

ارزیابی اثرات هندسه سرریز پلکانی در میزان استهلاک انرژی جریان عبوری با استفاده از سیستم استنتاج فازی

نسیم سوری^۱ و علیرضا مجتهدی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

چکیده

از مشخصه‌های بارز در عملکرد سرریز پلکانی، قابل ملاحظه بودن استهلاک انرژی در طول آن در مقایسه با انواع سرریزهای دیگر می‌باشد. با توجه به این ویژگی، کوشش جهت کسب دیدگاهی دقیق‌تر در ارتباط با پارامتر استهلاک انرژی و نهایتاً افزایش مقدار آن، محور اکثر تحقیقات مربوط به این نوع از سرریزها بوده است. در این مطالعه جهت ارزیابی تأثیر پارامترهایی چون عمق بحرانی (y_c)، تعداد پله‌ها (N) و شیب کف پله‌ها (α)، با ثابت در نظر گرفتن نسبت طول و ارتفاع کلی سرریز، از مدل نرم‌افزار Flow-3D به عنوان یک نرم‌افزار قوی در تحلیل میدان جریان، استفاده گردیده است. به منظور صحت‌سنجی عملکرد مدل عددی مربوطه در تخمین پارامتر استهلاک انرژی نیز یک مدل فیزیکی سرریز پلکانی در یک کانال جریان آزمایشگاهی مورد آزمایش قرار گرفته و با استفاده از سیستم پردازش تصویر، تغییرات پروفیل سطح جریان ارزیابی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که با افزایش مقدار دبی، میزان استهلاک انرژی کمتری حاصل می‌شود. تعداد پلکان و شیب معکوس روی پله‌ها نیز از جمله عوامل دیگری هستند که بر میزان استهلاک انرژی تأثیر می‌گذارند. با افزایش تعداد پلکان و شیب معکوس روی هر پله، استهلاک انرژی بیشتر می‌شود. به طوری که در مدل ۴ پله‌ای و با شیب ثابت ۴ درجه، تغییرات دبی از ۰/۰۳ به ۰/۰۸ متر مکعب بر ثانیه، باعث کاهش میزان استهلاک انرژی به اندازه ۱/۵٪ گشته در حالی که در دبی ثابت ۰/۰۳ متر مکعب بر ثانیه، تغییر حالت پله از شیب صفر به شیب ۴ درجه موجب افزایش استهلاک انرژی به میزان ۰/۹٪ گردیده است. نهایتاً، نظر به اهمیت روز افزون محاسبات نرم در مطالعه مسائل عملی، به ارزیابی پارامتر استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی با استفاده از سیستم استنتاج فازی پرداخته و اقدام به تهیه یک مدل سیستم استنتاج فازی بر اساس شرایط موجود شده است. مشاهده می‌گردد که نتایج حاصل از سیستم استنتاج فازی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی دارای تطابق مناسبی است. ارزیابی نتایج حاصله، دلالت بر کارآئی مفهوم سیستم استنتاج فازی در محاسبه پارامتر استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی دارد.

واژگان کلیدی: سرریز پلکانی، استهلاک انرژی، سیستم استنتاج فازی، مدل فیزیکی، سیستم پردازش تصویر، نرم‌افزار Flow-3D.

۱- مقدمه

باعث می‌گردد تا عمق حفاری حوضچه آرامش پائین دست، طول حوضچه آرامش و ارتفاع دیوارهای جانبی آن کاهش یابد و از این نظر صرفه‌جویی زیادی به عمل آید. با توجه به اهمیت موضوع، انجام مطالعات تحقیقاتی بر روی این نوع از سرریزها مورد توجه محققین مختلفی قرار گرفته است [۱].

در شرایط عبور جریان بر روی سرریزهای پلکانی، سه نوع رژیم جریان متمایز قابل تعریف است:

الف) در رژیم جریان ریزشی، ارتفاع کل جریان به شکل مجموعه‌ای از آبشارهای قائم تقسیم شده و جریان آب در برخورد با پلکان‌های متوالی می‌تواند دارای پرش هیدرولیکی کامل یا ناقص (بسته به طول افقی پلکان) باشد. رژیم جریان ریزشی در دبی‌های کم، و ارتفاع پله‌های بزرگ اتفاق می‌افتد. استهلاک انرژی بر اثر تماس جت جریان آب و هوا و اختلاط جت روی هر پله و تشکیل پرش هیدرولیکی کامل و یا ناقص روی هر پله حاصل

در کنار امکانات و پیشرفت‌های گسترده در امر ساخت سدهای بزرگ، لزوم توسعه روش‌های طراحی و ساخت سیستم‌هایی که بتوانند سیلاب‌ها را به درستی تخلیه کنند، مطرح می‌گردد. شوت‌ها و سرریزها باید به گونه‌ای طراحی شوند که در حین عملکرد، هیچ گونه صدمه عمده‌ای به خود سازه و همچنین محیط اطراف آن وارد نیاورند [۱].

دیدگاه استفاده از هندسه پلکانی شکل در ساخت سرریزها، از زمان‌های قدیم مطرح بوده است. لیکن با در نظر گرفتن عواملی نظیر تأثیر قابل ملاحظه پلکان‌ها بر میزان استهلاک انرژی جریان، شناخت تکنولوژی‌های جدید در استفاده از بتن غلتکی و همخوانی این روش با ساخت سرریز یاد شده، باعث کاربرد وسیع سرریزهای پلکانی در تعداد زیادی از پروژه‌ها شده است. میزان استهلاک انرژی زیاد ایجاد شده توسط پلکان‌ها

می‌شود.

از آن جایی که شرایط جریان آب بر روی سرریز پلکانی رژیم‌های متلاطم مختلفی را تجربه می‌کند، لذا خواص جریان شامل عمق آب، سرعت، غلظت هوا و پراکنش انرژی با توجه به خصوصیات این سه نوع رژیم به صورت جداگانه تحت بررسی قرار می‌گیرند. بنابر این برای یک طرح، تخمین رژیم‌های جریان احتمالی مرتبط با دبی طرح بسیار مهم خواهد بود. به همین دلیل، شرایط ایجاد رژیم‌های مختلف جریان موضوع انجام دسته‌ای از مطالعات تحقیقاتی و آزمایشگاهی بوده است.

معیارهای مؤثر در به وجود آمدن انواع جریان در سرریزهای پلکانی شامل هندسه پله‌ها (طول پله l و ارتفاع پله h) و میزان دبی عبوری از روی سرریز Q می‌باشند.

محققین مختلف معیارهای دیگری را نیز ارائه داده‌اند [۴] که در این بخش اشاره مختصری به آن‌ها می‌گردد. آنالیز ابعادی نشان می‌دهد که نوع رژیم جریان وابسته به عمق بحرانی نرمال شده (h_c/h_s) و مختصات بدون بعد پله (h_s/l_s) می‌باشد که در آن h_c عمق بحرانی جریان و وابسته به دبی، h_s و l_s به ترتیب ارتفاع و عرض پله می‌باشند. با تمامی این تفاسیر، در نهایت تشخیص نهایی نوع رژیم جریان به صورت مشاهده‌ای انجام می‌شود و لذا تابع تجربیات فرد می‌باشد. این مسأله می‌تواند تا حدودی پراکندگی بین نتایج استخراج شده توسط محققین مختلف را توجیه نماید [۵].

رژیم جریان ریزشی^۱

Chanson [۶]:

$$\left(\frac{y_c}{h}\right) \leq 0.0916 \left(\frac{h}{l}\right)^{-1.276}; 0.2 \leq \frac{h}{l} \leq 0.6 \quad (1)$$

Yasuda et al. [۷]:

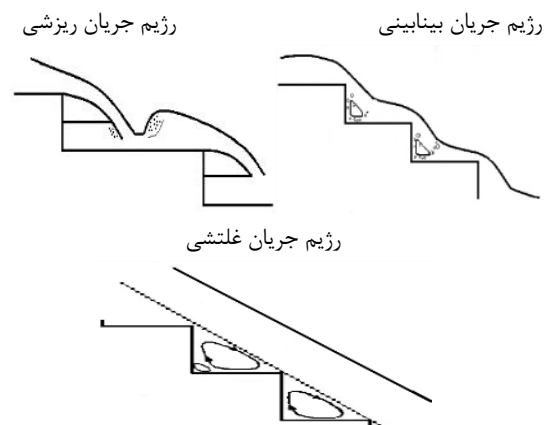
$$\left(\frac{y_c}{h}\right) = 0.57 \left(\frac{h}{l}\right)^3 + 1.3; 0.1 \leq \frac{h}{l} \leq 1.43; \quad (2)$$

$$0 < \left(\frac{h}{y_c}\right) \leq 1.37$$

$$\text{Chanson } [\Delta]: \left(\frac{y_c}{h}\right) = 0.89 - 0.4 \left(\frac{h}{l}\right); 0.05 \leq \frac{h}{l} \leq 1.7 \quad (3)$$

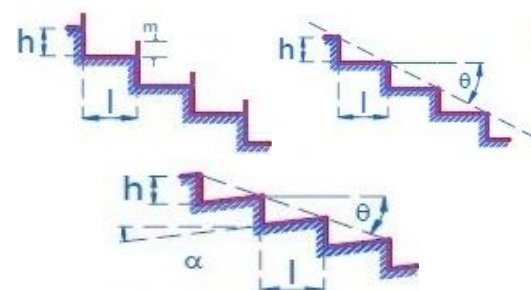
ب) در رژیم جریان غلثشی، پلکان‌ها با اثری مشابه با زبری کف بستر، در برابر جریان عمل می‌کنند. در این نوع رژیم، یک بستر کاذب که آستانه انتهایی پلکان‌های متوالی را به یکدیگر متصل می‌سازد، تشکیل می‌گردد. قسمت اعظم استهلاک انرژی در این نوع رژیم، بر اثر ایجاد جریان‌های چرخشی زیر بستر کاذب ایجاد می‌شود.

ج) رژیم جریان بینابینی نیز یک وضعیت جریان بین رژیم جریان ریزشی و غلثشی است. در این وضعیت، جریان دارای شکل و حالت مشخصی بر روی سرریز نمی‌باشد [۳]. در شکل (۱)، انواع حالات ممکن برای شکل‌گیری رژیم جریان بر روی سرریزهای پلکانی قابل مشاهده است.



