

## الگوی جریان و استهلاك کارمایه در سرریزهای پلکانی با ارتفاع پله غیریکنواخت با کاربرد

### نرم افزار ANSYS CFX

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

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۳/۲/۷

### چکیده

استفاده از سرریزهای پلکانی، به علت هزینه‌ی ساخت پایین و بازدهی بالای آن، بطور فزاینده‌ای رو به افزایش است. از این رو، مطالعات نیز در این زمینه با رشد و توجه زیادی از سوی مهندسين سدساز همراه بوده، ولی اغلب این مطالعات در زمینه‌ی سرریزهای پلکانی با ارتفاع پله یکنواخت می‌باشند، در حالی که ارتفاع پله غیریکنواخت نیز می‌تواند در بعضی حالات به عنوان یک گزینه مطرح گردد. در این تحقیق یک نمونه‌ی فیزیکی از سد هرات برای سرریز پلکانی با ارتفاع ۱/۳ متر و شیب ۱۹/۲ درجه برای صحت‌سنجی شبیه عددی استفاده شد، سپس سه نوع پیکربندی پلکانی با استفاده از پویایی سیال محاسباتی در قالب نرم‌افزار ANSYS CFX برای محدوده‌ی جریان  $1.54 \leq \frac{d_c}{h} \leq 16.15$  مورد آزمایش قرار گرفتند. شبیه‌سازی جریان دو حالتی آب و هوا برای هر یک از پیکربندیها و تمامی محدوده‌ی بده‌ها صورت پذیرفت و نتایج در زمینه‌های الگوی جریان، استهلاك کارمایه و نقطه‌ی شروع هوادهی جریان مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان از تفاوت حداقلی استهلاك کارمایه در محدوده‌ی رژیم جریان ریزشی و تفاوت حداکثری در رژیم لغزشی را داشتند.

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

<sup>۱</sup>- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران آب، دانشگاه زابل.

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

\*- نویسنده مسئول: H.ebrahimnejadian@gmail.com

## مقدمه

کاربرد سرریزهای پلکانی به حدود ۳۵۰۰ سال پیش باز می‌گردد. از جمله نخستین 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 و تومبز، ۱۳۸۴). سرریزهای پلکانی در انواع مختلف سدها از جمله سدهای بتن غلتکی کارایی داشته و در دهه‌های اخیر با توجه به پیشرفت دانش و فنهای جدید و کاربرد مصالح بتن غلتکی<sup>۱</sup> این سرریزها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله مزایای این استهلاک کارمایه می‌توان به این موارد اشاره کرد: ۱- هزینه اجرای پایین ۲- کوتاه شدن زمان اجرا ۳- بهره‌برداری و نگهداری آسان ۴- افزایش میزان افت کارمایه ۵- زیبایی در حین بهره‌برداری ۶- سازگاری با دانش و فن جدید (سدهای بتن غلتکی). پیشرفت دانش و فن سبب شده است که امروزه سدهای بسیار بزرگی ساخته شوند. برای نمونه سدهای کرخه و کارون که ساخته شده‌اند، و سد بختیاری که در دست مطالعه است، جزء سدهای بزرگ ایران به شمار می‌روند. سد بختیاری، با ارتفاع بیش از ۳۰۰ متر بلندترین سد بتنی دو قوسی دنیا به حساب می‌آید. با دانستن دانش و فن پیشرفته ساخت سدهایی جدید در دست مطالعه است. سد بتن غلتکی جزء دانش و فنهای روز دنیا به شمار می‌آید. در کشور ما و در حال حاضر در سیاه‌بیشه، هرات یزد (سرریز مورد مطالعه در این تحقیق) و دیگر نقاط کشور سدهایی با این دانش و فن در دست ساختمان است. ارتفاع زیاد سدها سبب می‌شود که کارمایه‌ی زیادی در پشت سدها ذخیره شود که هنگام تخلیه و آبیگری سرعت آب به میزان بسیار بالایی افزایش یابد و پدیده‌هایی همچون حباب‌زایی، فرسایش و تخریب بستر نهرها و رودهای پایین دست را به وجود آورد. از این‌رو یک سامانه‌ی استهلاک کارمایه به نام سرریز در پایاب سد طراحی و ساخته می‌شود. هر چه سد از ارتفاع بلندتری برخوردار باشد، به سامانه‌ی استهلاک کارمایه کارآمدتری نیاز دارد. سدهای بتن غلتکی نیز، اگر چه اجرایی مشابه را با سدهای خاکی دارند، ولی به دلیل ارتفاع بیشتر که

می‌توانند نسبت به سدهای خاکی داشته باشند، نیازمند سرریزها و سامانه‌های استهلاک کارآمدتری هستند.

## بررسی پیشنهاد تحقیق

ابراهیمی و همکاران (۱۳۸۴)، متغیرهای آبی جریان همچون فشار، سرعت و میزان استهلاک کارمایه را با انجام یک مطالعه آزمایشگاهی در مورد یک نمونه‌ی سرریز پلکانی توریسنگی را با سه شیب کلی ۱:۱، ۲:۱ و ۳:۱ مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌ی ساخته شده برای بدهای ۸۰، ۶۰، ۴۰، ۲۰، ۱۰۰ و برای شرایط نفوذپذیری و نفوذناپذیری کف مورد آزمایش قرار گرفت و فراسنجهای آبی ذکر شده اندازه‌گیری شدند. نتایج حاصله نشان دادند که با افزایش بدهی جریان، استهلاک کارمایه کاهش می‌یابد، بطوری که در نمونه‌ی نفوذپذیر با شیب ۳:۱ و بده حداکثر کمترین درصد افت کارمایه، و در نمونه‌ی نفوذناپذیر 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 پله متفاوت از سرریزهای پلکانی و انجام آزمایشهای متعدد با کاربرد آنها، میزان افت کارمایه را در سرریزها مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصله نشان دادند که افت کارمایه نسبی تابعی از بدهی جریان بوده و با افزایش بدهی 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.

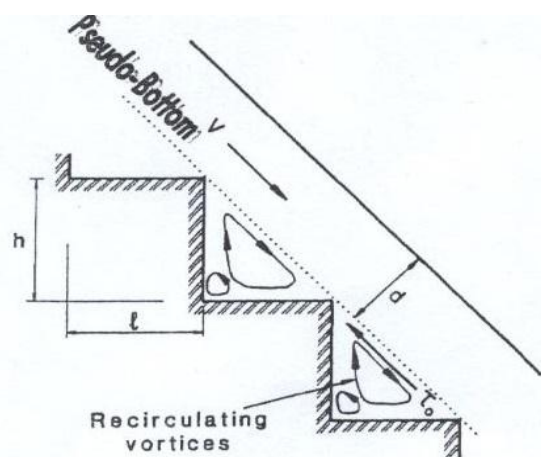
رسائی و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از نمونه‌های فیزیکی ساخته شده در دانشگاه شهید چمران اهواز و عبور جریان بر روی سرریزهای پلکانی، عمق آب قبل و بعد از وقوع پرش آبی را اندازه گرفتند. نتایج این تحقیق نشان دادند که به علت ورود هوا به داخل جریان آب عبوری از روی سرریزهای پلکانی، استفاده از عمق آب قبل از پرش آبی 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 گرانشی)، از میزان تنش برشی کاسته شده و در نتیجه این که ویژگی

<sup>1</sup> - Roller compacted concrete (RCC)

عاملهای اصلی استهلاک در این رژیم عبارتند از: ۱- انتشار فشانه در هوا ۲- برخورد فشانه با کف پلکان ۳- تشکیل پرش آبی کامل یا ناقص

## 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 روان گشته و دارای نیمرخ سرعت توانی است (مانند نهرهای رو باز) و در زیر این خط جریان، به مرور جریانهای چرخشی شروع به پدید آمدن می‌کنند (Chanson and Gonzalez, 2005).



شکل ۲- گردابه‌های باز چرخشی مثلثی شکل در زیر کف کاذب

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

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

۲-۱- چگونگی تشخیص نوع رژیم جریان در انواع

سرریز

محققان مختلفی روابطی را برای تشخیص نوع رژیم جریان در سرریزهای پلکانی به صورت آزمایشگاهی ارائه داده‌اند.

استهلاک کارمایه نسبی کاهش می‌یابد. همچنین، ورود حبابهای هوا به داخل جریان باعث افزایش آن شده، و اندازه‌گیری عمق جریان را با خطا همراه می‌سازد.

