

## ارزیابی آزمایشگاهی توزیع پارامترهای آشفته‌گی جریان دوفازی آب و هوا بر روی سرریزهای پلکانی

محمد رضا بهشتی<sup>۱\*</sup>، امیر خسرو جردی<sup>۲</sup>، حسین صدقی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۵/۰۵ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۳/۰۴

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- استادیار، عضو هیئت علمی گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۳- استاد، عضو هیئت علمی گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [mr.beheshti@srbiau.ac.ir](mailto:mr.beheshti@srbiau.ac.ir)

### چکیده

مشخصه عمده جریان عبوری از سرریزهای پلکانی، وجود تلاطم شدید و هوادهای سطحی زیاد می‌باشد که در اغلب مطالعات صورت پذیرفته، خصوصیات تلاطم جریان بطور کامل مورد بررسی و ارزیابی قرار نگرفته است. در این تحقیق، جریان متلاطم آب و هوا بر روی مدل فیزیکی نسبتاً بزرگ مقیاس از سرریز پلکانی بصورت سیستماتیک مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. مطالعه آزمایشگاهی حاضر شامل اندازه‌گیری‌های مربوط به ویژگی‌های جریان آب-هوا در رژیم‌های مختلف جریان بر روی مدل تنداب پلکانی ( $\theta = 21/8^\circ$ ,  $h = 0/04m$ ,  $l = 0/1m$ )، تعیین نقطه شروع هواگیری و عمق جریان در این نقطه، پروفیل‌های سرعت و نیز شدت آشفته‌گی جریان می‌باشد. اندازه‌گیری‌های مربوط به تعیین پروفیل سرعت و پارامتر شدت آشفته‌گی در امتداد جریان دوفازی عبوری از سرریز، توسط دستگاه کاوشگر الکتریکی دو سوزنه که در این تحقیق، طراحی، توسعه و واسنجی شده است، انجام گردید. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که مشخصه‌های تلاطم در نواحی مختلف از عمق جریان بر روی پله‌ها متفاوت می‌باشند. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که ۱- پارامتر شدت تلاطم در مجاورت کف پله و در زیرلایه لزوج به‌سرعت افزایش یافته و در محدوده ناحیه میانی ( $0/4 \leq y/d_c \leq 0/5$ ) به حداکثر مقدار خود می‌رسد و سپس در ناحیه فوقانی از عمق جریان به‌تدریج کاهش می‌یابد ۲- توزیع قائم سرعت در جهت جریان از قانون توانی پیروی می‌کند و در مجاورت سطح آزاد جریان به بیشینه مقدار خود خواهد رسید ۳- تشدید تلاطم در ناحیه میانی از عمق جریان، ناشی از تغییرات پیوسته در سطح مشترک جریان آب-هوا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جریان آب-هوا، سرریز پلکانی، شدت آشفته‌گی جریان، کاوشگر الکتریکی، نوسانات سرعت

## Experimental Evaluation of Turbulence Parameters Distribution in Two Phase Air-water Flows on Stepped Spillways

MR Beheshti<sup>1\*</sup>, A Khosrojerdi<sup>2</sup> and H Sedghi<sup>3</sup>

Received: 20 April 2014 Accepted: 25 May 2014

<sup>1</sup>Ph.D. Student of Hydro-Structures, Water Science and Eng. Dept., Science and Research Branch, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Assist. Prof., Water Science and Eng. Dept., Science and Research Branch, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Prof., Water Science and Eng. Dept., Science and Research Branch, Tehran, Iran

\*Corresponding Author, Email: mr.beheshti@srbiau.ac.ir

### Abstract

Stepped chute flows are characterized by intense turbulence and strong aeration, but in most studies the turbulence characteristics are not investigated thoroughly. In this study, a highly turbulent air-water flow skimming down a large-size stepped chute has been investigated systematically. An experimental study of detailed air-water flow characteristic measurements was established for different types of flow regimes on a stepped chute ( $\theta = 21.8^\circ$ ,  $h=0.04\text{m}$ ,  $l=0.10\text{m}$ ) model to investigate the location and the flow depth at inception point of air entrainment and velocity profiles distributions. Detailed velocity and turbulence intensity measurements in flow direction were performed by use of a phase detection conductivity probe which had been designed, developed and calibrated before. The results showed that the turbulence characteristics varied in different regions. The study showed further that 1- the turbulence intensity increased rapidly close to the step bottom at the viscous sub layer and maximized at intermediate region ( $0.4 \leq y/dc \leq 0.5$ ) then decreased gradually in the upper region. 2- The vertical distribution of the velocity in flow direction followed-up a power law and the velocity reached to its maximum value, near the flow's free surface. 3- The high turbulence levels in the intermediate region of the flow depth were caused by the continuous deformations and modification of the air-water interfacial structure.

