، و ک. ابراهیمی، ۱۳۸۴. بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان بر روی شبیه توریسنگی پلکانی. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

۳. حیدری ارجلو، س.، ح. موسوی جهرمی، و س. فرازمنند، ۱۳۸۸. بررسی تاثیر شیب بر میزان افت کارمایه نسبی صورت گرفته در سرریزهای پلکانی با استفاده از شبیه فیزیکی. هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، شیراز، دانشگاه شیراز.

۴. سلطانی، م.، م. و. رحیمی اصل، ۱۳۸۶. پویایی سیال محاسباتی به کمک نرم افزار FLUENT، چاپ چهارم، نشر طراح، تهران.

۵. رسائی، م.، ع. شیرافروس، و ا. نادری راد، ۱۳۹۰. مقایسه میزان استهلاک کارمایه قبل و بعد از جهش هیدرولیکی در سرریزهای پلکانی با استفاده از شبیه آزمایشگاهی. نخستین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی منابع آب ایران، کرمانشاه، دانشگاه صنعتی کرمانشاه.

۶. ورستیگ، ه. ک، و، مالالاسکرا. ۱۳۸۶. مقدمه ای بر پویایی سیال محاسباتی. ترجمه شجاعی فرد، م. ح، نورپورهشترودی، ع. د. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه علم و صنعت. تهران.

۷. چانسون، هابرت. ۱۳۸۴. هیدرولیک تند آب‌ها و سرریزهای پلکانی، ترجمه دکتر ابوالفضل شمسایی، چاپ اول، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

۸. گروه سازه‌های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب، (۱۳۸۴)، گزارش آزمایش های اولیه شبیه هیدرولیکی جزئی سرریز سد هرات (خوانسار یزد).

۹. گروه سازه های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب، (۱۳۸۴)، گزارش طراحی اولیه شبیه هیدرولیکی جزئی سرریز سد هرات (خوانسار یزد).

10. Boyes, R. M. and W. H. Hager, 2003b. Hydraulic design of stepped spillways. *J. Hydraul. Eng, ASCE*, 129: 671-679.
11. Chanson, H. 2002. The hydraulics of stepped chute and spillways, Bulkema Publ., The Netherlands. p140-180.
12. Chanson, H., and L. Toombes, 2004. Hydraulic of stepped chutes: Transition flow. *J. Hydraul Res*, 42: 43-54.

- Simulation of flow over stepped spillway, *Computers and Structures*, 83: 2215-2224.
15. Xiangju, C., C. Yongcan, and L. Lin, 2006. Numerical simulation of air-water two- phase flow over stepped spillway, *Technol. Sci.* 49: 674-684.
  13. Eghbalzadeh, A. and M. Javan, 2012. Comparison of mixture and VOF methods for numerical simulation of air-entrainment in skimming flow over stepped spillways. International Conference on Modern Hydraulics Engineering. Procedia Engineering.
  14. Tabbara, M., J. Chatila, and R. Awwad, 2005. Computational