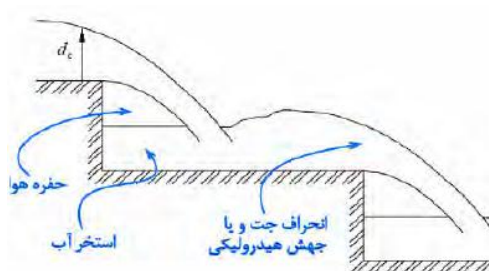
اقبال‌زاده و جوان (۲۰۱۲) برای بررسی قابلیت و توانایی شبیه‌های اختلاطی *VOF* و *Mixture*، ساز و کار هواگیری و ورود هوا به جریان را در جریان لغزشی بر روی سرریزهای پلکانی را با استفاده از نرم‌افزار *Fluent* شبیه‌سازی کردند. آنها نتایج شبیه‌سازی عددی سطح آزاد، مؤلفه‌های سرعت و غلظت هوا در آب را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. آنها دریافتند که در پایین دست نقطه‌ی شروع هوادهی، در جایی که هوادهی سریع سطح آزاد قابل مشاهده است، سطح آزاد به وسیله‌ی شبیه اختلاطی *Mixture* بهتر شبیه 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):

۱- جریان ریزشی<sup>۱</sup> (*Nappe Flow*): در بده‌های

کم، جریان عبوری از سازه پلکانی به صورت جریانهای (فشانه‌های) 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 ممکن است بر حسب مقدار بده عبوری بعد از برخورد، با یک جهش آبی کامل (*NA 1*)، یا یک جهش آبی ناقص (*NA 2*) و یا بدون تشکیل جهش آبی (*NA 3*) توأم باشد (Chanson and Toombes, 2004).



شکل ۱- نمایی از جریان ریزشی

<sup>۲</sup> - skimming flow

<sup>۳</sup> - transition flow

<sup>۱</sup> - nappe flow

(۵)

$$\frac{E_L}{E_1} = 1 - \frac{0.54 \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0.275} + 10715 \left(\frac{d_c}{h}\right)^{-0.55}}{1.5 + \frac{H_{dam}}{d_c}}$$

بویس و هگر نیز در سال (۲۰۰۳) رابطه‌ی (۶) را برای محاسبه‌ی استهلاک کارمایه در رژیم جریان لغزشی بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی خود ارائه دادند:

(۶)

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \exp\left(-0.45 \frac{k}{Nh}\right)^{0.1} (\sin \theta)^{-0.8} \frac{H_{dam}}{d_c}$$

علاوه بر این، برای بررسی استهلاک کارمایه در رژیم جریان ریزشی چمنی و راجاراتنام روش زیر را ارائه نمودند. با فرض یک سرریز پلکانی با  $l$  طول افقی برای هر پله،  $N$  تعداد کل پله‌ها و  $\alpha$  ضریب افت کارمایه برای هر پله باشد:

$$\frac{E_L}{E_1} = 1 - \frac{\left\{ (1-\alpha)^N \left[ 1 + 1.5 \left(\frac{y_c}{h}\right) \right] + \sum_{i=1}^{N-1} (1-\alpha)^i \right\}}{N + 1.5 \left(\frac{y_c}{h}\right)} \quad (7)$$

آنها رابطه‌ی ۸ را برای محاسبه  $\alpha$  ارائه دادند:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = a - b \times \log\left(\frac{y_c}{h}\right) \\ \alpha = 0.3 - 0.35 \left(\frac{h}{l}\right) \\ \alpha = 0.54 + 0.27 \left(\frac{h}{l}\right) \end{array} \right. \quad (8)$$

### شبیه‌سازیهای عددی جریان بر روی سرریزهای

#### پلکانی

تابارا و همکاران (۲۰۰۵) به کمک نرم‌افزار ADINA و شبیه‌آشفنگی K-ε شبیهی عددی را از یک شبیه‌ی فیزیکی تهیه کرده، و این دو شبیه را در دو زمینه‌ی استهلاک کارمایه و عمق جریان با نمونه‌ی واقعی مورد مقایسه قرار داده و نتیجه گرفتند که ساختن شبیه عددی از سرریزهای پلکانی می‌تواند نتایج مناسبی از مشخصه‌های جریان را به همراه داشته باشد.

چانسون (۲۰۰۱) آزمایشهایی را در مورد سرریزهای پلکانی انجام داد و نتایج کار خود را برای تشخیص سرریزهای پلکانی برای محدوده‌ی  $1.54 \leq \frac{d_c}{h} \leq 16.15$  به صورت دو رابطه‌ی (۱) و (۲) ارائه نمود، که در آنها  $\alpha$  شیب سرریز و  $d_c$  عمق بحرانی مورد نیاز برای تغییر نوع جریان است:

$$\frac{d_c}{h} \leq 0.89 - 0.4 \tan \alpha \quad (1)$$

$$\frac{d_c}{h} \leq 1.2 - 0.325 \tan \alpha \quad (2)$$

اگر چنانچه نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله  $\frac{d_c}{h}$  از رابطه‌ی (۱) کوچکتر و از رابطه‌ی (۲) بزرگتر باشد، جریان انتقالی را نشان می‌دهد.

بویس و هگر (۲۰۰۳) نیز رابطه‌ی (۳) را برای تشخیص رژیم جریان در سرریزهای پلکانی در تحقیق خود ارائه داده‌اند:

$$\frac{d_c}{h} \leq 0.91 - 0.41 \tan \alpha \quad (3)$$

در صورتی که نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله  $\frac{d_c}{h}$  از رابطه‌ی (۳) بزرگتر باشد، جریان لغزشی، و در غیر این صورت رژیم جریان ریزشی خواهد بود.

### روابط انگاره‌ای در زمینه‌ی استهلاک کارمایه

چانسون و تومبس (۲۰۰۴) رابطه‌ی (۴) را برای محاسبه‌ی استهلاک کارمایه در سرریزهای پلکانی ارائه نمودند. در این رابطه ( $f$ ) ضریب اصطکاک جریان نام دارد که آنها مقدار آن را بر اساس آزمایشهای خود برای  $10 < \alpha < 5$  حدود  $1/3$  در نظر گرفتند:

(۴)

$$\frac{E_L}{E_1} = 1 - \left( \frac{f_b}{8 \times \sin \alpha} \right)^{\frac{1}{3}} \times \cos \theta + \frac{1}{2} \left( \frac{f_b}{8 \times \sin \alpha} \right)^{\frac{2}{3}} / \left( \frac{2}{3} + \frac{H_{dam}}{d_c} \right)$$

چانسون (۲۰۰۲) محاسبه‌ی افت کارمایه را در رژیم جریان ریزشی در سرریزهای پلکانی به صورت رابطه‌ی (۵) ارائه داد، که در آن  $H_{dam}$  ارتفاع کل سرریز،  $d_c$  عمق بحرانی،  $h$  ارتفاع پله،  $E_1$  کارمایه کل در بالادست و  $E_L$  کارمایه مستهلک کننده می‌باشند.

برای تغییر متغیرها، بالا بودن سرعت محاسبات و ارزانتر بودن آن نسبت به نمونه‌سازیهایی آزمایشگاهی بیان کرد. برای بهره‌گیری از روشهای عددی، به دلیل بالا بودن حجم محاسبات، ناگزیر به استفاده از نرم‌افزارهای محاسباتی هستیم (ورستینگ و مالاسکرا، ۲۰۰۶). این نرم‌افزارهای محاسباتی 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 فراهم می‌سازد. در ادامه به معرفی نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق پرداخته می‌شود.

### نرم افزار ANSYS CFX

نرم‌افزار ANSYS CFX، یک نرم‌افزار با هدف عمومی پویایی سیال محاسباتی است که یک حلگر پیشرفته را با قابلیت‌های پیش و پس پردازشگر قدرتمند ترکیب کرده و توانایی شبیه‌سازی مواردی از قبیل جریانهای پایدار و ناپایدار، دایمی و غیر دایمی، جریانهای آرام و آشفته، جریانهای مادون صوت و در حد صوت و مافوق صوت، نیروهای شناوری و ..... را دارا می‌باشد. نرم‌افزار ANSYS CFX برای گسسته‌سازی معادلات حاکم بر محیط جریان از روش حجم محدود مبتنی بر بن‌پار استفاده می‌کند. در این نرم‌افزار دو شبیه مجزای اوپلرین - اوپلرین برای جریان چند حالتی و شبیه ردیابی ذرات لاگرانژی موجود است. جهت شبیه‌سازی سطح آزاد از دو زیر شبیه جریان همگن چند حالتی و جریان غیر همگن چند حالتی ارائه شده است (ANSYS CFX user Manual, 2010).