شکل ۱- انواع شکل‌گیری رژیم جریان بر روی سرریز پلکانی

در حالت کلی، سرریزهای پلکانی به سه دسته سرریز پلکانی با پله ساده، لبه‌دار و شیب‌دار تقسیم می‌شوند. در شکل (۲)، سه دسته فوق نمایش داده شده است. در این شکل پارامترهای مختلفی مانند ارتفاع پله h ، طول پله l ، میزان افزایش ارتفاع پله m و $\theta = \tan m/l$ شیب کف پله که به دلیل لبه‌دار شدن یا شیب‌دار شدن کف پله‌ها ایجاد می‌شود قابل مشاهده است.



شکل ۲- انواع سرریز پلکانی با توجه به خصوصیات هندسی

$$\left(\frac{y_c}{h}\right) = 0.927 - 0.005\theta - 0.388\left(\frac{s}{1}\right) \quad (10)$$

در روابط (۹) و (۱۰)، پارامتر θ مقدار شیب کف پله می‌باشد که می‌توان در سرریز پلکانی آن را با $\theta = \tan \frac{m}{t}$ جایگزین نمود.

محمودی و راوریبا [۱۳] استفاده از شبیه‌سازی فیزیکی در یک کانال پایه‌دار، به بررسی اثر نصف کردن ابعاد فاصله بین دو پله، در یک سوم‌های مختلف از طول سرریز پلکانی پرداختند. آن‌ها اثر هر یک از انواع تغییرات را در میزان افت انرژی با کاربرد نرم افزار Flow-3D بررسی کردند و نتایج مدل فیزیکی را مورد تأیید قرار دادند.

شجاع و همکاران [۱۴] با استفاده از الگوریتم ژنتیک در محیط برنامه‌نویسی MATLAB اقدام به تعیین ابعاد بهینه سرریز سد مخزنی ساروق در استان آذربایجان غربی نمودند. آن‌ها با تغییر عرض و ارتفاع پله‌ها و همچنین شیب و ارتفاع سرریز، روشی جامع برای طراحی بهینه سرریزهای پلکانی ارائه نمودند. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که سرریز پلکانی جایگزین شده به جای سرریز صاف، منجر به افزایش استهلاک انرژی و کاهش ابعاد مستهلک کننده انرژی در پایین دست گردیده است.

Dermawan و Legono [۱۵] به بررسی میزان انرژی باقی مانده و افت نسبی انرژی بر روی سرریز پلکانی با شیب ۴۵ درجه، ارتفاع ۱۰۰ و عرض ۳۰ سانتی متر پرداختند. در ادامه سطح سرریز پلکانی را از تاج سرریز تا پنجه آن طی ۵ مرحله به ۲، ۴، ۸، ۱۶ و ۳۲ پله تقسیم نمودند و ۵ نوع از تغییرات دبی از ۱/۷۳ تا ۶/۱۵ لیتر بر ثانیه را برای هر کدام از مراحل به دست آوردند. نتایج به دست آمده نشان دادند که برای هر تعداد از مراحل، میزان افت نسبی انرژی با افزایش نسبت Y/h کاهش می‌یابد.

Abbasi و Kamanbedast [۱۶] به حل عددی و شبیه سازی ریاضی سه گروه از انواع مختلف سرریزهای پلکانی با استفاده از نرم افزار Flow-3D اقدام نمودند. آن‌ها به بررسی میزان افت و مقایسه آن با شرایط شبیه‌سازی آزمایشگاهی (هیدرولیکی) که در گذشته انجام شده بود، پرداختند. همچنین روابطی را برای افت انرژی نسبی و عمق بحرانی جریان در سرریزهای پلکانی ارائه و مورد بحث قرار دادند.

Roushangar و همکاران [۱۷] با استفاده از مجموعه داده-های تجربی، از طریق شبکه‌های عصبی مصنوعی و تکنیک‌های

Chinnarasri [۸]:

$$\left(\frac{y_c}{h}\right) = 0.98 \left(0.55\right)^{\frac{h}{l}}; 0.05 \leq \frac{h}{l} \leq 1.7 \quad (4)$$

- رژیم جریان غلتشی^۱

Rajaratnam [۴]:

$$\left(\frac{y_c}{h}\right) \leq 0.8; 0.4 \leq \frac{h}{l} \leq 0.9 \quad (5)$$

Chanson [۶]:

$$\left(\frac{y_c}{h}\right) = 1.057 - 0.465\left(\frac{h}{1}\right); 0.2 \leq \frac{h}{l} \leq 1.25 \quad (6)$$

Mondardo et al. [۹]:

$$\left(\frac{y_c}{h}\right) > 1.1974 - 0.59501\left(\frac{h}{1}\right) \quad (7)$$

Boes [۱۰]:

$$\left(\frac{y_c}{h}\right) = 0.91 - 0.14\left(\frac{h}{1}\right); 0.47 \leq \frac{h}{l} \leq 1 \quad (8)$$

سلماسی با تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از تعداد زیادی آزمایش نشان داد که استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی متأثر از تعداد پله‌ها بوده و به ازای تعداد پله مشخص، می‌توان به حداکثر استهلاک انرژی دست یافت [۱۱].

Chinnarasri و Wongwises [۱۲] برای تعیین نوع جریان در سرریزهای پلکانی روابط (۹) و (۱۰) را ارائه نمودند. رابطه (۹) کمترین عمق بحرانی برای تشکیل جریان غلتشی و رابطه (۱۰) بیشترین عمق بحرانی را برای تشکیل جریان ریزشی در سرریز پلکانی ساده و شیب‌دار ارائه می‌دهند.

$$\left(\frac{y_c}{s}\right) = (0.844 + 0.003\theta)\left(\frac{s}{1}\right)^{-0.15+0.004\theta} \quad (9)$$



شکل ۳ - چیدمان آزمایشگاهی و نحوه تعبیه مدل فیزیکی در فلوم

در فلوم مذکور، جریان مورد نیاز برای انجام آزمایش با استفاده از یک پمپ گریز از مرکز به درون آن قابل انتقال است. در محل ورودی جریان آب به داخل فلوم، از یک شیر فلکه جهت کنترل میزان دبی ورودی، استفاده می‌گردد. پمپ مورد استفاده قابلیت ایجاد دبی تا ۶۰ لیتر بر ثانیه را دارا می‌باشد. آب پس از عبور از شوت پلکانی و حوضچه آرامش پایین‌دست، مجدداً به کانال باز می‌گردد. مدل سرریز پلکانی مربوطه، در موقعیت ۸ متری از ابتدای فلوم نصب گردید. مدل حاضر، از نوع لبه پهن بوده و اندازه کف پله‌ها، ارتفاع هر پله و عرض سرریز به ترتیب ۲۵، ۱۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشند. بر اساس نظر Chanson [۱] استفاده از سرریز لبه پهن در شوت‌های پلکانی مناسب‌تر می‌باشد. از آنجائی که در انجام بررسی‌های مربوط به الگوهای جریان عبوری، پروفیل سطح آب حساسیت بالایی به شرایط مرزی خود دارد، لذا انجام اندازه‌گیری آن، مستلزم استفاده از شیوه‌های آزمایشگاهی دقیق و کنترل شده می‌باشد. طی سال‌های اخیر استفاده از روش پردازش تصاویر در تحلیل نتایج آزمایشگاهی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. چرا که به کمک این روش، بدون اختلال در شرایط آزمایش، امکان برآورد پارامترهای مطلوب ایجاد می‌شود.

پردازش تصاویر عبارت است از فرآیندی جهت استخراج داده‌های کمی و قابل تحلیل که با استفاده از تصاویر دیجیتالی به دست آمده از تضاد محیط‌های نیمه شفاف، انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر به کمک این روش، تصاویر تهیه شده از محیط مورد نظر توسط یک الگوریتم یا نرم‌افزار کامپیوتری به مقادیر عددی تبدیل می‌شود. این روش در علوم مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹]. در شکل (۴-الف) جریان عبوری بر روی مدل فیزیکی و در شکل (۴-ب) شرایط جریان عبوری بر روی مدل سرریز مربوطه که از فرآیند پردازش تصویر به دست آمده است، قابل مشاهده می‌باشد.

برنامه‌نویسی ژنتیکی (GEP) به کاربرد روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی اتلاف انرژی در جریان ریزشی و غلتشی در طول سرریز پلکانی پرداختند.

منصوری و همکاران به بررسی استهلاك انرژی در رژیم جریان ریزشی در سرریز پلکانی مجهز به پله‌های شیب‌دار و آستانه‌دار پرداختند. در این تحقیق، جهت افزایش میزان استهلاك انرژی، پله‌ها دارای شیب معکوس گشته و در بخشی دیگر، علاوه بر ایجاد شیب معکوس در پله‌ها، توأماً آستانه نیز روی لبه پله‌ها نصب گردید. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تغییر حاصل از شیب، ارتفاع آستانه‌ها و ضخامت آستانه‌ها بر افزایش افت انرژی موثرند؛ اما تأثیر این پارامترها در رژیم جریان ریزشی بیشتر از رژیم جریان غلتشی می‌باشد [۱۸].

در مطالعه حاضر، جهت ارزیابی تأثیر پارامترهایی چون عمق بحرانی (V_c)، تعداد پله‌ها (N) و شیب کف پله‌ها (α)، با ثابت در نظر گرفتن نسبت طول و ارتفاع کلی سرریز، از مدل‌سازی عددی، استفاده می‌گردد. همچنین به منظور صحت‌سنجی عملکرد مدل عددی در تخمین پارامتر استهلاك انرژی نیز یک مدل فیزیکی سرریز پلکانی در یک کانال جریان آزمایشگاهی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. تاکنون گزارشی مبنی بر استفاده از سیستم استنتاج فازی به عنوان یک ابزار مؤثر در محاسبات نرم، جهت ارزیابی پارامتر استهلاك در سرریزهای پلکانی، در متون فن مربوطه مشاهده نگردیده است. در این تحقیق، نحوه مدل‌سازی ردگیری تغییرات این پارامتر با استفاده از سیستم استنتاج فازی بررسی و به تهیه یک مدل بر اساس شرایط موجود اقدام می‌شود. مشاهده می‌گردد که نتایج حاصل از سیستم استنتاج فازی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی دارای تطابق مناسبی است که دلالت بر کارائی مفهوم سیستم استنتاج فازی در محاسبه پارامتر استهلاك انرژی در سرریزهای پلکانی دارد.