**Keywords:** Air-water flow, Electrical probe, Stepped spillway, Turbulence intensity, Velocity fluctuations

### مقدمه

می‌باشد که منجر به اختلاط شدید آب و هوا و ایجاد پیچیدگی زیاد در تحلیل هیدرولیکی این نوع جریان دوفازی می‌گردد. ارزیابی مشخصه‌های جریان آب-هوا به دلیل ورود مقادیر زیادی هوا در بالادست اینگونه

یکی از پدیده‌های هیدرولیکی حائز اهمیت که در ارتباط با سرریزهای پلکانی همواره مطرح بوده و اغلب نیز در طراحی این سازه‌ها مورد توجه قرار نگرفته است، اندرکنش‌های بین جریان آب عبوری و جریان هوا

سرعت جریان مخلوط آب و هوا شامل مولفه طولی (در جهت جریان) این پارامتر می‌باشد که به موازات شیب کانال انجام می‌گردد. در حال حاضر، کاوشگر نوری دو حسگره و کاوشگر الکتریکی از موثرترین و کارآمدترین تجهیزات اندازه‌گیری سرعت جریان دوفازی آب و هوا می‌باشند. در واقع، کاربرد ابزاری نظیر لوله پیتو<sup>۴</sup> برای سرعت‌سنجی جریان محدود به جریان‌های با هوادهی بسیار پایین (غلظت هوای کمتر از ۷ درصد) می‌باشند و در غلظت‌های هوای بالا به دلیل ورود حباب‌های هوا به درون حفره‌های موجود در بدنه لوله پیتو، اندازه‌گیری سرعت با خطای بسیار بالایی همراه خواهد بود.

به‌طور کلی هدف اصلی از این تحقیق، بررسی مشخصه‌های عمده جریان دوفازی آب و هوا بر روی مدل فیزیکی تنداب پلکانی با بهره‌گیری از قابلیت‌های دستگاه کاوشگر الکتریکی دو حسگره<sup>۵</sup> برای نخستین بار در کشور و مقایسه نتایج بدست آمده با کارهای معتبر سایر محققین و استخراج اطلاعات دقیق و با ارزش در ارتباط با رفتار متلاطم جریان مخلوط آب و هوا بر روی این سازه‌ها می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

#### ساختار آزمایشگاهی

کلیه آزمایشات برنامه‌ریزی شده در این تحقیق، در آزمایشگاه هیدرولیک موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو و در یک کانال افقی با شیب ثابت و ابعاد  $5 \times 0.9$  (طول  $\times$  عرض) متر که دیواره سمت راست آن (در جهت جریان) از جنس پلکسی‌گلاس شفاف (با ضخامت ۱۰ میلی‌متر) و دیواره سمت چپ از جنس بتنی می‌باشد، انجام گردید. آب مورد نیاز مدل هیدرولیکی توسط پمپاژ آب از مخزن زیرزمینی واقع در کف آزمایشگاه هیدرولیک تامین شد. ارتفاع و طول کل مدل سرریز پلکانی به ترتیب معادل ۸۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر و شیب کف آن نیز  $\theta = 21/8^\circ$  ( $H/2: 1V$ ) می‌باشد. شکل ۱ طرحواره ساختار آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد که شامل (۱) پمپ سانتریفیوژ با قدرت

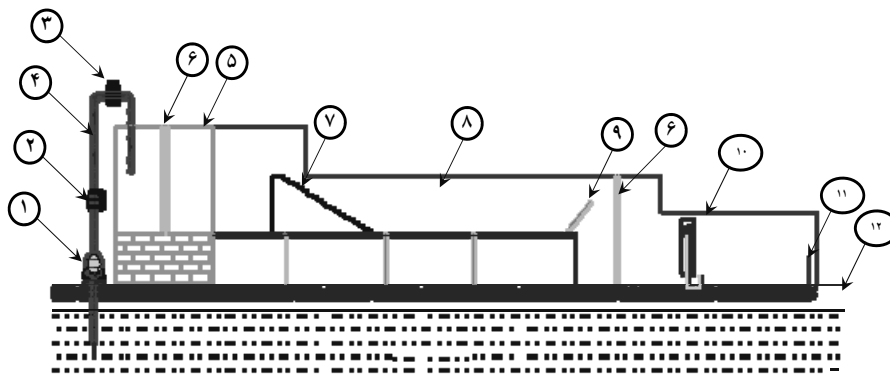
سرریزها با دبی واحد عرض متوسط، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. مطالعات متعددی بر روی جریان عبوری از تنداب‌های پلکانی با روش‌های مختلف طی چهل سال گذشته انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات افرادی نظیر سورنسن (۱۹۸۵)، پیراس و همکاران (۱۹۹۱)، کریستادولو (۱۹۹۳)، چمنی و راجاراتنام (۱۹۹۹)، چینارسی و وانگ‌وایز (۲۰۰۶)، ریلواس و پینهیرو (۲۰۱۱) و... اشاره نمود. تنها در تعداد محدودی از مقالات منتشر شده، به جریان کاملاً متلاطم با هوادهی سطحی قوی در تنداب‌های پلکانی اشاره شده است (یاسودا و چانسون<sup>۶</sup> ۲۰۰۳، چانسون و تومیز<sup>۷</sup> ۲۰۰۲).