### شبیه‌سازی عددی سرریزهای پلکانی

یکی از راههای بررسی پدیده‌های فیزیکی بهره‌گیری از پویایی سیال محاسباتی<sup>۱</sup> است. از جمله این پدیده‌های فیزیکی مسائل آبی پیچیده‌ای است که امکان بررسی تحلیلی آنها به دلیل تعدد فراسنجهای اثرگذار وجود نداشته، و از لحاظ بررسیهای آزمایشگاهی نیز با مشکلاتی همچون تأثیرهای مقیاسی و هزینه‌بر بودن مواجه می‌باشند. برای بهره‌گیری از CFD در هر مسأله نخست باید نتایج آن را با نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی مورد

ژیانگ جو (۲۰۰۶) به کمک نرم‌افزار Fluent و با انتخاب شبیه‌آشفتگی RNG و شبیه‌اختلاطی (Mixture) شبیه‌سازی عددی خود را با نمونه‌ی فیزیکی مورد مقایسه قرار دادند. این مقایسه را در زمینه‌های نیمرخ سرعت، جریان چرخشی و توزیع فشار انجام داده و اعلام کردند که انطباق مناسبی بین شبیه‌سازی عددی و نمونه‌ی فیزیکی وجود دارد.

مرددشتی و طالب بیدختی (۱۳۸۶)، شش پیکربندی متفاوت را از سرریز پلکانی با شکل پله‌ای - حوضچه‌ای ترکیبی را تحت دو شیب ۱۸/۸ و ۲۸ درجه و شش بده ۶، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ (جمعاً ۷۲ حالت) مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی شش پیکربندی متفاوت از سرریز پلکانی با شکل پله‌ای - حوضچه‌ای ترکیبی در مقایسه با سرریز پلکانی معمولی با خیز پلکان یکسان، افزایش استهلاك کارمایه را تا حداکثر ۳۰٪ در سرریز پلکانی با شکل پله - حوضچه‌ای ترکیبی نشان می‌دهد.

مرادی سبز کوهی و همکاران (۱۳۹۰) برای بررسی تأثیر شرایط هندسی و آبی شیب شکنها در میزان استهلاك کارمایه در ساختمان آنها از شناختن فراسنجهای مؤثر در این خصوص، از جمله طول و ارتفاع شیب شکن، برای سه نوع رایج آن شامل شیب شکن قائم، مایل مستطیلی و پلکانی با ساختن ۱۴ نمونه‌ی فیزیکی در دو ارتفاع، دو شیب ۲۶/۶ و ۳۳/۷ درجه، تعداد پله‌های ۳ و ۷، و انجام آزمایش در ۹۰ بده در محدوده‌ی ۱/۴ تا ۳۶/۹ لیتر بر ثانیه، میزان استهلاك کارمایه را تعیین و مقایسه کردند. نتایج نشان دادند که در محدوده‌ی مشترک متغیرهای مورد بررسی، بیشترین استهلاك کارمایه مربوط به شیب شکن قائم است.

### مواد و روش‌ها

#### پویایی سیال محاسباتی

در حقیقت پویایی سیال محاسباتی علم جایگزین کردن معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسأله با اعداد و پیشروی این اعداد در مکان و یا زمان برای به‌دست آوردن یک توصیف عددی از میدان جریان می‌باشد. از جمله دلایل رشد پویایی سیال محاسباتی را می‌توان در ارائه حل تقریبی برای معادلات ناویر استوکس، کاهش بازه‌ی زمانی

<sup>۱</sup> - computational fluid dynamics (CFD)

شد. مشخصات این نمونه آزمایشگاهی که در موسسه تحقیقات آب ساخته شده است در جدول ۱ آمده است. لازم به ذکر است که شبیه آزمایشگاهی فوق برای محدوده‌ی جریان  $1.54 \leq \frac{d_c}{h} \leq 16.15$  که شامل ۱۴ بده می‌باشد انجام گرفته است.

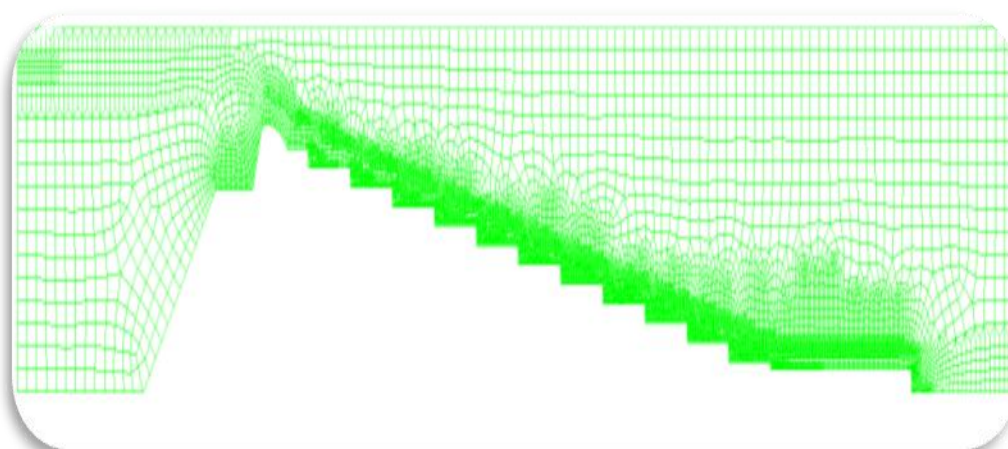
جدول ۱- مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی

نوع مدل	تعداد پله	ارتفاع پله (m)	طول پله (m)	شیب سرریز (درصد)	طول کف بند (m)
آزمایشگاهی	۱۱	۱/۳	۶/۷۵	۱۹/۲	۲۲/۵

### شبکه‌بندی شبیه عددی

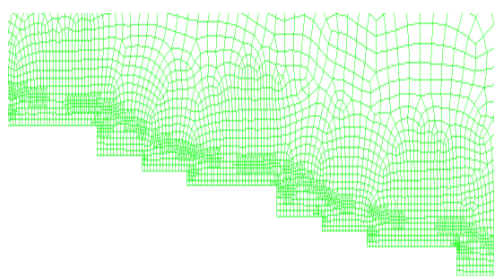
ایجاد شبکه‌بندی مناسب برای حل معادلات اساسی حاکم بر شبیه، یکی از بخشهای مهم در شبیه‌سازی می‌باشد. با ایجاد یک شبکه‌بندی مناسب می‌توان در حل معادلات به یک همگرایی مناسب دست یافت، و بالعکس، انتخاب نامناسب شبکه می‌تواند باعث ایجاد ناپایداری یا عدم همگرایی در محاسبات گردد. در روش CFD از شبکه‌های مختلفی مثل سازمان یافته و بی‌سازمان برای ایجاد دامنه‌ی محاسباتی استفاده می‌گردد. شبکه‌ی ساختار یافته دارای روزه مربعی در حالت دو بعدی و مکعبی در حالت سه بعدی است و شبکه بی‌سازمان که بیشتر برای پوشش دادن هندسه‌های نامنظم مناسب است، در این مطالعه برای شبکه‌بندی محدوده‌ی جریان از بخش شبکه‌بندی در محیط Workbench بهره گرفته شده است. از آنجا که مسأله مورد نظر به شدت به شبکه‌بندی

جریان بویژه در محدوده‌ی سطح پله‌ها تا سطح مشترک آب و هوا حساس است، و شبکه‌بندی در این محدوده کاملاً در نتایج حاصل از تحقیق تاثیرگذار می‌باشد. از این رو تعداد گره‌های موجود در جهات و قسمت‌های مختلف سرریز متفاوت بوده، و بعد چند مرحله حساسیت‌سنجی نتایج نسبت به شبکه‌بندی، با کاربرد فرایند روزه‌بندی تطبیقی، شبکه‌بندی مناسب انتخاب گردید. بن‌پارهای مورد استفاده برای این شبکه‌بندی از نوع مکعبی بوده و همانطور که مشخص است ابعاد آنها در محدوده‌ی سطح پله و دیواره‌ها تا سطح مشترک آب و هوا ریزتر، و در سایر نواحی ابعاد روزه‌ها درشت‌تر انتخاب گردیده است (ابراهیم نژادیان، ۱۳۹۲). شبکه‌بندی به کمک این نرم‌افزار در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمایی از شبکه‌بندی شبیه عددی

عبارت بودند از: ۱- Air Volume Fraction، ۲- Water Velocity، ۳- Volume Fraction، ۴- Watervorticity، ۵- Pressure، ۶- Turbulance. در شکل ۴ نمایی از شبکه‌بندی هندسه شبیه بعد از فرایند روزنه تطبیقی (Mesh Adaption) و حساسیت‌سنجی شبیه بر اساس معیار Air Volume Fraction نشان داده شده‌اند. نهایتاً شبکه‌بندی شبیه عددی پس از حساسیت‌سنجی نسبت به تمام معیارهای مذکور، که طی فرایند حل به شبیه اعمال می‌گردند، صورت گرفت.