۲- مشخصات مدل فیزیکی و چیدمان آزمایش مربوطه

جهت انجام آزمایش‌های مربوط به این تحقیق، از یک مدل فیزیکی سرریز پلکانی ۴ پله‌ای، استفاده گردید. به گونه‌ای که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد، چیدمان مربوط به آزمایش، در داخل یک فلوم ۱۵ متری انجام گرفت.

Chanson [۱] افت کل انرژی (ΔH) برای حالتی که جریان در انتهای سرریز به شرایط یکنواخت برسد را از روابط (۱۳) و (۱۴) محاسبه نمود:

سرریز بدون دریچه:

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha}\right)^{\frac{1}{3}} \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha}\right)^{-\frac{2}{3}}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{\text{dam}}}{d_c}} \quad (13)$$

سرریز با دریچه:

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha}\right)^{\frac{1}{3}} \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha}\right)^{-\frac{2}{3}}}{\frac{H_{\text{dam}}}{d_c} + H_o} \quad (14)$$

که در این روابط، f_e فاکتور اصطکاک جریانهای آب- هوا، $H_{\max}$ حداکثر بار، H_{dam} اختلاف ارتفاع تاج تا پنجه سرریز و H_o ارتفاع سطح آزاد مخزن در بالای تاج سرریز می باشد [۲۰].

Chanson [۲] رابطه (۱۵) را جهت تعیین میزان افت انرژی در سرریزهای پلکانی با پله های افقی در رژیم جریان ریزشی ارائه نمود:

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{0.54 \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0.275} + 1.715 \left(\frac{d_c}{h}\right)^{-0.55}}{1.5 + \frac{H_{\text{dam}}}{d_c}} \quad (15)$$

که در این رابطه $H_{\max} = (H_{\text{dam}} + 2/3 h_c)$ انرژی کل، ΔH انرژی مستهلک شده در طول شوت، d_c عمق بحرانی، H_{dam} ارتفاع سد و h ارتفاع پله می باشد.

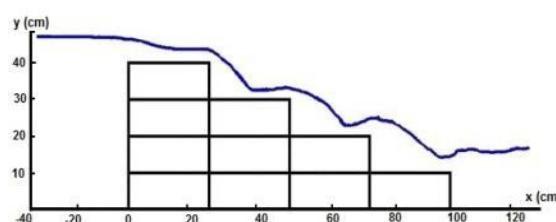
Chinnarasri و Wongwises [۱۲]، با اطلاعات به دست آمده از آزمایشاتشان، رابطه (۱۶) را برای تعیین میزان افت انرژی در سرریزهای پلکانی همراه با شیب پله و یا آستانه دار ارائه نمودند:

$$\frac{E_L}{E_1} = \eta \left(\frac{d_c}{h}\right)^{\xi} \quad (16)$$

که برای پله های شیب دار:



(الف)



(ب)

شکل ۴- (الف) شرایط جریان عبوری بر روی مدل فیزیکی، پروفیل جریان عبوری از روی سرریز، (ب) شرایط جریان عبوری از روی سرریز بر اساس پروفیل حاصل از فرآیند پردازش تصویر

۳- روابط کاربردی مطرح جهت محاسبه استهلاک انرژی در سرریز پلکانی

از پارامترهای اصلی مؤثر بر استهلاک انرژی در طول سرریز پلکانی، می توان به تعداد پله ها (N)، ارتفاع پله (h)، طول پله ها (l)، عرض پله ها (b)، انرژی اولیه جریان در بالادست سرریز (E_1)، دبی واحد عرض (q) و میزان افزایش ارتفاع پله ها (m) به دلیل لبه دار و یا شیب دار شدن کف پله ها اشاره کرد. این متغیرها به صورت رابطه (۱۱) قابل بیان هستند:

$$E_L = E_L(E_1, q, h, g, m, N) \quad (11)$$

با استفاده از تحلیل ابعادی در مورد متغیرهای رابطه (۱۱)، می توان روابط بی بعد شده زیر را ارائه داد:

$$\frac{E_L}{E_1} = \frac{E_L}{E_1} \left(\frac{y_c}{h} \frac{h}{l} \frac{m}{h} N \right) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، ارتفاع بحرانی جریان در یک آب راه مستطیلی $y_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}}$ می باشد.

بنیان‌گذاری شده توسط دکتر هارت توسعه داده شده است [۲۲]. مدل Flow-3D توانایی بالایی در شبیه‌سازی انواع پروفیل‌های جریان سیال، انتقال رسوب و آبشستگی دارد و مدل مناسبی برای انجام شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی می‌باشد. همچنین از قابلیت تحلیل یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی میدان جریان برخوردار می‌باشد. در این نرم‌افزار از دو تکنیک عددی روش حجم سیال (VOF)، برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد و روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR)، برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی، استفاده می‌شود.

۴-۱- معادلات حاکم بر جریان در نرم‌افزار Flow-3D

معادلات اصلی حاکم بر جریان سیال شامل معادله پیوستگی و معادله مومنوم می‌باشند که آن‌ها را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

الف) معادله بقای جرم یا معادله پیوستگی:

معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن معادله تعادل جرم برای یک المان سیال به دست می‌آید. به صورت کلی این معادله به شکل رابطه (۲۴) نوشته می‌شود:

$$V_F \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A_x)}{\partial x} + R \frac{\partial(\rho v A_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w A_z)}{\partial z} - \xi \frac{\partial(\rho u A_x)}{\partial x} = RDIF + RSOR \quad (24)$$

در این معادله، حجم جزئی سیال (بخشی از حجم کل که توسط مایع پر شده است)، چگالی سیال، (u, v, w) سرعت‌های جزئی در جهت‌های (x, y, z) در مختصات کارتزین و A_x, A_y و A_z مساحت‌های جزئی در جهات فوق می‌باشد. ضریب R در معادله فوق به انتخاب سیستم مختصات بستگی دارد. $RDIF$ نشان‌دهنده عبارت پخشیدگی ناشی از آشفتگی و نمایانگر منبع جرم می‌باشد. اولین عبارت سمت راست معادله فوق، ترم آشفتگی است و به این صورت محاسبه می‌شود:

$$RDIF = \frac{\partial(v \rho A_x \frac{\partial P}{\partial x})}{\partial x} + R \frac{\partial(v \rho A_y \frac{\partial P}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(v \rho A_z \frac{\partial P}{\partial z})}{\partial z} + \xi \frac{\partial(v \rho A_x)}{\partial x} \quad (25)$$

$$\eta = -0.034 \ln\left(\frac{h}{m}, \frac{h}{l}\right) + 0.767 \quad (17)$$

$$\xi = -0.015 \ln\left(\frac{l}{m}\right) - 0.216 \quad (18)$$

و برای پله با آستانه انتهایی:

$$\eta = -0.028 \ln\left(\frac{h}{m}, \frac{h}{l}\right) + 0.81 \quad (19)$$

$$\xi = -0.030 \ln\left(\frac{l}{m}\right) - 0.149 \quad (20)$$

آن‌ها نتیجه گرفتند که آستانه‌ها تأثیر بیشتری نسبت به شیب پله در میزان افت انرژی دارند. همچنین با دبی ثابت و ارتفاع پله ثابت، هرچه تعداد پله‌ها افزایش یابد میزان استهلاک انرژی نیز بیشتر می‌گردد.

شمسایی و صداقت‌نژاد، برای محاسبه میزان افت انرژی آزمایشگاهی از روابط زیر استفاده نمودند:

$$E_1 = P + H \quad (21)$$

$$E_2 = d + \frac{v^2}{2g} \quad (22)$$

$$\Delta E = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (23)$$

که در این روابط:

E_1 : میزان انرژی در بالادست سرریز

P : ارتفاع سرریز

E_2 : انرژی در پنجه سرریز

d : عمق جریان در پنجه

v : سرعت در پنجه

H : ضخامت تیغه آب بر روی تاج سرریز می‌باشند [۲۱].

۴- مدل‌سازی میدان جریان با استفاده از واسنجی نرم-

افزار Flow-3D

Flow-3D نرم‌افزاری کارآمد در زمینه دینامیک سیالات

محاسباتی می‌باشد که توسط شرکت Flow science, inc.

در این تحقیق، دو حالت سرریزهای پلکانی ساده و شیب‌دار مورد بررسی قرار گرفته‌است. در مجموع ۱۲ مدل عددی ساخته شده که شامل ۳ گروه ۴، ۸ و ۱۰ پله‌ای می‌باشد. این سه گروه از سرریز پلکانی برای دو دبی ۰/۰۳ و ۰/۰۸ متر مکعب بر ثانیه مورد تحلیل قرار گرفته‌است.