به‌طور معمول در سرریزهای بزرگ، سرعت جریان در عمل بیش از ۵ تا ۱۰ متر بر ثانیه و عدد رینولدز جریان در محدوده  $10^7$  تا  $10^9$  می‌باشد و هوادهی سطحی نیز تقریباً در اغلب اوقات بر روی این سازه‌ها مشاهده می‌گردد. به دلیل وجود معادلات و پارامترهای متعدد حاکم بر چنین جریان‌های با سرعت و هوادهی بالا، امکان تحلیل عددی آنها به‌طور کامل میسر نبوده و در اکثر موارد برای حل بسیاری از مسائل مرتبط با هیدرولیک اینگونه جریان‌ها ناگزیر به استفاده از فرضیات و ساده‌سازی‌هایی می‌باشیم که باعث می‌شود نتایج بدست آمده با واقعیت اختلاف داشته باشند.

از این‌رو، دانش کنونی برای بررسی مسائل و مشکلات پیش روی این قبیل سازه‌های هیدرولیکی، متکی بر مدل‌سازی فیزیکی و اندازه‌گیری‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی می‌باشد که اطلاعات کامل و جزئیات لازم را در اختیار قرار خواهد داد. سیستم دقیق اندازه‌گیری پارامترهای جریان دوفازی آب-هوا به دلیل پیچیدگی‌های موجود محدود به عملکرد دستگاه‌هایی خاص نظیر کاوشگرهای فیلم داغ<sup>۱</sup>، لیزر داپلر<sup>۲</sup>، کاوشگرهای الکتریکی<sup>۳</sup> و نوری می‌باشند. با توجه به مرورهای انجام شده در منابع متعدد، اندازه‌گیری متغیر

- 1 -Hot film
- 2 -Laser doppler anemometer
- 3 -Conductivity double-tip probe

- 4 -Pitut tube
- 5 -Double-tip conductivity probe



شکل ۱- طرحواره ساختار آزمایشگاهی سرریز پلکانی و تاسیسات جنبی آن.

مدل آزمایشگاهی، جمع آوری اطلاعات لازم به منظور بررسی عملکرد سازه در اصل، مقایسه گزینه‌های مختلف طراحی و یا قانونمند کردن پدیده‌های هیدرولیکی می‌باشد که بتوانند در موارد مشابه کاربرد داشته باشند. در مطالعه حاضر، پارامترهای اندازه‌گیری شده عبارتند از: عمق جریان، سرعت جریان مخلوط آب و هوا، غلظت هوای موجود در جریان و دبی جریان.

برای اندازه‌گیری عمق جریان در طول کانال سرریز، از دستگاه عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت یک میلی‌متر استفاده شد.

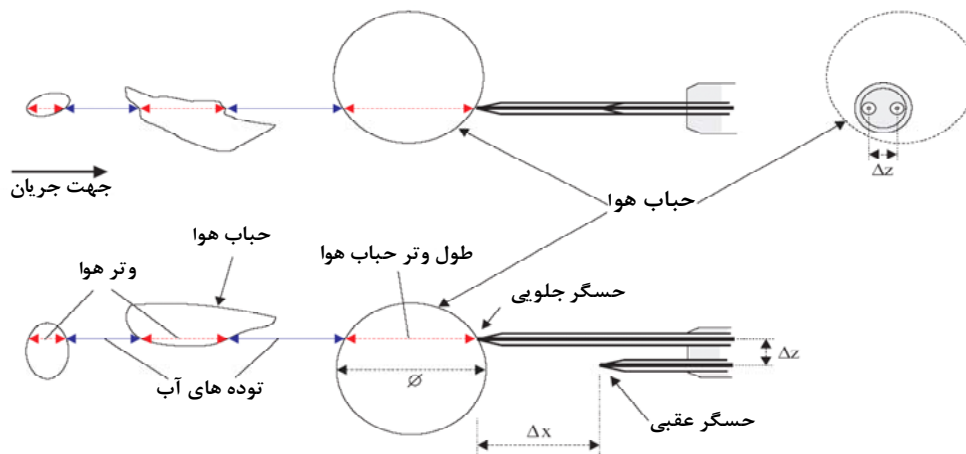
سرعت جریان در آب زلال و جریان هوادهی شده به ترتیب توسط لوله پیتو و کاوشگر الکتریکی دو سوزنی بر روی مدل فیزیکی سرریز پلکانی اندازه‌گیری گردید.