شکل ۴- نمایی از روزنه‌بندی پس از فرایند روزنه‌بندی تطبیقی بر اساس Air Volume Fraction

### شرایط مرزی

شرایط مرزی اعمال شده برای شبیه‌سازی عددی موضوع مورد نظر در نرم‌افزار ANSYS CFX به ترتیب عبارتند از: شرط مرزی ورودی (inlet)، شرط مرزی خروجی (outlet)، شرط سطح آزاد (opening)، شرط مرزی دیواره (wall) و شرط مرزی تقارن (symmetry). شرط مرزی بدهی جرمی برای تعریف بدهی جریان، با تمام خاصیت‌های اسکالر جریان در ورودی به کار می‌رود. برای مرز خروجی با توجه به زیر بحرانی بودن جریان، از یک ارتفاع مشخص 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 می‌رود که در کف حوزه‌ی محاسباتی مورد استفاده قرار گرفت، و در نهایت برای معرفی سطح آزاد جریان به نرم‌افزار از شرط مرزی سطح آزاد (opening) بهره گرفته شد.

### حساسیت‌سنجی شبکه بندی شبیه عددی

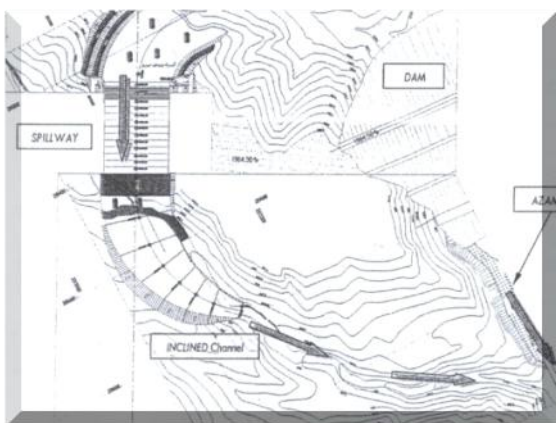
شبیه عددی ساخته شده باید نسبت به شبکه‌بندی خود، حساسیت‌سنجی گردیده و این اطمینان حاصل شود که شبکه در نقاط مختلف هندسه با توجه به معیارهای انتخابی، اصلاح گردد. تغییر شبکه و یا ریزسازی اجزای شبکه در نرم‌افزار ANSYS CFX با توجه به معیارهای زیر انجام می‌گیرد: ۱- ریز کردن شبکه نزدیک مرزها ۲- ریز کردن شبکه‌هایی که تغییرات مقادیر فراسنجهای مختلف در آن زیاد می‌باشد (ریز کردن تدریجی) ۳- ریز کردن شبکه‌های مختلف که دارای مقادیر خاصی از یک فراسنج اصلی هستند.

نرم‌افزار ANSYS CFX، به منظور حساسیت‌سنجی شبکه‌بندی شبیه عددی، برای کاربر امکاناتی را فراهم آورده تا پس انجام فرایند روزنه‌بندی شبیه در مرحله‌ی تنظیم معیارهای طراحی و از طریق گزینه‌ی Mesh Adaption به اصلاح روزنه‌بندی در حین فرایند حل و با توجه به معیارهای انتخابی از طریق کاربر بپردازد. این تغییرات در شبکه‌بندی در جهت برآورده ساختن ابعاد شبکه مورد نیاز بر اساس معیارهای انتخابی است. لذا برای تحلیل حساسیت این شبیه عددی، نرم‌افزار بطور خودکار بر اساس معیارهای انتخابی، بهترین شبکه‌بندی را طی فرایند حل انجام می‌دهد، بطوری که کمترین حساسیت و وابستگی در نتایج شبیه نسبت به شبکه‌بندی ایجاد شده، و علاوه بر این، هزینه‌ی محاسباتی شبیه عددی نیز حداقل گردد.

فرایند Mesh Adaption در نرم‌افزار Ansys CFX به روشی اطلاق می‌شود که در آن شبکه به صورت انتخابی در ناحیه‌هایی که از معیار همگرایی تاثیر می‌پذیرند، تصحیح گردد، بدین معنی که همان‌طور که جواب مسأله محاسبه می‌شود، شبکه را می‌توان در مکان‌هایی که متغیرهای جواب خیلی سریع تغییر می‌کنند، به صورت خودکار ریزتر یا درشت‌تر کرد. این کار به تعیین دقیق مشخصه‌های جریان در این نواحی کمک می‌کند.

در این شبیه پس از روزنه‌بندی هندسه‌ی شبیه در سربرگ Mesh، فرایند تصحیح روزنه یا Mesh Adaption در سربرگ Setup صورت گرفت. از جمله معیارهای انتخابی

سيلاب سد، يك سرريز آزاد منتهي به يك تنداب پلكاني است كه در جناح راست سد واقع شده است. جريان خروجي از آستانه‌ي سرريز وارد تنداب پلكاني شده و پس از حذف كارمايه آن، و عبور از يك كف بند<sup>۱</sup> از طريق يك آبراهه شيب‌دار به رود پاياب هدايت مي‌گردد. عرض تنداب پلكاني از ابتدا تا انتها ثابت و برابر ۶۵ متر مي‌باشد. تنداب پلكاني مجموعاً از ۱۱ پله تشكيل شده كه ارتفاع هر يك برابر با ۱/۳ متر و طول هر پله ۶/۷۵ متر مي‌باشد.



شكل ۵- جانمائي سرريز و پستي و بلندي منطقه احداث سد

### استهلاك كارمايه

مقدار استهلاك كارمايه بين دو نقطه از جريان عبارتست از: نسبت اختلاف كارمايه كلي بين آب دو نقطه، به كارمايه كل اوليه‌ي جريان كه غالباً به صورت درصد اعلام گردیده و به شكل رابطه‌ي ۱۰ نشان داده مي‌شود:

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

كه در آن  $H_1$  بار آبي كارمايه در بالادست جريان، كه در اين تحقيق محل محاسبه اين بار آبي كمي قبل از تاج سرريز است.  $H_0$  بار آبي كارمايه در پايين دست جريان است كه در اين تحقيق محل محاسبه اين بار آبي در انتهاي كف‌بند جهت جلوگیری از تاثيرات آشفته‌گي بر نتايج جريان، انتخاب گردید. كه جهت محاسبه‌ي كارمايه كل اوليه‌ي جريان، از آن‌جا كه ارتفاع، عمق و سرعت

### انتخاب شبیه آشفته‌گي

يك شبیه آشفته‌گي عبارت است از يك رويه‌ي محاسباتي براي بستن سامانه‌ي معادلات جريان متوسط يا معادلات ناویر استوكس متوسط‌گيري شده‌ي رینولدز به‌گونه‌اي كه كم و بيش بخش وسيعي از مسائل جريان را بتوان حل كرد (ورستگ و مالااسكرا، ۱۳۸۶). در اين تحقيق، براي شبیه‌سازي مشخصه‌هاي آشفته‌گي جريان از شبیه‌هاي دو معادله‌اي استفاده شده است. براي انتخاب مناسب‌ترين شبیه‌هاي اغتشاشي جهت شبیه‌سازي سرريزهاي پلكاني، سه شبیه K-ε، RNG K-ε و شبیه تنش‌هاي رینولدز براي مقايسه انتخاب، و پس از بررسي و مقايسه نتايج آنها، گزینه‌ي برتر، كه شبیه آشفته‌گي RNG K-ε بود انتخاب گردید. اين شبیه قابليت بالاتري را نسبت به ساير شبیه‌هاي آشفته‌گي در شبیه‌سازي گردابه‌هاي بازچرخشي در گوشه‌ي پله‌هاي سرريز از خود نشان داد. شبیه RNG K-ε در دو مورد نسبت به K-ε معيار، اصلاح شده مي‌باشد، كه عبارت است از يك معادله‌ي انتقال اضافي، و ديگري ضرايب ثابت در دو شبیه است كه با هم متفاوتند. با انجام اين اصلاحات در اين شبیه قابليت‌هاي آن در شبیه‌سازي جريانهايي كه دچار جدائي و چرخش هستند نسبت به شبیه K-ε معيار بيشتر مي‌شود.

### شبیه آزمایشگاهی

نمونه‌ي آبي ساخته شده در واقع شبیه آبي جزبي سرريز سد هرات (خوانسار يزد) با مقياس ۱/۲۰ مي‌باشد كه در آزمایشگاه هيدروليک موسسه‌ي تحقيقات منابع آب ساخته شده است. شامل مقطعي از سرريز به عرض ۱۱ متر (از كل ۶۵ متر) بدون احداث آبراهه ورودی بالادست، ديواره‌ي هدايت جريان و پستي و بلندي پيرامون آن است.

سد مخزني هرات (خوانسار يزد) به منظور تأمين آب مورد نياز آبياري اراضي منطقه احداث مي‌گردد. اين سد برروي رود اعظم و در جنوب شهر يزد و جنوب غربي شهر هرات ساخته مي‌شود.