۴-۳- معرفی میدان حل، شبکه‌بندی و شرایط مرزی

در انجام مدل‌سازی، از یک بلوک برای انجام محاسبات استفاده شده‌است. برای تعریف مانع با مرزهای صلب که در این-جا سرریز پلکانی می‌باشد، از نرم‌افزار AutoCAD استفاده گردیده است. برای این منظور، هندسه سازه به صورت فایلی با فرمت STL^۱ توسط Flow-3D فراخوانی شده و سپس در نرم-افزار به تعریف مشخصات هندسی و شبکه‌بندی میدان جریان اقدام می‌گردد. لازم به ذکر است که جهت نزدیک بودن نتایج فرآیند شبیه‌سازی به شرایط آزمایشگاهی، یک سرریز لبه تیز کنترلی نیز در پایین‌دست مسیر جریان تعریف شده است. شرایط مرزی به کار رفته در این بررسی به شرح زیر است:

- شرط مرزی بالادست (x_{min}): Specified pressure

- شرط مرزی پایین‌دست (x_{max}): Outflow

- قسمت فوقانی (z_{max}): Symmetry

- قسمت تحتانی (z_{min}): Wall

- دیواره‌های جانبی (y_{min}, y_{max}): Wall

یکی از قابلیت‌های مهم نرم‌افزار Flow-3D اجرای همزمان یک مدل بر روی چند دستگاه رایانه و یا استفاده هم‌زمان از تمامی هسته‌های موجود در پردازشگرهای چند هسته‌ای (که اجرای موازی برنامه) می‌باشد. این قابلیت باعث کاهش زمان مورد نیاز برای اجرا و بالتبع بالا بردن سرعت اجرا می‌گردد. لذا در این مطالعه با توجه به بازه محدوده محاسباتی و انتخاب شبکه‌بندی تقریباً ریز به منظور محاسبات دقیق‌تر و همچنین استفاده بهینه از رایانه چهار هسته‌ای، با استفاده از این قابلیت بر سرعت اجرا افزوده شده است.

نرم‌افزار Flow-3D این امکان را به کاربر می‌دهد که بعد از تعیین تعداد مش‌ها، صحت تناسب تعداد آن‌ها را در سه راستای X، Y و Z به وسیله دو پارامتر حداکثر نسبت ابعاد شبکه^۲ و ضریب نسبت ابعاد شبکه^۳ در راستاهای مختلف تعیین نماید. این دو پارامتر در قسمت Mesh Information قرار دارند. پارامتر

در این معادله $\frac{\mu c}{\rho} = \frac{\mu}{\rho}$ است که در آن μ ضریب پخش مومنتم (لزجت)، و $RSOR$ عبارت مربوط به چگالی، P برابر فشار و ξ ضریب ثابتی است که معکوس آن به عنوان عدد آشفستگی اشمیت نامیده می‌شود.
(ب) معادلات مومنتم:

معادلات حرکت برای سرعت‌های جزئی در سیال در جهت-های مختلف محور مختصات، به شکل معادلات ناویر استوکس با در نظر گرفتن ترم‌های مربوطه تعریف می‌شود:

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

$$\rho V_F f_x = w s_x - \left\{ \frac{\partial(A_x \tau_{xx})}{\partial x} + R \frac{\partial(A_y \tau_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial(A_z \tau_{xz})}{\partial z} + \frac{\xi(A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{xy})}{x} \right\} \quad (26)$$

در این معادله، G_x شتاب بدنه، f_x شتاب ناشی از لزجت و b_x افت جریان در محیط‌های متخلخل می‌باشد. آخرین عبارت سمت راست نشان‌دهنده افزایش جرم در سرعت صفر می‌باشد [۲۲].

۴-۲- مدل‌سازی عددی جریان عبوری از روی سرریز بر اساس مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه

در این بخش، جزئیات مدل‌سازی در نرم‌افزار Flow-3D ارائه می‌گردد. مسأله اصلی، نحوه شبیه‌سازی جریان آب بر روی سرریز پلکانی خواهد بود. سرریز مدل آزمایشگاهی توضیح داده شده، دارای ارتفاع ۴۰ و طول ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. مدل‌های عددی شبیه‌سازی شده به گونه‌ای طراحی شده‌اند که ارتفاع و طول کلی مدل را حفظ نمایند. در جدول (۱) مشخصات هندسی مدل‌های مورد بررسی ارائه شده‌است.

جدول ۱- شیب و تعداد پله‌های مورد استفاده در مدل‌ها

شیب پلکان (درجه)	تعداد پلکان	نسبت طول به ارتفاع هر پله
۰-۴-۸-۱۲	۴	h/l=۰/۴
۰-۴-۸-۱۲	۸	
۰-۴-۸-۱۲	۱۰	

1- Stereo lithographic

2- Maximum aspect ratios

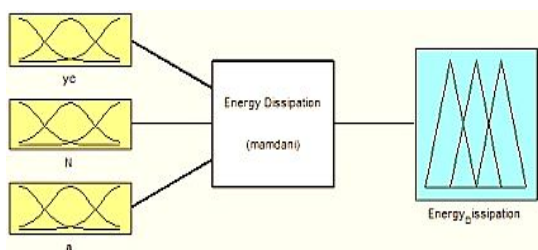
3- Maximum adjacent cell size ratio

مهم باید به گونه‌ای دنبال شود که به ازای تغییر پارامترهای مؤثر در طراحی این سرریزها، بیشترین میزان استهلاک انرژی بر روی آن ایجاد شود. بدین منظور، از کارایی سیستم استنتاج فازی استفاده گردیده است. بدین شکل که اثر تغییرات پارامترهای مؤثر بر روی تغییر این پارامتر با استفاده از سیستم استنتاج فازی بررسی و به تهیه یک مدل سیستم استنتاج فازی بر اساس شرایط موجود اقدام شده است. در ادامه این بخش، خلاصه‌ای در ارتباط با مفاهیم منطق فازی ارائه می‌شود:

منطق کلاسیک مفاهیم را بر اساس یک سیستم دوتایی نشان می‌دهد (درست یا غلط، ۰ یا ۱، سیاه یا سفید)، ولی منطق فازی درستی هر چیزی را با یک عدد که مقدار آن بین صفر و یک است نشان می‌دهد. نقطه شروع ساخت یک سیستم فازی به دست آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر-آنگاه فازی از دانش افراد خبره یا دانش حوزه مورد بررسی می‌باشد. مرحله بعدی ترکیب این قواعد در یک سیستم واحد است.

معمولاً سه نوع سیستم فازی شامل سیستم‌های فازی خالص، سیستم‌های فازی تاکاگی، سوگنو و کانگ (TSK) و سیستم‌های فازی‌ساز و غیر فازی‌ساز مطرح می‌باشند.

ساختار عمومی یک سیستم فازی قاعده‌مند شامل سه مرحله اصلی فازی‌سازی^۱، استنتاج و فازی‌زدایی^۲ [۲۴] می‌گردد. در شکل (۵)، تصویر شماتیک مربوط به سیستم فازی-ممدانی ایجاد شده در تحقیق حاضر، جهت بررسی استهلاک انرژی، نشان داده شده است. در این راستا، ابتدا به تعریف متغیرهای ورودی و خروجی و توابع عضویت مجموعه‌های فازی اقدام شده است.



شکل ۵- تصویر شماتیک ارتباط فازی پارامترهای ورودی و خروجی سیستم فازی-ممدانی مربوط به استهلاک انرژی

حداکثر نسبت ابعاد شبکه، بیشترین نسبت اندازه سلول‌های مجاور را در سه راستای X ، Y و Z نشان می‌دهد. طبق دستورالعمل نرم‌افزار جهت بالا رفتن دقت در حل مسئله و کاهش خطاهای ناشی از مش‌بندی، مقدار این پارامتر باید در هر سه راستای X ، Y و Z کمتر از $1/3$ باشد. پارامتر ضریب نسبت ابعاد شبکه، بیشینه نسبت صفحات را نسبت به یکدیگر به دست می‌دهد. مقدار این پارامتر نیز طبق دستورالعمل نرم‌افزار باید برای هر سه نسبت $X-Z$ ، $Y-Z$ و $X-Y$ کمتر از ۳ باشد [۲۳]. پس از تعیین تعداد مش‌ها با استفاده از فرایند سعی و خطا برای شبیه‌سازی‌های مختلف، طبق دستورالعمل گفته شده برای نرم-افزار صحت نسبت مش‌ها مورد بررسی قرار گرفت که این مقادیر در جدول (۲) بیان شده است.

جدول ۲- اطلاعات مش مورد استفاده برای همگرایی مش‌ها

Maximum aspect ratio	Maximum adjacent cell size ratio
X_Y direction: $2/27$	X direction: $1/25$
Y_Z direction: $1/18$	Y direction: ۱
Z_X direction: $2/69$	Z direction: ۱

واضح است که برای مدل‌سازی جریان‌های آشفته در مقایسه با جریان‌های آرام، نیاز به شبکه محاسباتی ریزتری می‌باشد. این امر به این خاطر است که متغیرهای آشفتگی تحت تغییرات شدیدتر مکانی قرار دارند و لذا این متغیرها و المان‌های مربوط به آن‌ها حاوی جزئیات بسیار بیشتری می‌باشند. در این بررسی با توجه به وجود جریان‌های چرخشی روی سرریز پلکانی در تمامی مدل‌ها از مدل آشفتگی RNG جهت دستیابی به بهترین شبیه-سازی استفاده شده است.

لازم به ذکر است که در کلیه شبیه‌سازی‌ها، به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر، مش‌بندی محدوده حول مدل تا فاصله ۳۰ سانتی‌متری پایین‌دست، ریزتر انتخاب شده است. نهایتاً جهت صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی، از نتایج حاصل از آزمایشگاه استفاده گردید.

۵- کاربرد سیستم استنتاج فازی در ارزیابی میزان استهلاک انرژی بر روی سرریز پلکانی

از اهداف اصلی انجام این مطالعه، دستیابی به روشی کارآمد جهت بهینه‌یابی پارامترهای هندسی سرریز پلکانی می‌باشد. این

در مرحله بعد، به استنباط روابط بین متغیرهای مربوطه بر مبنای قواعد تعیین شده در مرحله استنتاج پرداخته می‌شود. در این مرحله قواعد^۱ «اگر ... آنگاه» به کار گرفته و درجه عضویت تعیین و به زبان فازی بیان می‌شوند. سپس قواعد به دست آمده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و خروجی فازی مشخص می‌گردد [۲۵]. در نهایت باید از خروجی به دست آمده فازی-زدایی و نتیجه هدف بر مبنای عملکرد مورد انتظار از سیستم بیان شود. در شکل (۸)، مجموعه تولید شده اگر-آنگاه در ویرایشگر قواعدی که جهت طراحی سیستم استنتاج فازی مربوط به این تحقیق استفاده شده است، مشاهده می‌شود. در این قواعد، نحوه ارتباط بین متغیرها، بر مبنای ارزیابی مجموعه نتایج خروجی حاصل از مدل‌سازی عددی شرح داده شده، اثر داده شده‌اند.