برای اندازه‌گیری دبی جریان، از سرریز لبه‌تیز مستطیلی شکل در انتهای کانال خروجی و نیز دبی‌سنج الکترومغناطیسی نصب شده بر روی لوله ورودی به مخزن بتنی بالادست مدل، استفاده به عمل آمد. سایر اطلاعات مربوط به مشخصات جریان دوفازی آب و هوا نظیر سرعت جریان و غلظت هوا در یک مقطع معین از سرریز پلکانی، توسط کاوشگر الکتریکی دو سوزنی که در این تحقیق طراحی و واسنجی گردید، برداشت شد. اساس کار کاوشگر الکتریکی توسعه داده شده در این تحقیق، بر اختلاف مقادیر هدایت الکتریکی دو فاز مایع و گاز و برخورد حباب‌ها به نوک حسگرهای آن می‌باشد. در شکل ۲ نحوه عملکرد کاوشگر الکتریکی دو سوزنی در جریان مخلوط آب و هوا ارائه شده است.

آبدهی حداکثر ۲۵۰ لیتر بر ثانیه در ارتفاع ۱۶ متر (۲ شیر کشویی برای تنظیم و تغییر دبی به قطر ۲۰۰ میلی‌متر (۳) دبی‌سنج الکترومغناطیسی برای اندازه‌گیری دبی (۴) لوله فولادی انتقال آب به قطر ۲۰۰ میلی‌متر و طول کلی ۸ متر (۵) مخزن بتنی آرامش جریان در بالادست کانال به حجم ۲۷۰۰ لیتر (۶) سبد فلزی مشبک<sup>۱</sup> پر شده از ذرات شن و ماسه برای کاهش تلاطم جریان ورودی به کانال (۷) تعداد ۲۰ پله از جنس پلکسی گلاس با ابعاد ۴ × ۱۰ × ۸۳ سانتی‌متر با آستانه ورودی از نوع سرریز لبه‌پهن (با زاویه تیز و قائم) به طول ۰/۴۵ متر و عرض ۰/۸۳ متر (۸) کانال افقی به طول ۳/۷ متر و ارتفاع ۰/۷۳ متر همراه با دیواره‌های شیشه‌ای و سنگ و سیمانی (۹) دریچه تاشوی فلزی با سیستم بالابر مکانیکی برای کنترل تراز سطح آب در پایاب مدل (برای کلیه آزمایشات و اندازه‌گیری‌ها، دریچه در حالت کاملاً باز قرار دارد) (۱۰) کانال پایین‌دست به طول ۴ متر (۱۱) سرریز لبه‌تیز مستطیلی با ابعاد ۰/۹۰ متر (عرض) × ۰/۳۵ متر (ارتفاع) برای کنترل و اندازه‌گیری دبی آزمایش (۱۲) مخزن تخلیه پایین دست به ابعاد ۱/۲ × ۱ × ۱/۵ متر، می‌باشد.

#### ابزار و روش اندازه‌گیری

امروزه با طراحی دستگاه‌های پیشرفته آزمایشگاهی سعی در رفتارشناسی و مطالعه پدیده‌های مختلف هیدرولیکی، جهت تدقیق طراحی‌های مربوط به سازه‌های آبی می‌گردد. از مهمترین اهداف ساخت هر



شکل ۲- طرح و عملکرد دستگاه کاوشگر الکتریکی دو سوزنی توسعه داده شده توسط نویسندگان.

با توجه به پارامترهایی نظیر محدودیت ابعاد هندسی کانال آزمایشگاهی، حداکثر دبی قابل انتقال توسط سیستم پمپاژ موجود، حجم آب موجود در مخزن آزمایشگاه، ابعاد هندسی و منحنی دبی-اشل مدل تنداب پلکانی در نظر گرفته شد. طرح و ساخت مدل فیزیکی بر مبنای قانون تشابه فرود انجام پذیرفت. ذکر این نکته ضروری است که برای اطمینان از ناچیز بودن "اثر مقیاسی" سعی گردید تا شرایطی در مدل فراهم شود تا نیروهایی که در پروتوتیپ بزرگ و موثر نیستند، در مدل نیز موثر واقع نشوند. این شرایط با انتخاب مقیاس و هندسه مناسب، کنترل حداقل عمق جریان در مدل، کنترل حداقل زبری سطح و غیره ایجاد گردید.

در جدول ۱، خلاصه‌ای از مشخصات و شرایط هیدرولیکی حاکم بر انجام آزمایشات ارائه شده است.

برخورد حباب‌های هوا به نوک سوزن‌های حسگر کاوشگر، باعث تغییر در مقاومت مدار کاوشگر شده و از تفسیر نتایج تغییرات مقاومت مدار، میزان غلظت هوا و سرعت جریان قابل برآورد خواهد بود. فرکانس و مدت زمان نمونه‌برداری داده‌های مربوط به جریان دوفازی آب و هوا به ترتیب معادل ۵۰ کیلوهرتز و ۹۰ ثانیه می‌باشد. لازم به توضیح است که اندازه‌گیری مشخصات جریان دوفازی آب و هوا از لبه پله‌های سرریز تا مجاورت سطح آزاد جریان و در امتداد محور میانی سرریز پلکانی انجام پذیرفت.

#### شرایط جریان آزمایشگاهی

در راستای ارزیابی مشخصه‌های تلاطم در جریان مخلوط آب و هوا بر روی مدل فیزیکی تنداب پلکانی، محدوده‌ای از دبی‌ها بین ۱۲ تا ۳۵ لیتر بر ثانیه

جدول ۱- خلاصه مشخصات و شرایط هیدرولیکی حاکم بر آزمایشات.