اين سد از نوع خاكي با هسته ناتراوای رسي بوده و ارتفاع آن ۴۵/۵ متر از كف رود مي‌باشد. تراز تاج سد ۱۹۶۳/۵ متر از سطح درياست. سامانه‌ي اصلي تخليه

<sup>1</sup> - apron



از همان رابطه‌ی ۱۱ در مکان مورد نظر استفاده می‌گردد، با این تفاوت که عمق و سرعت در این رابطه، بنابر دلایل ذکر شده در بالا، معادله‌های عمق و سرعت در ۷۰٪ هوا اندازه‌گیری می‌شوند.

### نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی

در این تحقیق ابتدا یک شبیه عددی که دارای هندسه‌ی کاملاً مشابه با نمونه‌ی فیزیکی سد هرات (خوانسار یزد) است، تهیه گردید. این شبیه عددی دارای هندسه‌ی کاملاً مشابه با نمونه‌ی فیزیکی بوده و طول و عرض پله‌های آن به ترتیب ۰/۳۳۷۵ و ۰/۰۶۵ متر و شیب سرریز نیز ۱۹/۲ درصد است. لازم به ذکر است که هم نمونه‌ی فیزیکی و هم هر کدام از شبیه‌های عددی برای ۱۴ بدهی مختلف در محدوده  $1.54 \leq \frac{d_c}{h} \leq 16.15$  مورد آزمایش قرار گرفتند؛ در نتیجه مجموعاً ۴۲ شبیه عددی برای این تحقیق تهیه شده است. سپس برای صحت‌سنجی شبیه عددی، نتایج حاصل از آن با نتایج نمونه‌ی فیزیکی مورد مقایسه قرار گرفتند. مقایسه‌ی نتایج شبیه عددی با نمونه‌ی فیزیکی با هندسه‌ی مشابه حاکی از تطابق بسیار خوب نتایج به‌دست آمده است، به‌گونه‌ای که خطای نتایج در حد مطلوب می‌باشد؛ در ادامه، پس از ارائه‌ی نتایج مربوط به صحت‌سنجی، نتایج حاصل از تغییر در هندسه‌ی پله، که به صورت دو پیکربندی متفاوت از هندسه شبیه فیزیکی می‌باشند، ارائه می‌گردد. در جدول ۲ مشخصات هر کدام از پیکربندیها آمده است.

ورودی جریان به سرریز مشخص است، می‌توان به کمک رابطه‌ی برنولی کارمایه یک نقطه برروی سطح آب روی سرریز را به صورت رابطه‌ی ۱۱ محاسبه کرد:

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

برای محاسبه‌ی کارمایه‌ی ثانویه، که معمولاً در پایین دست سرریز پلکانی در روی لبه هر کدام از پله‌ها، و یا در کفبند محاسبه می‌گردد، توجه به نکاتی حائز اهمیت است: این که با توجه به ماهیت دو حالتی جریان و ترکیب شدن آب و هوا در حین جریان برروی سرریز پلکانی ژرفای خالصی که فقط شامل آب باشد کدام عمق است؟

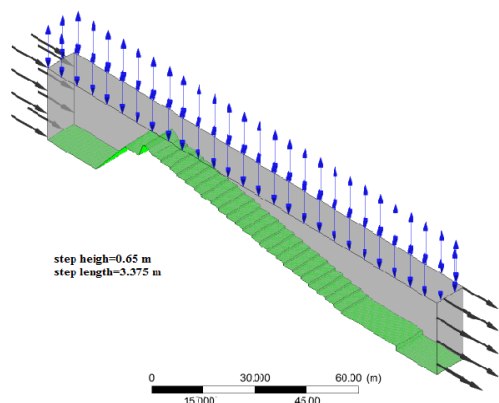
چرا که جریان برروی پله‌ها، شکل ورودی به سرریز را نداشته، و بعد از نقطه شروع هوادهی، آب خالصی وجود ندارد که تحت عنوان عمق معرفی شود.

در این تحقیق، اولاً، عمق آب تا جایی محاسبه شده که اندازه‌ی هوا در آن حدود ۷۰٪ درصد حجمی باشد، چون یکی از وسایل اندازه‌گیری سرعت لوله پیتو است و این لوله در هوای بالای ۷۰٪ عملکرد خود را از دست می‌دهد؛ لذا، مجبور بودند که در شبیه آزمایشگاهی قرائت خود را تا این عمق انجام داده و میانگین‌گیری را نیز تا این عمق انجام دهند. ثانیاً جریان با درصد هوای بالای ۷۰٪ به صورت گرد در می‌آید، و می‌توان گفت که در این محدوده تقریباً آبی وجود ندارد که بخواهد به عنوان بخشی از عمق جریان دخالت کند؛ پس برای محاسبه‌ی کارمایه ثانویه نیز

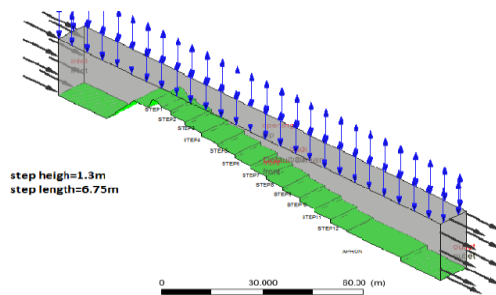
جدول ۲- مشخصات پله‌ها در شبیه عددی و نمونه‌ی آزمایشگاهی.

توضیحات	نوع نمونه
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 مشابه شبیه آزمایشگاهی	نمونه‌ی فیزیکی نمونه‌ی 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	نمونه‌ی 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

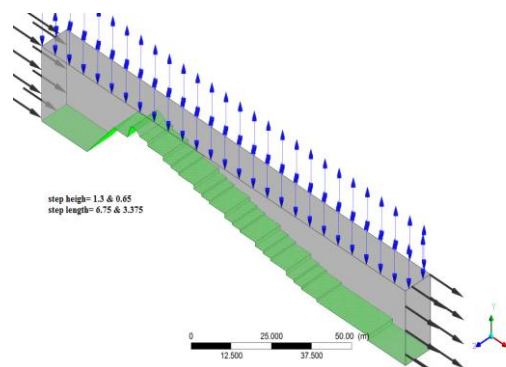
نمایی از سه شبیه عددی که در جدول ۲ ذکر شده اند و در نرم‌افزار ANSYS CFX بنا گردیده در شکل‌های ۶ تا ۸ ارائه شده‌اند.



شکل ۸- هندسه‌ی شبیه عددی ۳



شکل ۶- هندسه‌ی شبیه عددی ۱



شکل ۷- هندسه‌ی شبیه عددی ۲

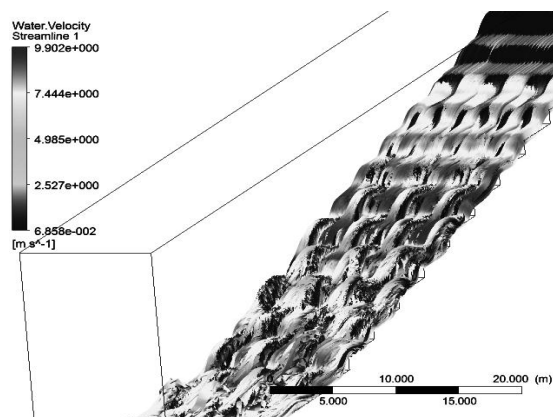
نخست نتایج مربوط به صحت‌سنجی شبیه عددی ۱ با نتایج نمونه‌ی فیزیکی ارائه می‌گردد. که این صحت‌سنجی شامل مقایسه‌ی نتایج مربوط به استهلاك کارمایه و رژیم جریان حاکم در دو شبیه مذکور می‌باشد.