Rule num	Rule
1.	If (yc is High) and (N is Low) and (a is low) then (ED is Med) (1)
2.	If (yc is High) and (N is Low) and (a is med) then (ED is Med) (1)
3.	If (yc is High) and (N is Low) and (a is high) then (ED is High) (1)
4.	If (yc is High) and (N is med) and (a is low) then (ED is High) (1)
5.	If (yc is High) and (N is med) and (a is med) then (ED is High) (1)
6.	If (yc is High) and (N is med) and (a is high) then (ED is Very_High) (1)
7.	If (yc is High) and (N is High) and (a is low) then (ED is High) (1)
8.	If (yc is High) and (N is High) and (a is med) then (ED is Very_High) (1)
9.	If (yc is High) and (N is High) and (a is high) then (ED is Very_High) (1)
10.	If (yc is Low) and (N is Low) and (a is low) then (ED is Med) (1)
11.	If (yc is Low) and (N is Low) and (a is med) then (ED is Med) (1)
12.	If (yc is Low) and (N is Low) and (a is high) then (ED is Med) (1)
13.	If (yc is Low) and (N is med) and (a is low) then (ED is Med) (1)
14.	If (yc is Low) and (N is med) and (a is med) then (ED is Med) (1)
15.	If (yc is Low) and (N is med) and (a is high) then (ED is High) (1)
16.	If (yc is Low) and (N is High) and (a is low) then (ED is Med) (1)
17.	If (yc is Low) and (N is High) and (a is med) then (ED is High) (1)
18.	If (yc is Low) and (N is High) and (a is high) then (ED is Very_High) (1)

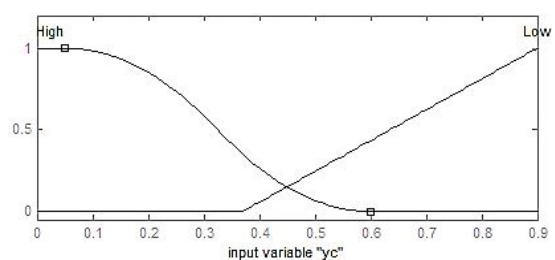
شکل ۸- ویرایشگر قواعد- سیستم مدانی

۶- نتایج و بحث

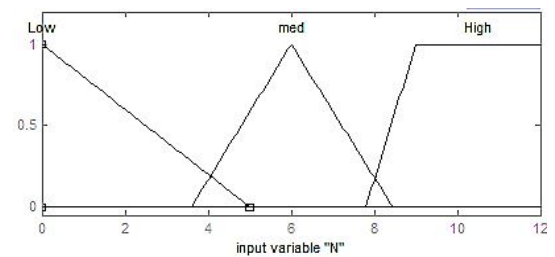
از اهداف اصلی این مطالعه، ارزیابی عملکرد مفهوم سیستم استنتاج فازی در تخمین پارامتر استهلاك انرژی بر روی سرریز پلکانی و تهیه یک مدل سیستم استنتاج فازی بر اساس شرایط فیزیکی مربوطه می‌باشد. در این راستا، ابتدا اعتبار نتایج حاصل از مدل عددی، سنجیده می‌شود. جهت صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، از ارزیابی الگوی پروفیل جریان اندازه‌گیری شده در آزمایش تجربی مربوطه، استفاده شده است. در شکل (۹)، پروفیل سطح جریان حاصل از مدل عددی و همچنین مقادیر متناظر تجربی، با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند. با توجه به این شکل، همبستگی قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی مشاهده می‌گردد.

برای این منظور ۳ متغیر N ، a و yc (به ترتیب عمق بحرانی، تعداد پله‌ها و شیب معکوس روی پله) به عنوان ورودی سیستم و میزان استهلاك انرژی به عنوان خروجی آن در نظر گرفته شده است.

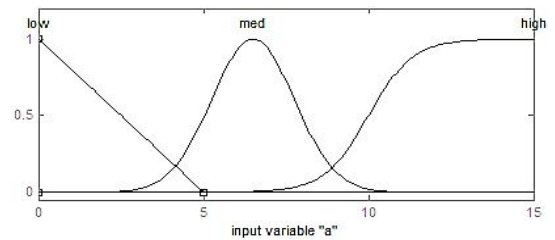
در شکل‌های (۶) و (۷) توابع عضویت متغیرهای ورودی مؤثر و استهلاك انرژی به عنوان خروجی نشان داده شده است. قابل ذکر است که برای انتخاب مناسب نوع و محدوده توابع عضویت، ضمن در نظر گرفتن تأثیر خصوصیات فیزیکی شرایط حاکم بر مسئله، از فرایند سعی و خطا استفاده شده است.



(الف)



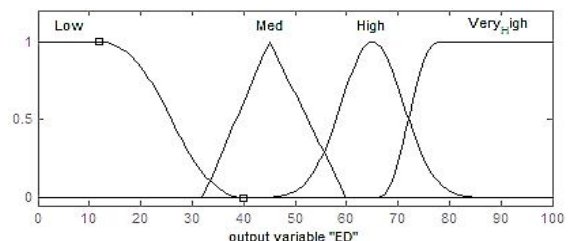
(ب)



(ج)

شکل ۶- توابع عضویت: (الف) عمق بحرانی جریان (yc).

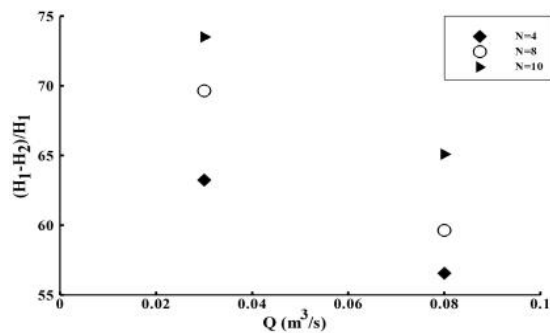
(ب) تعداد پله‌ها، (N)، (ج) شیب پله (a)



شکل ۷- توابع عضویت در نظر گرفته شده برای پارامتر

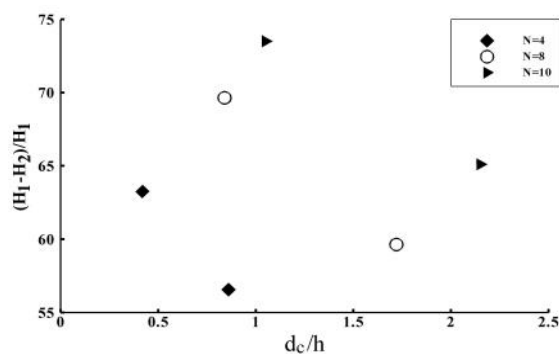
استهلاك انرژی (ED)

مشاهده می‌شود که با افزایش دبی استهلاک انرژی کاهش می‌یابد که این امر به دلیل کاهش زبری پله‌ها در اثر استغراق آن‌ها می‌باشد. در نتیجه در نمودار فوق در دبی معادل 0.03 متر مکعب بر ثانیه، بیشترین استهلاک انرژی معادل $0.73/5$ مشاهده می‌شود.



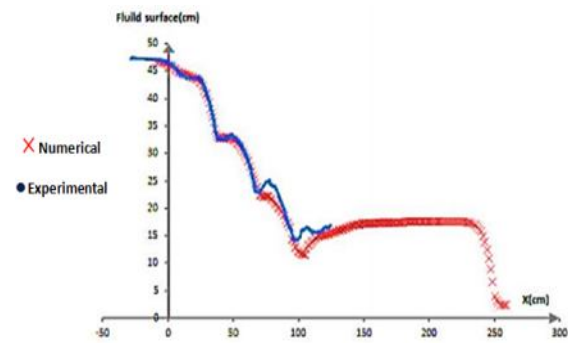
شکل ۱۱- تغییرات پارامتر استهلاک انرژی بر حسب دبی عبوری

• **اثر پارامتر بی بعد y_c/h بر روی میزان استهلاک انرژی**
به منظور ارزیابی تأثیر پارامتر بی بعد y_c/h (نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پلکان) در میزان استهلاک انرژی نیز از نتایج حاصل از مدل استفاده گردید. در شکل (۱۲) نمودار تغییرات y_c/h بر حسب استهلاک انرژی مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲- تغییرات y_c/h نسبت به استهلاک انرژی

در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار y_c/h استهلاک انرژی روندی نزولی دارد. افزایش این پارامتر سبب می‌شود تا تأثیر زبری ناشی از اثر پلکان، بر روی جریان کمتر و در نتیجه از میزان استهلاک انرژی کاسته شود.

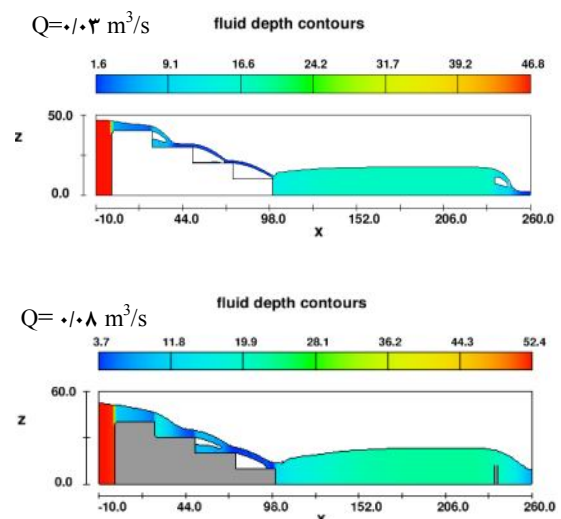


شکل ۹- مقایسه پروفیل سطح آب بین مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی

۶-۱- تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از مدل عددی نرم افزار Flow3D

با اجرای مدل، پارامترهای هیدرولیکی مورد نیاز محاسبه و ثبت گردیدند. از آن جایی که پارامتر اصلی مورد مطالعه در این تحقیق، استهلاک انرژی است، در این بخش با استفاده از این نتایج، به بررسی تأثیر دبی جریان (Q)، تعداد پله‌ها (N) و شیب معکوس روی پله‌ها (a) بر استهلاک انرژی، پرداخته می‌شود.