ردیف	دبی (L/s)	دبی واحد عرض (L/s/m)	$d_0/h$ (--)	عدد بی بعد رینولدز $Re$	عدد بی بعد وبر $We$	نوع رژیم مشاهداتی	محل شروع هوادهی طبیعی
۱	۱۲	۱۴/۷	۰/۷۰۱	$۵/۸ \times ۱۰^۴$	۱۰۲/۵۱۹	ریزشی	لبه پله ۴
۲	۱۵	۱۸/۴	۰/۸۱۳	$۷/۲ \times ۱۰^۴$	۱۰۹/۹۷۵	ریزشی	لبه پله ۴
۳	۲۰	۲۴/۱	۰/۹۸۱	$۹/۶ \times ۱۰^۴$	۱۱۹/۳۸۰	انتقالی	لبه پله ۶
۴	۲۵	۳۰/۱	۱/۱۳۱	$۱/۲ \times ۱۰^۵$	۱۱۹/۷۸۸	غلثشی	لبه پله ۷
۵	۳۰	۳۶/۱	۱/۲۸۲	$۱/۴ \times ۱۰^۵$	۲۰۴/۷۸۹	غلثشی	لبه پله ۷
۶	۳۵	۴۲/۲	۱/۴۱۵	$۱/۷ \times ۱۰^۵$	۳۱۴/۵۸۰	غلثشی	لبه پله ۸

### مشاهدات جریان دوفازی آب و هوا

بررسی رژیم‌های مختلف جریان عبوری از سرریز پلکانی الگوی جریان عبوری از تنداب پلکانی با هندسه معین به صورت یکی از رژیم‌های ریزشی، انتقالی و یا غلتشی می‌باشد. نوع رژیم جریان تشکیل شده بر روی این سازه‌ها تابعی از دبی و هندسه پله‌های تنداب پلکانی می‌باشد (چانسون ۱۹۹۴). در مطالعه حاضر از روش‌های آزمایشگاهی برای بررسی شکل‌گیری انواع جریان‌های فوق‌الاشاره استفاده می‌شود.

در دبی‌های پایین، جریان آب بصورت جت‌های ریزشی و در میان یک سری حوضچه‌های غوطه‌وری<sup>۵</sup> از پله‌ای به پله دیگر بر روی تنداب پلکانی منتقل می‌شود که به این نوع الگوی جریان در اصطلاح رژیم جریان ریزشی می‌گویند (تومبز و چانسون ۲۰۰۸).

در دبی‌های نسبتاً متوسط، جریان بینابینی یا انتقالی مشاهده می‌شود که از مشخصه‌های بارز آن می‌توان به رفتار آشفته جریان، برخورد شدید جت آب به کف پله‌ها، پاشش قطرات آب به هوا در پایین دست نقطه شروع هوادهی سطحی جریان و ایجاد ریزگردابه‌ها در زیر جت عبوری جریان در پله‌های انتهایی و تشکیل جریان نسبتاً استخری (و وجود حفره هوا<sup>۶</sup>) در پله‌های اولیه تنداب اشاره نمود. به عبارت دیگر در این نوع رژیم، الگوی جریان در برخی از پله‌های بالادست بصورت نسبتاً ریزشی و در برخی از پله‌های پایین دست بصورت غلتشی مشاهده می‌گردد.

خط متصل‌کننده لبه خارجی پله‌ها که موازی شیب طولی تنداب می‌باشد را می‌توان به عنوان خط کف مجازی<sup>۷</sup> تنداب در نظر گرفت که در دبی‌های زیاد، جریان عبوری بصورت غلتش بر روی این خط به پایین دست تنداب منتقل می‌گردد و به آن رژیم جریان غلتشی می‌گویند. جریان غلتشی شامل چرخابه‌های<sup>۸</sup> قوی همراه با الگوهای گردابه‌ای سه بعدی می‌باشد (آتسو و

در مجموع برای دستیابی به اهداف موردنظر در این مطالعه، تعداد ۸۰ مورد آزمایش (از نظر دبی آزمایشی و موقعیت برداشت داده‌ها) بر روی تنداب پلکانی طرح‌ریزی گردید. شرایط جریان ایجاد شده در مدل معادل اعداد رینولدز<sup>۱</sup>  $5/8 \times 10^4$  تا  $1/7 \times 10^5$  در رژیم‌های مختلف (جریان ریزشی<sup>۲</sup> تا غلتشی<sup>۳</sup>) می‌باشد. در اینجا پارامترهای بی بعد رینولدز و وبر<sup>۴</sup> براساس روابط ذیل بیان می‌گردند:

$$Re = VD_H / v_w \quad [1]$$

$$DH = \frac{4A}{P} = \frac{4(d \times W)}{2d + W} \quad [2]$$

$$We = \frac{\rho_w V^2 d}{\sigma_w} \quad [3]$$

در روابط فوق،  $VD_H$ ،  $Wd$ ،  $v_w$ ،  $\rho_w$  و  $\sigma_w$  به ترتیب قطر هیدرولیکی، سرعت جریان، عمق خالص جریان، عرض تنداب لزجت سینماتیکی، چگالی و کشش سطحی آب می‌باشند.