جدول ۳- نتایج استهلاك انرژی برای مدل آزمایشگاهی و مدل عددی ۱

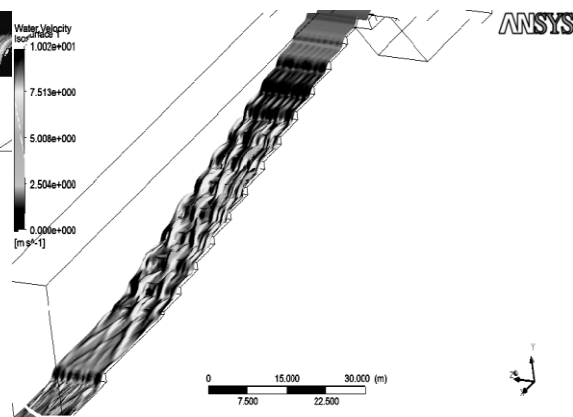
دبی		استهلاك انرژی (%)			
Q(m <sup>3</sup> /s)	q(m <sup>3</sup> /s/m)	رژیم جریان	PMOD(η%)	NMOD1(η%)	E(%)
۱۰۰	۱/۵۴	ریزشی	-	۹۱/۱۴	-
۱۵۰	۲/۳۱	ریزشی	۸۷/۸۱	۸۷/۰۳	۰/۷۸
۲۰۰	۳/۰۸	ریزشی	۸۳/۳۹	۸۲/۶۲	۰/۷۷
۲۶۴	۴/۰۶	انتقالی	۸۲/۵۴	۸۱/۱۶	۰/۹۴
۳۰۰	۴/۶۲	انتقالی	۷۹/۷	۷۸/۹۵	۰/۷۵
۴۰۰	۶/۱۵	انتقالی	۷۴/۲۹	۷۳/۱۹	۱/۱
۵۰۰	۷/۶۹	انتقالی	۷۲/۱۲	۷۱/۰۴	۱/۰۸
۵۵۵	۸/۵۴	انتقالی	۷۱/۴۲	۷۰/۱۹	۱/۲۳
۶۰۰	۹/۲۳	لغزشی	۶۶/۸۱	۶۵/۲۷	۱/۵۴
۷۰۰	۱۰/۷۷	لغزشی	۶۰/۰۶	۵۸/۵۵	۱/۵۱
۸۰۰	۱۲/۳۱	لغزشی	۵۸/۶۴	۵۷/۳۱	۱/۳۳
۹۰۰	۱۳/۸۵	لغزشی	۵۶/۵۵	۵۵/۳۸	۱/۱۷
۱۰۰۰	۱۵/۳۸	لغزشی	۵۴/۷۲	۵۳/۳۹	۱/۳۳
۱۰۵۰	۱۶/۱۵	لغزشی	۵۲/۶	۵۱/۵۶	۱/۰۴

نتایج شبیه عددی و نمونه‌ی آزمایشگاهی دارد. در ادامه، مقایسه‌ی بین نتایج شبیه عددی ۱ و نمونه‌ی فیزیکی، به رژیم‌های جریان حاکم بر سرریز به ازای محدوده‌ی بده‌های اعمالی در سرریز پلکانی مذکور اشاره می‌کنیم.

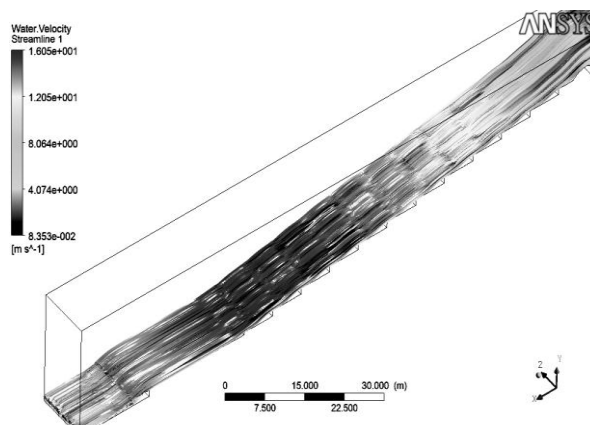
مقدار خطای نتایج بنابر مقادیر جدول فوق بطور میانگین کمتر از ۲٪ است؛ بنابر نتایج به‌دست آمده، و مقایسه آنها با یکدیگر، و با توجه به درصد خطای کم شبیه و نمونه‌ی، حکایت از صحت شبیه عددی و انطباق



شکل ۱۰- سطح آب در جریان انتقالی در بدهی  $\frac{m^3}{s} 264$



شکل ۹- سطح آب در جریان ریزشی در بدهی  $\frac{m^3}{s} 150$

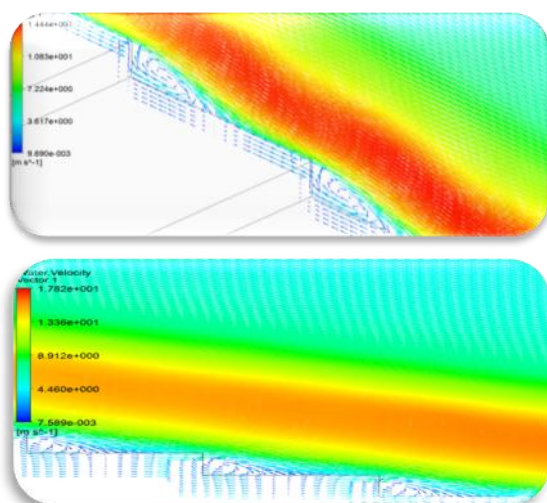


شکل ۱۱- سطح آب در جریان لغزشی در بدهی  $\frac{m^3}{s} 600$

همان گونه که نتایج مربوط به رژیم جریان حاکم و استهلاك کارمایه نشان می‌دهند، نتایج شبیه عددی و نمونه‌ی آزمایشگاهی دارای انطباق قابل قبولی می‌باشند، و این حکایت از صحت شبیه عددی دارد. پس از صحت سنجی شبیه عددی، دو شبیه عددی با پیکربندی متفاوت از نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته شد و نتایج مربوط به استهلاك در اثر این تغییر هندسه استخراج و مورد مقایسه و بحث قرار می‌گیرند، که نتایج آنها در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند.

جدول ۴- نتایج روند استهلاک کارمایه بین شبیه عددی ۲ با شبیه عددی ۱ و نمونه‌ی آزمایشگاهی

دبی	استهلاک انرژی (٪)							
	Q(m <sup>3</sup> /s)	q(m <sup>3</sup> /s/m)	رژیم جریان	آزمایشگاهی	مدل عددی ۱	E1(%)	مدل عددی ۲	E2(%)
۱۰۰	۱/۵۴		ریزشی	-	۹۱/۱۴	-	۸۷/۶۶	-
۱۵۰	۲/۳۱		ریزشی	۸۷/۸۱	۸۷/۰۳	۰/۷۸	۸۵/۴۴	۲/۳۷
۲۰۰	۳/۰۸		ریزشی	۸۳/۳۹	۸۲/۶۲	۰/۷۷	۷۸/۸۲	۴/۵۷
۲۶۴	۴/۰۶		انتقالی	۸۲/۵۴	۸۱/۶	۰/۹۴	۷۴/۴۳	۸/۱۱
۳۰۰	۴/۶۲		انتقالی	۷۹/۷	۷۸/۹۵	۰/۷۵	۷۲/۷۹	۶/۹۱
۴۰۰	۶/۱۵		انتقالی	۷۴/۲۹	۷۳/۱۹	۱/۱	۶۷/۴۳	۶/۸۶
۵۰۰	۷/۶۹		انتقالی	۷۲/۱۲	۷۱/۰۴	۱/۰۸	۶۰/۱۷	۱۱/۹۵
۵۵۵	۸/۵۴		انتقالی	۷۱/۴۲	۷۰/۱۹	۱/۲۳	۵۷/۶۸	۱۳/۷۴
۶۰۰	۹/۲۳		لغزشی	۶۶/۸۱	۶۵/۲۷	۱/۵۴	۵۳/۷۷۵	۱۳/۰۳
۷۰۰	۱۰/۷۷		لغزشی	۶۰/۰۶	۵۸/۵۵	۱/۵۱	۴۶/۲۸	۱۳/۷۸
۸۰۰	۱۲/۳۱		لغزشی	۵۸/۶۴	۵۷/۳۱	۱/۳۳	۴۰/۲۴	۱۸/۴
۹۰۰	۱۳/۸۵		لغزشی	۵۶/۵۵	۵۵/۳۸	۱/۱۷	۳۷/۶۵	۱۸/۹
۱۰۰۰	15.38		لغزشی	۵۴/۷۲	۵۳/۳۹	۱/۳۳	۳۴/۴۴	۲۰/۲۸
۱۰۵۰	۱۶/۱۵		لغزشی	۵۲/۶	۵۱/۵۶	۱/۰۴	۳۲/۰۵	۲۰/۵۵



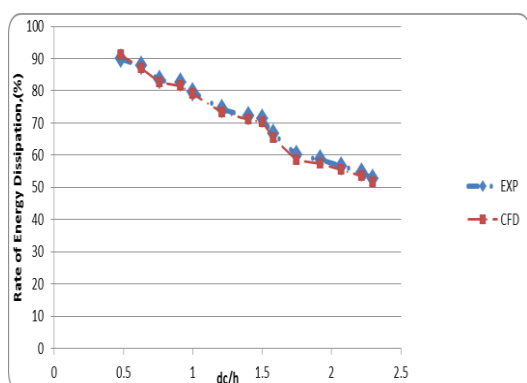
شکل ۱۲- نمایی از گردابه‌های باز چرخشی مثلثی شکل در شبیه‌های عددی ۱ و ۲.

در ادامه‌ی این تحقیق، نتایج مربوط به استهلاک کارمایه به‌ازای تمامی بده‌های اعمالی در شبیه عددی ۳ که، دارای پیکربندی و هندسه متفاوت و غیریکنواخت نسبت به شبیه عددی شماره ۱ می‌باشد، ارائه می‌شود.