• **بررسی استهلاک انرژی بر حسب تغییرات دبی عبوری**
شکل (۱۰) جریان عبوری از روی مدل سرریز ۴ پله‌ای در دو دبی 0.03 و 0.08 متر مکعب بر ثانیه نمایش می‌دهد.

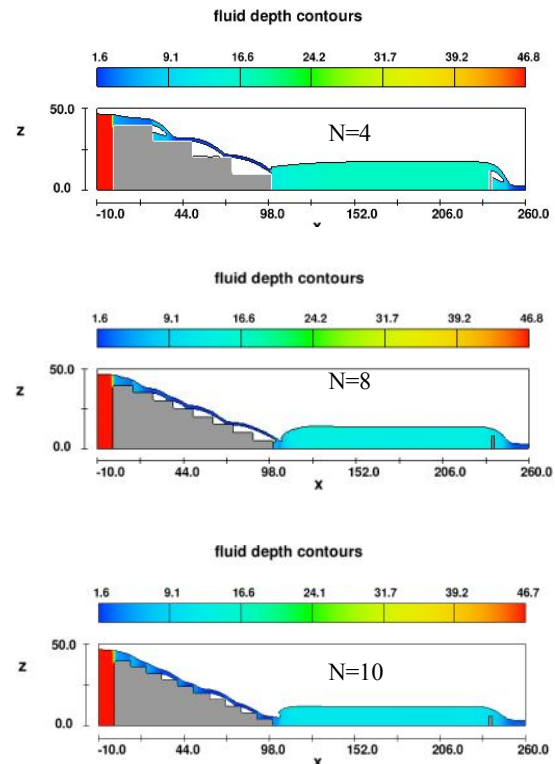


شکل ۱۰- جریان عبوری شبیه‌سازی شده از روی مدل ۴ پله‌ای

شکل (۱۰) بیانگر این است که با افزایش دبی، عمق جریان عبوری از روی سرریز افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (۱۱)

• بررسی نحوه تأثیر تعداد پلکان بر میزان استهلاک انرژی

در شکل (۱۳) جریان عبوری از روی سه مدل ۴، ۸ و ۱۰ پله‌ای جهت بررسی اثر تعداد پله‌ها بر میزان استهلاک انرژی نشان داده شده است.



شکل ۱۳- جریان عبوری از روی پله‌ها- دبی $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ متر مکعب بر ثانیه

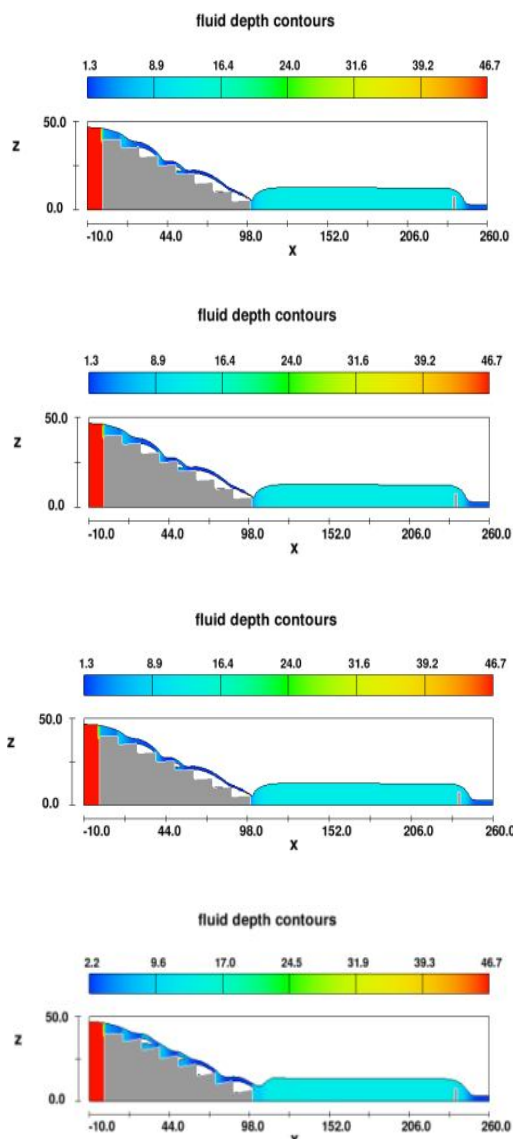
در جدول (۳) نتایج حاصل برای مدل‌ها با تعداد پلکان مختلف آورده شده‌اند. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پله‌ها استهلاک انرژی روند افزایشی داشته است؛ به طوری که در $N=10$ پله بیشترین میزان استهلاک انرژی مشاهده می‌شود.

جدول ۳- تغییرات استهلاک انرژی نسبت به تعداد پلکان

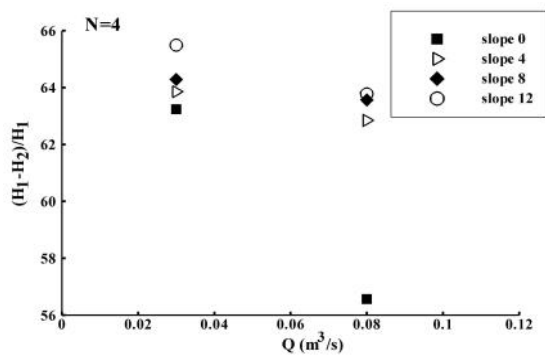
استهلاک انرژی		تعداد پله‌ها
دبی $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$	دبی $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$	
۰/۵۶۵۶	۰/۶۳۲۴	۴
۰/۵۹۶۴	۰/۶۹۶۴	۸
۰/۶۵۱۰	۰/۷۳۵۰	۱۰

• بررسی اثر شیب معکوس پله‌ها در میزان استهلاک انرژی

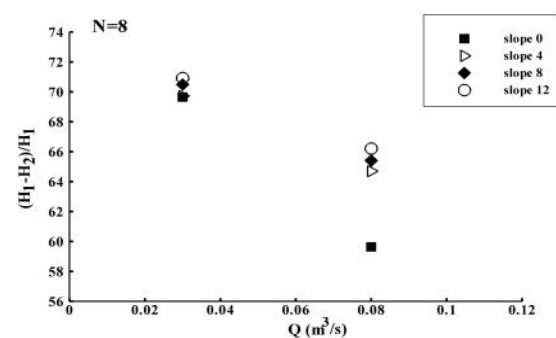
شکل (۱۴) جریان عبوری از روی مدل ۸ پله‌ای را تحت اثر شیب‌های صفر تا ۱۲ درجه نشان می‌دهد همان طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، شیب‌دار شدن وجه افقی پله تا ۴ درجه، باعث انسداد جریان در کنج پله-ها شده است که با افزایش شیب پله، حجم آن افزایش می‌یابد، به طوری که بعضی از پله‌ها تقریباً به صورت پر عمل می‌نمایند.



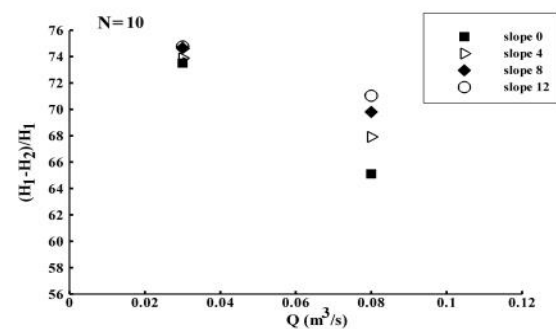
شکل ۱۴- جریان عبوری از روی پله‌های دارای شیب معکوس



(الف)



(ب)



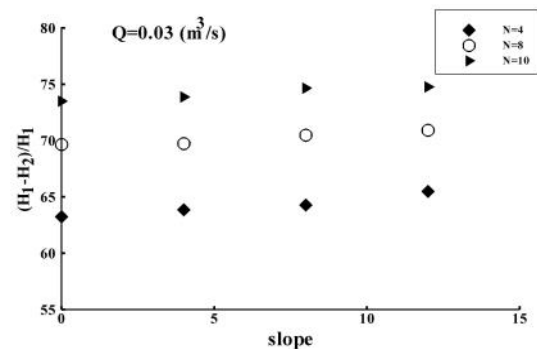
(ج)

شکل ۱۶- الف) نمودار تغییرات استهلاک انرژی بر حسب دبی مدل ۴ پله‌ای، ب) نمودار تغییرات استهلاک انرژی بر حسب دبی مدل ۸ پله‌ای، ج) نمودار تغییرات استهلاک انرژی بر حسب دبی مدل ۱۰ پله‌ای

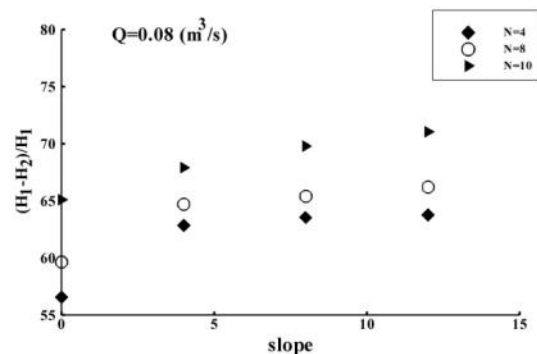
۲-۶- ارزیابی عملکرد سیستم استنتاج فازی در تخمین پارامتر استهلاک انرژی

در شکل (۱۷)، ارتباط فازی متغیرهای مؤثر بر استهلاک انرژی (که بر مبنای قواعد تعریف شده در سیستم استنتاج فازی برای این تحقیق ترسیم شده‌اند) نشان داده شده است. با توجه به سه بعدی بودن قابلیت ترسیم رویه‌های ارتباطی، مطابق با

در شکل (۱۵) نیز نمودار تغییرات استهلاک انرژی برای دو دبی ۰/۰۳ و ۰/۰۸ متر مکعب بر ثانیه، آورده شده است. با توجه به این شکل، مشخص می‌گردد که با اعمال شیب معکوس روی پله‌ها میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۵- الف) تغییرات استهلاک انرژی نسبت به شیب کف پله برای دبی ۰/۰۳ متر مکعب بر ثانیه، ب) تغییرات استهلاک انرژی نسبت به شیب کف پله برای دبی ۰/۰۸ متر مکعب بر ثانیه

در شکل (۱۶) تغییرات دبی بر حسب استهلاک انرژی برای شیب‌های مختلف آورده شده‌اند.