### تحلیل نتایج آزمایشگاهی

اندازه‌گیری‌های مربوط به مشخصه‌های سرعت و تلاطم جریان دوفازی آب و هوا به طور کامل و به ازای تعدادی از پارامترهای عمق بی بعد ( $d/h$ ) صورت پذیرفت. حداکثر بار آبی روی دهانه ورودی مدل فیزیکی تنداب پلکانی بین ۸۶/۲۵ تا ۹۳/۹۵ سانتی‌متر (نسبت به کف کانال آزمایشگاهی) و متناظر با دبی‌های ۰/۱۴۷ تا ۰/۰۴۲ مترمکعب بر ثانیه در واحد عرض می‌باشد. عدد فرود جریان نزدیک‌شونده به سرریز در محدوده ۰/۶۴۳ تا ۱/۰۰۷ قرار دارد. نتایج حاصل از توزیع و پراکندگی مقادیر متغیر سرعت جریان آب و هوا و پارامتر بدون بعد شدت آشفتگی جریان، بیانگر برخی از ویژگی‌های شاخص این نوع جریان دوفازی می‌باشد.

5 -Plunge pool  
6 -Air cavity  
7 -Pseudo bottom  
8 -Recirculation

1 -Reynolds number  
2 -Nappe flow  
3 -Skimming flow  
4 -Weber number

$$\frac{v(x)}{\sqrt{\tau_o / \rho_w}} = \frac{2.30}{K} \log\left(\frac{x}{k_s}\right) + C_1 \quad [4]$$

در رابطه فوق،  $K_s$  ضریب زبری بستر،  $K$  ضریب ثابت ون کارمن،  $x$  فاصله عمودی از بستر جریان بوده که براساس داده‌های آزمایشگاهی بین  $0.4$  تا  $0.42$  در نظر گرفته می‌شود،  $C_1$  ثابت انتگرال‌گیری و  $\tau_o$  نیز تنش برشی مرزی می‌باشد.

با این وجود، اکثر محققین پیشنهاد نموده‌اند که بالای خط کف کاذب جریان، سرعت موضعی مخلوط آب و هوا به حداکثر سرعت جریان بستگی دارد و از این‌رو پارامتر سرعت از قانون توانی به شرح ذیل بدست می‌آید:

$$U_{90} = D Y_{90}^{1/N} \quad [5]$$

$$U_{90} = \frac{u}{u_{90}} \quad \text{و} \quad Y_{90} = \frac{y}{y_{90}}$$

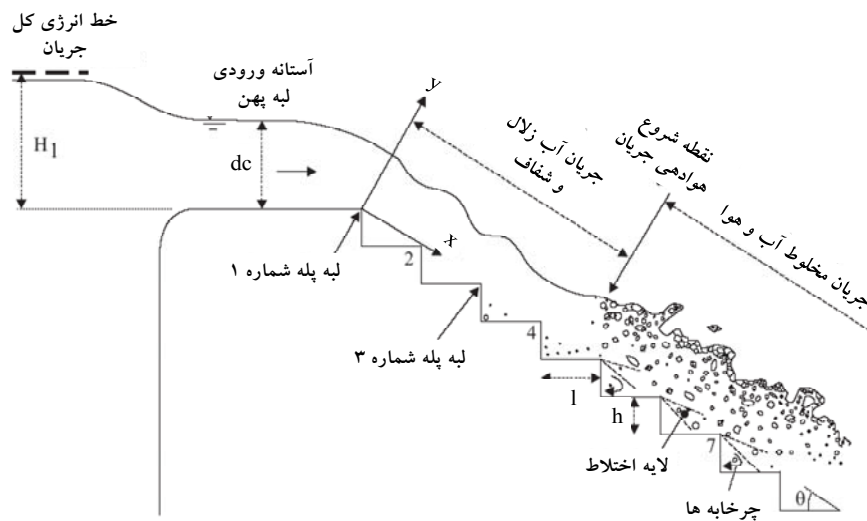
بی‌بعد سرعت و عمق جریان دوفازی آب و هوا می‌باشند. متغیرهای  $u_{90}$  و  $y_{90}$  به ترتیب معرف سرعت و عمق در نقطه‌ای از جریان هستند که غلظت هوا به  $90$  درصد می‌رسد. مقادیر ضرایب  $D$  و  $N$  توسط داده‌های آزمایشگاهی تعیین می‌گردند. رابطه فوق برای داده‌های جریان مخلوط آب و هوا در کانال‌های روباز واقعی و نیز مدل فیزیکی، معتبر بوده و در کارهای محققین متعددی نظیر چانسون و کامینگز (۱۹۹۶)، وود (۱۹۹۱) و چانسون (۱۹۸۹)، اعتبار و صحت آن مورد تأیید قرار گرفته است. با این حال، با توجه به دبی‌های مورد آزمایش یا بخشی از لایه جریان عبوری که در برازش‌های تجربی مورد ملاحظه قرار می‌گیرد، روابط توانی متعددی با ضرایب مختلف برای تخمین توزیع قائم سرعت جریان پیشنهاد شده‌اند که برخی از آنها در جدول ۲ ارائه گردیده است.