بررسی 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 رژیم جریان ریزشی کمتر از رژیم جریان لغزشی است. دلیل این امر آن است که در رژیم جریان لغزشی عامل اصلی استهلاک، گردابه‌های باز چرخشی مثلثی شکل در گوشه‌ی پله‌ها می‌باشند که در هندسه‌ی عددی ۲ با کاهش همزمان طول و ارتفاع پله، ابعاد این گردابه بازچرخشی به میزان قابل ملاحظه‌ای کاستی می‌پذیرد، و در نتیجه، میزان استهلاک کارمایه کاهش می‌یابد، در حالی که در رژیم 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 شکل ۱۲ ارائه شده است.

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

دبی		استهلاک کارمایه (٪)					
Q(m <sup>3</sup> /s)	q(m <sup>3</sup> /s/m)	رژیم جریان	شبیه آزمایشگاهی	شبیه عددی ۱	E1(%)	شبیه عددی ۳	E3(%)
۱۰۰	۱/۵۴	ریزشی	-	-	-	-	-
۱۵۰	۲/۳۱	ریزشی	۸۷/۸۱	۸۷/۰۳	۰/۷۸	۸۵/۶۱	۲/۲
۲۰۰	۳/۰۸	ریزشی	۸۳/۳۹	۸۲/۶۲	۰/۷۷	۷۷/۵۴	۵/۸۵
۲۶۴	۴/۰۶	انتقالی	۸۲/۵۴	۸۱/۶	۰/۹۴	۷۵/۱۵	۷/۳۹
۳۰۰	۴/۶۲	انتقالی	۷۹/۷	۷۸/۹۵	۰/۷۵	۷۳/۰۳	۶/۶۷
۴۰۰	۶/۱۵	انتقالی	۷۴/۲۹	۷۳/۱۹	۱/۱	۶۸/۵۱	۵/۷۸
۵۰۰	۷/۶۹	انتقالی	۷۲/۱۲	۷۱/۰۴	۱/۰۸	۶۳/۰۱	۹/۱۱
۵۵۵	۸/۵۴	انتقالی	۷۱/۴۲	۷۰/۱۹	۱/۲۳	۶۰/۷۴	۱۰/۶۸
۶۰۰	۹/۲۳	لغزشی	۶۶/۸۱	۶۵/۲۷	۱/۵۴	۵۸/۰۴	۸/۷۷
۷۰۰	۱۰/۷۷	لغزشی	۶۰/۰۶	۵۸/۵۵	۱/۵۱	۵۰/۹۳	۹/۱۳
۸۰۰	۱۲/۳۱	لغزشی	۵۸/۶۴	۵۷/۳۱	۱/۳۳	۴۷/۵۵	۱۱/۰۹
۹۰۰	۱۳/۸۵	لغزشی	۵۶/۵۵	۵۵/۳۸	۱/۱۷	۴۴/۸۹	۱۱/۶۶
۱۰۰۰	۱۵/۳۸	لغزشی	۵۴/۷۲	۵۳/۳۹	۱/۳۳	۴۲/۸۶	۱۱/۸۶
۱۰۵۰	۱۶/۱۵	لغزشی	۵۲/۶	۵۱/۵۶	۱/۰۴	۴۰/۴۹	۱۲/۱۱



شکل ۱۳- مقایسه‌ی استهلاک کارمایه بین نمونه‌ی آزمایشگاهی و شبیه عددی ۱ بر اساس فراسنج بی بعد  $dc/h$ .

شکل ۱۴ نمودار مربوط به استهلاک کارمایه در شبیه آزمایشگاهی و شبیه عددی شماره ۲، که ارتفاع پله‌های آن یکنواخت و نصف شده است، می‌باشد. میزان استهلاک کارمایه با کاهش ارتفاع پله‌ها کاستی یافته، که دلیل آن نیز به سبب کوچک شدن ابعاد گردابه‌های بازچرخشی تشکیل شده در گوشه پله‌ها می‌باشد.

بررسی نتایج شبیه عددی ۳ با دستاوردهای شبیه عددی ۱ و نمونه‌ی آزمایشگاهی، حاکی از کاهش میزان استهلاک در این شبیه بود. البته کاهش میزان استهلاک کارمایه در این شبیه نسبت به شبیه ۲ کمتر بود، که آن هم به دلیل وجود پله‌هایی با ارتفاع  $0/65$  در پیکربندی این شبیه نسبت به شبیه ۲ می‌باشد.

نتایج تحلیلهای عددی در سرریزهای مورد بررسی در این تحقیق در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ به صورت نمودار قابل مشاهده می‌باشند.

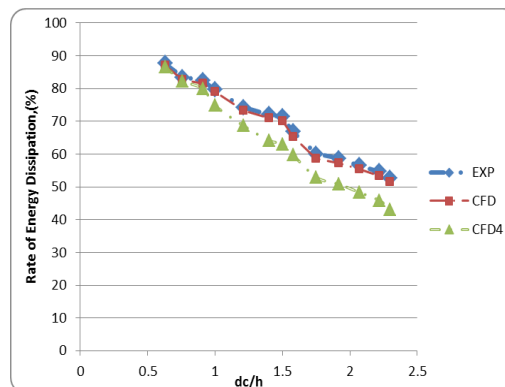
شکل ۱۳ نمودار مربوط به نتایج استهلاک کارمایه در نمونه‌ی آزمایشگاهی و شبیه عددی با هندسه‌ی مشابه است که تطابق خوبی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، در هر دو شبیه، با افزایش بده میزان استهلاک کارمایه کاهش یافته است.

### مقايسه نتايج تحليل عددي با روابط تجربی

در جداول ۷،۶ و ۸ به ترتيب می‌توان مقايسه‌ی نتايج عددي را در محاسبه‌ی استهلاك كارمايه با روابط تجربی محققانی چون چانسون (۲۰۰۲) و راجاراتنام و چمنی (۱۹۹۰) را مشاهده کرد و خطاهای موجود را بررسی نمود. لازم به ذکر است که با توجه به این تحقيق تعداد ۱۴ بده در محدوده‌ی رژيمهای ريزشی، انتقالی و لغزشی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، برای مقايسه با نتايج تجربی از هر رژيم جريان فقط یک بده انتخاب، و در جدول ارائه شده برای محاسبه خطاهای موجود بين شبیه عددي و روابط تجربی از رابطه‌ی ۱۱ استفاده شده است:

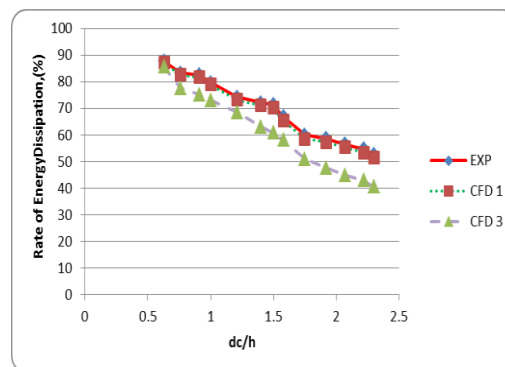
$$Error = \frac{\left( \frac{E_L}{E1} \right)_{Experiment} - \left( \frac{E_L}{E1} \right)_{Numerical}}{\left( \frac{E_L}{E1} \right)_{Experiment}} \quad (11)$$

در جداول ۷،۶ و ۸ به ترتيب مقايسه‌ی نتايج شبیه‌های عددي ۲،۱ و ۳ با روابط تجربی چانسون (۱۹۹۴) و راجاراتنام و چمنی (۱۹۹۰) ارائه شده‌اند. در این جداول می‌توان خطای موجود را بين روش عددي و روابط تجربی بررسی کرد. در این جداول جريانهای ريزشی، انتقالی و لغزشی مورد توجه بوده، و خطاها برای بده‌های در واحد عرض ۲/۳۱، ۸/۵۴ و ۱۶/۱۵ متر مکعب بر ثانيه بر واحد عرض در محدوده‌ی ۵ تا ۱۷ در صد می‌باشند.



شکل ۱۴- مقايسه‌ی استهلاك كارمايه بين شبیه آزمایشگاهی و شبیه عددي ۲ بر اساس فرانسج بی بعد dc/h.