شکل (۱۶) نشان می‌دهند که با افزایش دبی در پله‌های افقی و شیب‌دار، میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. فرضاً در شکل (۱۶- الف) مدل ۴ پله‌ای برای شیب ۴ درجه، تغییرات دبی از ۰/۰۳ به ۰/۰۸ متر مکعب بر ثانیه باعث کاهش میزان استهلاک انرژی به اندازه ۱/۵٪ گشته است. در حالی که در دبی ثابت ۰/۰۳ متر مکعب بر ثانیه در این مدل، با تغییر پله از حالت افقی به شیب ۴ درجه موجب افزایش استهلاک انرژی به میزان ۰/۹٪ گردیده است.

مدل‌سازی‌های عددی که از نتایج آن در طراحی و تولید قواعد فازی مربوطه استفاده شده بود) با استفاده از سیستم حاصل گردید. در جدول (۴) نتایج مربوط به تخمین پارامتر استهلاک انرژی در سرریز پلکانی مورد مطالعه (در حالت دبی ۰/۰۳ متر مکعب بر ثانیه و شیب معکوس ۸ درجه) حاصل از سیستم استنتاج فازی و شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار Flow-3D ارائه شده است. از این نتایج می‌توان جهت اعتبارسنجی عملکرد سیستم استنتاج فازی طراحی شده در تخمین میزان استهلاک انرژی استفاده نمود. اختلاف موجود بین دو تخمین اشاره شده، با استفاده از رابطه (۲۷) در حدود ۹/۵ درصد تخمین زده شد که با توجه به اهداف مهندسی در طراحی این نوع از سرریز، در محدوده قابل قبولی می‌باشد. در رابطه زیر، مقدار حاصل از مدل عددی و E_f مقدار پیش‌بینی شده توسط سیستم استنتاج فازی می‌باشد:

$$MNS = \left(\frac{100}{N} \right) \sum_{i=1}^N \frac{E_n - E_f}{E_n} \quad (27)$$

جدول ۴- مقادیر تخمین زده شده پارامتر استهلاک انرژی

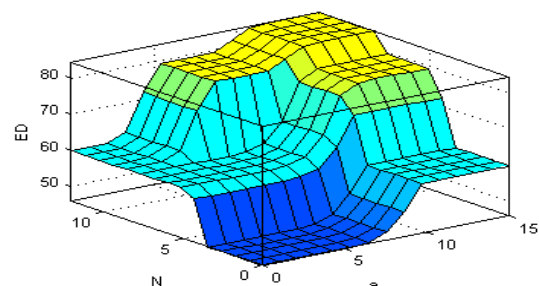
استهلاک انرژی (%)		
تعداد پله‌ها	نرم‌افزار Flow-3D	سیستم استنتاج فازی
۴	۶۵/۴۵	۵۸/۶
۸	۷۰/۴۸	۶۹/۹
۱۰	۷۳/۸۷	۷۹/۳

نتایج حاصله دلالت بر کارایی الگوریتم سیستم استنتاج فازی تهیه شده در انجام محاسبه استهلاک انرژی در جریان واقع بر سرریزهای پلکانی دارند. به طوری که از این سیستم می‌توان به عنوان یک روش کارآمد در تخمین پارامتر استهلاک انرژی در شرایط تغییر پارامترهای مؤثر در الگوی جریان عبوری بر روی سرریز پلکانی مفروض، استفاده نمود.

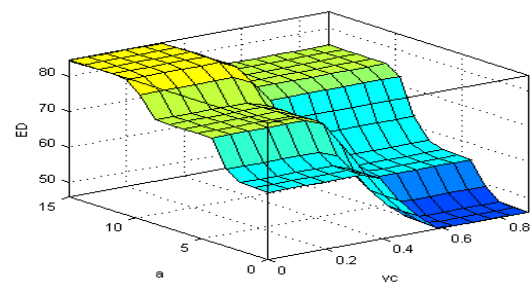
۷- نتیجه‌گیری

این مطالعه متشکل از سه مرحله اصلی است. در مرحله اول، شرایط انجام آزمایش مدل فیزیکی مربوطه فراهم و پارامترهای هیدرولیکی مورد نظر در طی انجام آزمایش ثبت گردیدند. در مرحله دوم اقدام به تهیه مدل عددی بر مبنای مشاهدات

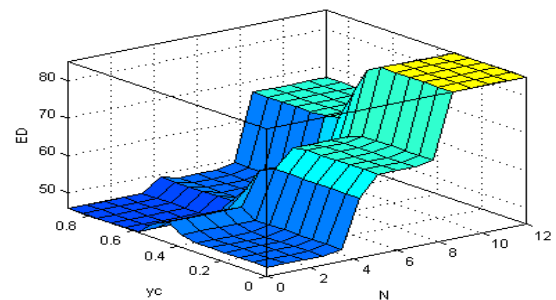
شکل (۱۷)، از سه نمودار جهت ترسیم این ارتباطات غیر خطی استفاده شده است. این عوامل شامل تأثیر تعداد پلکان و شیب معکوس بر استهلاک انرژی، تأثیر شیب معکوس و عمق بحرانی بر استهلاک انرژی و تأثیر عمق بحرانی و تعداد پلکان بر استهلاک انرژی هستند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۷- نمایشگر قواعد سه‌بعدی (الف) تأثیر تعداد پلکان و شیب، (ب) تأثیر شیب معکوس و عمق بحرانی، (ج) تأثیر عمق بحرانی و تعداد پلکان بر میزان استهلاک انرژی

همان طور که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود، افزایش تعداد پله (N)، باعث افزایش مقدار استهلاک انرژی می‌شود و همچنین در کمترین عمق بحرانی (y_c) شاهد بیشترین استهلاک انرژی هستیم. علاوه بر این، با افزایش شیب معکوس روی هر پله استهلاک انرژی روند افزایشی دارد. به منظور سنجش قابلیت سیستم طراحی شده در تخمین پارامتر استهلاک انرژی، اقدام به تولید مقادیر این پارامتر (تحت شرایطی متفاوت با شرایط

۸- مراجع

- [1] Chanson, H., "Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways", 1995.
- [2] Chanson, H., "The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways", Library of Congress Cataloging-in-publication Data, The Netherlands, 2001.
- [3] ASCE, "Aerated Flow in Open Channels", Journal of Hydraulic Engineering, 1961, 87 (3), 73-82.
- [4] Rajaratnam, N., "Skimming Flow in Stepped Spillways", Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116 (4), 587-591.
- [5] Chanson, H., "The Hydraulics of Spillways", Balkema, Lisse, Netherlands, 2001.
- [6] Chanson, H., "State of the Art of the Hydraulic Design of Stepped Chute Spillways", Hydropower and Dams Journal, 1994, 33-42.
- [7] Yasuda, Y., Takahashi, M., Ohtsu, I., "Energy Dissipation of Skimming Flows Onstepped-Channel Chutes", the 29th International Association of Hydraulic Research Congress, Beijing, China, 2001.
- [8] Chinnarasri, C., "Assessing the Flow Resistance of Skimming Flow on The Step Faces of Stepped Spillways", Dam Engineering, 2002.
- [9] Mondardo, J. M., Fabiani, A. L., "Comparison of Energy Dissipation between Nappe And Skimming Flow Regimes On Stepped Chutes", Journal of Hydraulic Research, 1995, 33 (1), 119-122.
- [10] Boes, R. M., Minor, H. E., "Guidelines for the Hydraulic Design of Stepped Spillways Ibid", Swets & Zeitlinger, 2000, 163-170.

[۱۱] سلماسی، ف، "اثر تعداد پله‌ها بر استهلاک انرژی در سرریزهای پله‌ای بر اساس روش جدید طراحی"، مجله دانش آب و خاک، ۱۳۸۸، ۱۹ (۱)، ۳۸-۲۷.

- [12] Chinnarasri, C., Wongwises, S., "Flow Patterns and Energy Dissipation over Various Stepped Chutes", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132 (1), 70-76.

[۱۳] محمودی، م، رستمی‌راوری، ا، "بررسی اثر نصف کردن ابعاد پله‌ها در سه حالت نسبت ۱/۳، بر میزان افت کارمایه در سرریزهای پلکانی"، مجله مهندسی منابع آب، ۱۳۹۱، ۵.

[۱۴] شجاع، ف، سلماسی، ف، فرسادی‌زاده، د، ناظمی، ا، اشرف صدرالدینی، ع، "طراحی بهینه سرریزهای پلکانی

فیزیکی موجود گردید. با توجه به تنظیمات مختلف مورد نیاز در تهیه مدل عددی (مدل آشفتگی، نحوه‌مش‌بندی و استقلال مش، شرایط مرزی حاکم...) قطعاً نیاز به یک مرجع قابل اتکا جهت کسب اعتماد و اعتبار برای نتایج حاصل از مدل عددی می‌باشد. در این تحقیق از نتایج آزمایش فیزیکی مذکور استفاده گردید. بعد از انجام واسنجی پارامترها و تنظیمات مهم و ضروری در کسب نتایج همسان با واقعیت، می‌توان به شرایط فیزیکی و گسسته‌سازی ایجاد شده اعتماد نموده و با تغییر پارامترهای مناسب، به کسب نتایج مورد انتظار از نرم‌افزار در شرایط مختلف پرداخت. در مرحله سوم، با استفاده از امکان مدل‌سازی و فارغ از نیاز به صرف هزینه و وقت زیاد در انجام آزمایش‌های تجربی گسترده، پایگاه اطلاعاتی لازم جهت طراحی سیستم استنتاج فازی مؤثر در پیش‌بینی پارامتر استهلاک انرژی فراهم گردید. خلاصه نتایج حاصله به شرح زیر می‌باشند:

- با بررسی تأثیر پارامتر دبی، مشاهده شد که افزایش دبی، موجب کاهش استهلاک انرژی می‌گردد. افزایش تعداد پله‌ها در حالت ارتفاع ثابت، باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد. زیرا با افزایش تعداد پله‌ها و کاهش ارتفاع پله‌ها در واقع مقدار زبری کاهش یافته و پله‌ها زودتر در زیر آب مستغرق می‌شوند.
- در مدل ۴ پله‌ای و با شیب ثابت ۴ درجه، تغییرات دبی از ۰/۰۳ به ۰/۰۸ متر مکعب بر ثانیه، باعث کاهش میزان استهلاک انرژی به اندازه ۱/۵٪ و در دبی ثابت ۰/۰۳ متر مکعب بر ثانیه، تغییر پله از شیب صفر به شیب ۴ درجه موجب افزایش استهلاک انرژی به میزان ۰/۹٪ گردید.
- ایجاد شیب معکوس در پله‌ها، استهلاک انرژی را نسبت به حالت پله افقی افزایش می‌دهد و هر چه شیب معکوس روی پله افزایش یابد استهلاک انرژی نیز بیشتر می‌گردد.
- با مدل‌سازی عوامل مؤثر بر استهلاک انرژی توسط سیستم استنتاج فازی نیز مشخص گردید که افزایش تعداد پلکان (N) باعث افزایش مقدار استهلاک انرژی می‌شود.
- با توجه به هماهنگی نتایج حاصل از سیستم استنتاج فازی و مدل‌سازی‌های مربوطه، استفاده از سیستم استنتاج فازی به عنوان یک روش کارآمد در تخمین پارامتر استهلاک انرژی در شرایط تغییر پارامترهای مؤثر در الگوی جریان عبوری بر روی سرریز پلکانی مفروض، پیشنهاد می‌گردد.

- تساویر"، نهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه شیراز، بخش مهندسی مکانیک، ۱۳۸۳.
- [20] Chanson, H., "Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways", Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126 (11), 862-865.
- [۲۱] صداقت‌نژاد، س.، "بررسی استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی با آستانه انتهایی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده عمران، ۲۰۰۹.
- [۲۲] قاسم‌زاده، ف.، "شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی در Flow-3D"، نشر نوآور، ۱۳۹۲.
- [23] Flow-3D User Manual و Excellence in Flow Modeling Software, v 9.3, Flow Science, Inc., Santa Fe, 2008.
- [24] Dill, R., Borba, J., Murcia, F., "Organization's Profitability Analysis, A Fuzzy Logic Approach", Encamped Congress, 2004.
- [25] Tucha, T., Brem, M., "Fuzzy Transfer Pricing World: On the Analysis of Transfer Pricing with Fuzzy Logic Techniques", Indian Institute of Management, Ahmadabab, India, 2005.
- جهت حداکثرسازی استهلاک انرژی با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، نشریه دانش آب و خاک، ۱۳۹۱، ۲۲ (۴)، ۶۹-۸۳.
- [15] Dermawan, V., Legono, D., "Residual Energy and Relative Energy Loss on Stepped Spillway", Journal of Applied Technology in Environmental Sanitation, 2011, 1 (4), 381-392.
- [16] Abbasi, S., Kamanbedast, A. A., "Investigation of Effect of Changes in Dimension and Hydraulic of Stepped Spillways for Maximization Energy Dissipation", World Applied Sciences Journal, 2012, 18 (2), 261-267.
- [17] Roushangar, K., Akhgar, S., Salmasi, F., Shiri, J., "Modeling Energy Dissipation over Stepped Spillways Using Machine Learning Approaches", Journal of Hydrology, 2014, (508), 254-265.
- [۱۸] منصوری، ع.، حامدی، ا.، سوری، ص.، "بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در رژیم جریان تیغه‌ای در سرریز پلکانی مجهز به پله‌های شیب‌دار و آستانه‌دار"، دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران، ۱۳۹۲.
- [۱۹] شفیعی‌فر، م.، عطائی آشتیانی، ب.، "بررسی جریان چگالی ناپایدار در محیط متخلخل با استفاده از روش پردازش

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of Effects of the Geometry on Rate of Energy Dissipation of the Flow over the Stepped Spillway using Fuzzy Inference Systems

Nasim Sori , Alireza Mojtahedi *

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Received: 16 February 2015; **Accepted:** 15 August 2015

Keywords:

Stepped Spillway, Energy dissipation, Fuzzy inference systems, Physical model, Computational fluid dynamics

1. Introduction

A stepped spillway is a modified chute spillway, in which the surface of spillway is provided with a series of steps from near the crest to the toe of the structure. Dissipation of energy is caused by the steps. The steps act as small drops placed in series and each step acts as small stilling basin for the preceding step. This method of dissipation of energy either eliminates the requirement for stilling basin at the toe or considerably reduces the size of the stilling basin [1]. Technical advances in the construction of roller compacted concrete dams and realization of the advantages of a higher degree of energy dissipation (which in turn may lead to a sizeable reduction in dimensions of energy dissipator structures at the toe of the spillway) have created an increasing interest in stepped spillways [2]. In this study, the fluid flow over the stepped spillway was investigated using physical model studying and water surface profiles obtained by an image processing system. Also, for the sake of the evaluation of effects of the geometry parameters on energy dissipation (such as the critical depth, number of steps and adverse slope) the numerical model has been provided based on the existing conditions. Then, a type of the fuzzy inference system was used to study the controlling of energy dissipation. Evaluation results indicate that the fuzzy inference system can be used as a valuable tool for controlling the energy dissipation in stepped spillways based on the different geometric parameters.

2. Methodology

2.1. Experimental setup

Physical models of hydraulic structures are probably the most common type of hydraulic models to be studied. The principal goal of this study is to experimentally investigate the energy dissipation on stepped spillway models installed in a rectangular channel. This part provides details on the experimental setup and apparatus used as well as the procedures followed during the course of the laboratory investigations. The experimental program performed in a large flume. The length of glass-wall flume is 14 m. A head tank with a sluice gate control section is located at the downstream end of the flume. The physical model was constructed of metal sheets and installed at the distance of 8 meter from the start point of the flume. Accordingly, based on the dimensions of the flume and also on the capacity of the pumps, the dimensions was selected as height $H_{dam} = 40$ cm and length $L = 100$ cm with step length ($L = 25$ cm), step height ($h = 10$ cm) and width = 100 cm. The experimental setup is illustrated in Figure 1.

In recent years the use of image processing methods for the analysis of experimental results has received special attention because this method is a test without disruption possibility of the assessment of parameters desired.

* Corresponding Author

E-mail addresses: nasim_sori@yahoo.com (Nasim Sori), mojtahedi@tabrizu.ac.ir (Alireza Mojtahedi).



Fig. 1. Plan view of experimental rig and setup

2.2. CFD modeling

Computational fluid dynamics (CFD) is a useful method for the simulation of the flow pattern over the solid boundaries. In this model, the standard flow equations such as the Navier-Stokes and continuity equation are discretized and solved for each computational cell [3]. The boundary conditions of the prepared model are shown in Fig. 2.

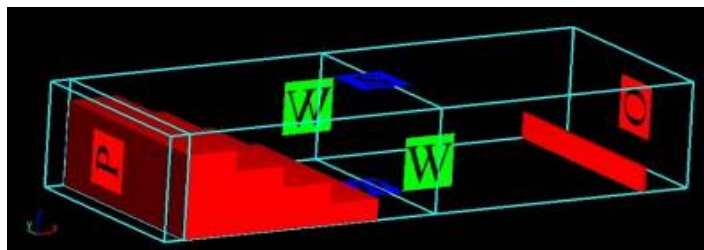


Fig. 2. Boundary conditions of related numerical model

3. Results and discussion

The water surface profiles are compared in Fig. 3a and the fuzzy logic controller using rule viewer is shown in Fig. 3b [4].

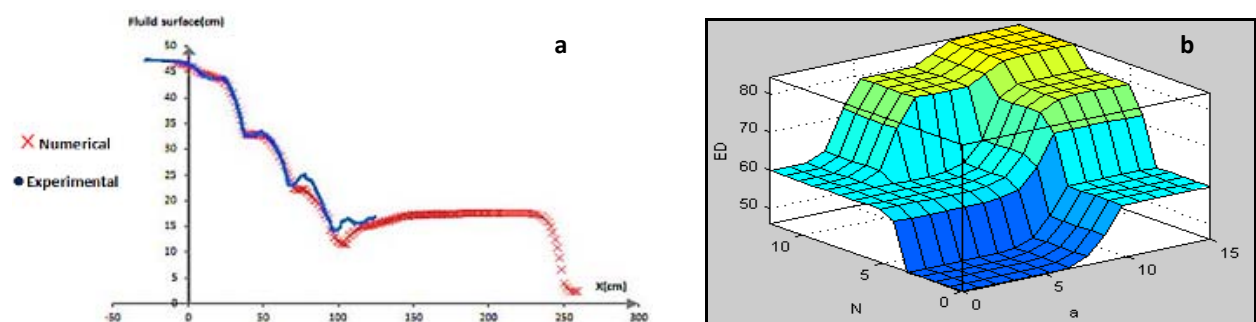


Fig. 3. Obtained results, a) The profiles of the water surfaces, b) Fuzzy Logic Controller Using Rule Viewer for energy dissipation

4. Conclusions

The concept of the fuzzy inference system was used to study the controlling of energy dissipation. Based on the numerical and experimental results, it was observed that the fuzzy inference system can be used as a valuable tool for controlling of the energy dissipation in stepped spillways based on the different geometric parameters.

5. References

- [1] Abbasi, S., Kamanbedast, A. A., "Investigation of Effect of Changes in Dimension and Hydraulic of Stepped Spillways for Maximization Energy Dissipation", World Applied Sciences Journal, 2012, 18 (2), 261-267.

- [2] Chanson, H., "The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways", Library of Congress Cataloging-in-publication Data, The Netherlands, 2001.
- [3] Flow-3D User Manual, Excellence in Flow Modeling Software, v 9.3, Flow Science, Inc., Santa Fe, 2008.
- [4] Tucha, T., Brem, M., "Fuzzy Transfer Pricing World: on the Analysis of Transfer Pricing with Fuzzy Logic Techniques", Indian Institute of Management, Ahmadabab, India, 2005.