همکاران (۲۰۰۴). همچنین در این نوع جریان، یکسری ریزگردابه<sup>۱</sup> در گوشه پله‌ها تولید می‌شود. برای به کمیت درآوردن رژیم جریان بر روی مدل فیزیکی تنداب پلکانی اکثر محققین از پارامترهای بی‌بعد  $d_c/h$  و  $h/l$  استفاده نموده‌اند که  $d_c$  معرف عمق بحرانی جریان و  $h$  و  $l$  به ترتیب ارتفاع و طول هریک از پله‌های سرریز است. پارامتر بی‌بعد  $h/l$  بیانگر شیب سرریز پلکانی می‌باشد. طرحواره‌ای از جریان عبوری بر روی تنداب پلکانی و سایر پارامترهای هندسی آن در شکل ۳ نمایش داده شده است.

در دبی‌های متوسط ( $1/131 < d_c/h < 0/981$ ) الگوی جریان انتقالی تشکیل گردید. مقادیر پارامتر عمق بی‌بعد جریان ( $d_c/h$ ) متناظر با هریک از رژیم‌های جریان مشاهده شده، در شکل ۴ نمایش داده شده است و با مشاهدات سایر محققین مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، نتایج مشاهدات به عمل آمده برای پیش‌بینی رژیم جریان تشکیل شده بر روی مدل فیزیکی تنداب پلکانی در دبی‌های عبوری مختلف (به ازای  $h/l = 0/4$ )، با توابع و روابط ارائه شده در منابع (چانسون ۲۰۰۱) از مطابقت مناسبی برخوردار است.

تعیین نیمرخ قائم سرعت و شدت آشفتگی جریان با مقایسه مطالعات و پژوهش‌های گذشته در ارتباط با جریان یکنواخت زبر<sup>۲</sup> بر روی بستر سنگی در رودخانه‌های پرشیب کوهستانی، تنها تعداد معدودی از محققین (چمنی و راجاراتنام ۱۹۹۹) پیشنهاد نمودند که بالای خط کف کاذب، جریان همگن آب و هوا از تئوری لایه مرزی زبر<sup>۳</sup> تبعیت می‌کند. اما به دلیل زبری نسبتاً زیاد پله‌ها و نیز الگوی سه بعدی ساختار متلاطم جریان دوفازی آب و هوا در اطراف پله‌ها، رابطه توزیع سرعت لگاریتمی که توسط کارمن- پرائنتل ارائه گردید، قابل کاربرد نمی‌باشد.

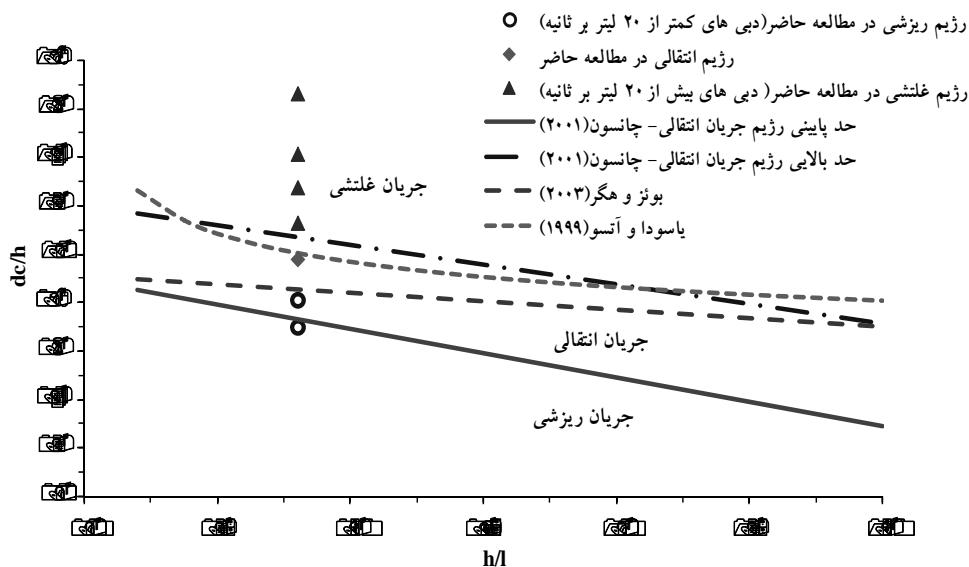
1 -Eddies  
2 -Rough uniform flow  
3 -Rough boundary layer



شکل ۳- نمایش برخی از مولفه های هیدرولیکی جریان و هندسه تنداب پلکانی.