شکل ۱۵ نیز نمودار مربوط به استهلاك كارمايه در نمونه‌ی آزمایشگاهی و شبیه عددي شماره‌ی ۳، که ارتفاع پله‌های آن غيریکنواخت و ترکیبی از شبیه‌های ۱ و ۲ است، می‌باشد. میزان استهلاك كارمايه در این شبیه، که دارای ارتفاع پله غيریکنواخت است، و پیکربندی شبیه شامل هر دو پله با ارتفاع ۰/۰۶۵ و ۰/۰۳۲۵ می‌باشد، نیز کاهش یافته است، ولی میزان کاهش در این شبیه نسبت به شبیه ۲ کمتر است، که به دليل وجود پله‌ها با ارتفاع ۰/۰۶۵ در هندسه‌ی این شبیه نسبت به شبیه شماره ۲ است. همان‌گونه که از نتايج نمودار برمی‌آید غيریکنواختی ارتفاع پله‌ها تأثیری قابل ملاحظه‌ای را بر روند استهلاك كارمايه نداشته است.



شکل ۱۵- مقايسه‌ی استهلاك كارمايه بين نمونه‌ی آزمایشگاهی و شبیه عددي ۳ بر اساس فرانسج بی بعد dc/h.

جدول ۶- مقایسه‌ی نتایج شبیه عددی ۱ و روابط تجربی چانسون و راجاراتنام در سرریز پلکانی.

$q\left(\frac{m^3}{s}\right)$ $m$	Flow regime	شبهه عددی ۱ $\frac{E_L}{E_1}$	راجاراتنام $\frac{E_L}{E_1}$	چانسون $\frac{E_L}{E_1}$	خطا (بر حسب درصد)
2.31	NA2	85.44	91.23	91.78	5.79
					6.34
8.54	TRA2	57.68	66.05	67.96	8.37
					10.28
16.15	SK1	32.05	46.88	47.92	14.83
					15.87

جدول ۷- مقایسه‌ی نتایج شبیه عددی ۲ و روابط تجربی چانسون و راجاراتنام در سرریز پلکانی.

$q\left(\frac{m^3}{s}\right)$ $m$	Flow regime	شبهه عددی ۱ $\frac{E_L}{E_1}$	راجاراتنام $\frac{E_L}{E_1}$	چانسون $\frac{E_L}{E_1}$	خطا (بر حسب درصد)
2.31	NA2	87/71	92.94	94.57	5.23
					6.86
8.54	TRA2	71.42	79.25	80.78	7.83
					9.36
16.15	SK1	52.60	66/49	67/56	13.89
					14.96

جدول ۸- مقایسه‌ی نتایج شبیه عددی ۳ و روابط تجربی چانسون و راجاراتنام در سرریز پلکانی.

$q\left(\frac{m^3}{s}\right)$ $m$	Flow regime	شبهه عددی ۱ $\frac{E_L}{E_1}$	راجاراتنام $\frac{E_L}{E_1}$	چانسون $\frac{E_L}{E_1}$	خطا (بر حسب درصد)
2.31	NA2	85.61	91.07	92.3	5.46
					6.69
8.54	TRA2	60.74	68.77	71.08	8.03
					10.34
16.15	SK1	40.49	54.88	56.58	14.39

## نتیجه گیری

انتقالی، و از انتقالی به لغزشی می‌شود، نرخ استهلاک کارمایه کاهش یابد.

نرخ استهلاک کارمایه در سرریزهای پلکانی با کاهش ارتفاع پله‌ها کاهش یابد. و این مسأله مستقل از یکنواخت یا غیریکنواخت بودن پله‌ها می‌باشد؛ فقط میزان کاهش استهلاک بسته به پیکربندی سرریز متفاوت خواهد بود. علاوه بر این، با کاهش ارتفاع پله، نقطه‌ی شروع هوادهی به پایین دست سرریز میل می‌کند.

نتایج در تمامی هندسه‌ها و پیکربندی پله‌ها با ارتفاع غیریکنواخت و یکنواخت نشان از تفاوت حداقلی استهلاک کارمایه در محدوده‌ی رژیم جریان ریزشی، و

بررسی نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی و شبیه‌های عددی حاکی از صحت شبیه‌های عددی و نشان از قابلیت بالای نرم‌افزار پویایی سیال محاسباتی ANSYS CFX برای شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزهای پلکانی، و تعیین مشخصه‌های اصلی جریان بر روی این سرریزها، که استخراج آنها از نمونه‌ی فیزیکی مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد است، می‌دهد.

در تمامی هندسه‌ها و پیکربندی‌های سرریز پلکانی، چه با ارتفاع پله‌ی یکنواخت و چه غیریکنواخت، با افزایش بدهی جریان، که منجر به تغییر رژیم جریان از ریزشی به

۶. مردشتی، ا. و ن. طالب بیدختی. ۱۳۸۶. ارتقای استهلاك انرژی سرریزهای پلکانی با استفاده از فرایند پله- حوضچه ای رود های کوهستانی. مجله تحقیقات منابع آب، ۳(۲): ۵۰-۶۳.
۷. مرادی سبز کوهی، ع.، م. کاشفی پور، و م. بینا. ۱۳۹۰. مقایسه آزمایشگاهی میزان استهلاك انرژی در شیب شکن ها. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۵۶: ۲۰۹-۲۲۱.
۸. ورستیگ، ه. ک.، و. مالالاسکرا. ۱۳۸۶. مقدمه ای بر پویایی سیال محاسباتی. ترجمه م. ح. شجاعی فرد، ع. د. نورپور هشترودی. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه علم و صنعت. تهران.
۹. چانسون، ه. ۱۳۸۴. هیدرولیک سرریزها و سرریزهای پلکانی، ترجمه دکتر ابوالفضل شمسایی، چاپ اول، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
۱۰. گروه سازه های آبی موسسه تحقیقات آب. ۱۳۸۴. گزارش آزمایشهای اولیه شبیه آبی جزئی سرریز سد هرات (خوانسار یزد).
۱۱. گروه سازه های آبی موسسه تحقیقات آب. ۱۳۸۴. گزارش طراحی اولیه شبیه آبی جزئی سرریز سد هرات (خوانسار یزد).
12. Boyes, R.M. and W.H. Hager. 2003. Hydraulic design of stepped spillways. J. Hydraul. Eng. ASCE. 129: 671-679.
13. Chanson, H. 2002. The hydraulics of stepped chute and spillways. Bulkema Publ., the Netherlands. 140-180.
14. Chanson, H., and L. Toombes. 2004. Hydraulics of stepped chutes: Transition flow. J. Hydraul. Res. 42: 43-54.
15. Eghbalzadeh, A. and M. Javan. 2012. Comparison of mixture and VOF methods for numerical simulation of air-entrainment in skimming flow over stepped spillways. Int. Con. on Modern Hydraul. Eng. Procedia Eng. 28:657-660.
16. Tabbara, M., J. Chatila, and R. Awwad. 2005. Computational simulation of flow over stepped spillway. Comput. Struct. 83: 2215-2224.
17. Xiangju, C., C. Yongcan, and L. Lin. 2006. Numerical simulation of air-water two-phase flow over stepped spillway. Tech. Sci. 49: 674-684.

تفاوت حداکثری در رژیم لغزشی را داشت، و این تفاوت در هر دو پیکربندی با ارتفاع پله یکنواخت و غیریکنواخت مشاهده گردید؛ به عبارت دیگر، در هر دو نوع پیکربندی بیشترین میزان استهلاك کارمایه در رژیم جریان ریزشی، و کمترین میزان استهلاك کارمایه در رژیم جریان لغزشی رخ داد.

غیریکنواخت کردن پله‌ها تاثیری قابل ملاحظه‌ای در روند کاهش استهلاك کارمایه در سرریزهای پلکانی نسبت به پله با ارتفاع یکنواخت با افزایش میزان بده‌ها ندارد، و به عبارتی، با افزایش بده، کاهش نرخ استهلاك کارمایه در هر دو پیکربندی با ارتفاع پله یکنواخت و غیریکنواخت رخ می‌دهد.

غیریکنواخت کردن ارتفاع پله‌ها باعث ایجاد ناپایداری‌هایی در جریان بر روی سرریزهای پلکانی نسبت به پله با ارتفاع یکنواخت می‌گردد.

## منابع

۱. ابراهیم نژادیان، حمزه، ۱۳۹۲. تعیین تاثیر هندسه پله بر نرخ استهلاك انرژی در سرریزهای پلکانی با مدل 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 مدل توربینگی 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 انرژی نسبی صورت گرفته در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل فیزیکی. هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، شیراز، دانشگاه شیراز.
۴. سلطانی، م.، و. رحیمی اصل. ۱۳۸۶. دینامیک سیال محاسباتی به کمک نرم افزار FLUENT، چاپ چهارم، نشر طراح، تهران.
۵. رسائی، م.، ع. شیرافروس، و ا. نادری راد. ۱۳۹۰. مقایسه میزان استهلاك انرژی قبل و بعد از پرش آبی در سرریزهای پلکانی با استفاده از شبیه آزمایشگاهی. نخستین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی منابع آب ایران، کرمانشاه، دانشگاه صنعتی کرمانشاه.