جدول ۲- مقایسه مقادیر ضرایب رابطه توانی توزیع سرعت در جریان دوفازی آب و هوا روی تنداب های پلکانی.

نام منبع/مرجع	ضریب N	ضریب D	ملاحظات
چانسون (۲۰۰۱)	۵-۶	۱	جریان غلغشی
چانسون و تومیز (۲۰۰۲)	۶	۱	جریان غلغشی
چمنی و راجاراتنام (۱۹۹۹)	۶/۳	۱	$\theta = 30^\circ$
بوئز (۲۰۰۰)	۶/۳	۱	$0.04 \leq Y_{90} \leq 0.5$
بوئز و هگر (۲۰۰۳)	۴/۳	۱/۰.۵	$0.04 \leq Y_{90} \leq 0.8, 26^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$
یاسودا و چانسون (۲۰۰۳)	۹	۱	$0.05 \leq Y_{90} \leq 1, \theta = 15.6^\circ$
تحقیق حاضر	۵/۲۱	۱/۰.۱۲	$0.03 \leq Y_{90} \leq 0.92, \theta = 21.8^\circ$



شکل ۴- تخمین آستانه وقوع رژیم های مختلف جریان بر روی تنداب پلکانی و مقایسه با سایر نمودارهای تجربی.



نوسانات تصادفی می‌باشد. رینولدز هر خاصیت از سیال در جریان متلاطم را به دو متغیر متوسط زمانی و نوسانی تجزیه نمود که به آن، تجزیه رینولدزی<sup>۲</sup> می‌گویند. براین اساس، مولفه سرعت در جهت جریان ( $u$ ) با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$u = \bar{u} + u' \rightarrow u' = u - \bar{u} \quad [V]$$

$\bar{u}$  = مقدار متوسط زمانی سرعت است که به صورت

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \text{ بیان می‌گردد.}$$

$u'$  = نوسانات سرعت در جهت جریان که تحت عنوان سرعت مشخصه متلاطم نیز اطلاق می‌گردد

$T$  = مدت زمان نمونه برداری داده‌های سرعت

دو روش برای تشریح تلاطم و آشفتگی جریان معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشاهدات تک نقطه‌ای و همبستگی بین چند نقطه. رایج‌ترین روش، استفاده از اندازه‌گیری‌های مربوط به نوسانات سرعت در یک نقطه معین از جریان می‌باشد. بنابراین می‌توان از این طریق معیار دقیقی از شدت آشفتگی جریان بدست آورد.

در اینجا، شدت تلاطم برحسب مقادیر آماری که معرف نوسانات تصادفی سرعت جریان می‌باشند، تعریف می‌گردد. یک معیار رایج برای تعیین مولفه نوسانی سرعت جریان، مقدار مجذور میانگین مربعات سرعت می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$u'_{rms} = \sqrt{u'^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}{n}} \quad [A]$$

$n$  تعداد نمونه‌های برداشت شده می‌باشد. پارامتر شدت آشفتگی نرمال در جریان عبوری از سرریزها تحت تاثیر الگوی جریان در لایه مرزی و شرایط مرزی در مقاطع مختلف از سرریز می‌باشد. در واقع شدت آشفتگی یک معیار بی‌بعد از نوسانات متلاطم سرعت سطحی

در مطالعه حاضر، ضریب  $N$  (نمایه تابع توانی سرعت جریان) به طور متوسط معادل  $1.5/21$  (یا به عبارت دیگر  $N=5/21$ ) بدست آمد. اگرچه مقدار این ضریب بین پله‌های متوالی سرریز متغیر خواهد بود. عقیده بر این است که این تغییرات ناشی از ایجاد برخی تداخلات بین لایه‌های برشی همجوار و جریان حفره‌ای<sup>۱</sup> روی پله‌ها می‌باشند. در مطالعه حاضر، توزیع سرعت در لبه هریک از پله‌ها با تابع توانی و برای  $y/y_{90} < 1$  به خوبی برازش داده شد.

$$\left(\frac{u}{u_{90}}\right) = 5.21 \left(\frac{y}{y_{90}}\right)^{1.012}, \quad 0 \leq \frac{y}{y_{90}} \leq 1 \quad [6]$$

در شکل ۵، رابطه (۶) با نتایج آزمایشگاهی برای مقادیر مختلف پارامتر عمق بی بعد ( $d/h$ ) مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به پراکنش داده‌های بدست آمده در جریان‌های ریزشی و انتقالی، اندازه‌گیری‌های مربوط به سرعت جریان بیانگر پروفیل شبه‌یکنواخت این پارامتر در لبه پله‌ها می‌باشد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، پراکنندگی مقادیر سرعت موضعی در عمق جریان دوفازی بر روی پله‌ها با تابع توانی برازش مطلوبی ایجاد نموده است ( $R^2=0.95$ ). این نتایج با کارهای چانسون و تومبز (۲۰۰۲) سازگاری و تطابق فراوانی دارد.

نتایج حاصل از تعیین توزیع سرعت در رژیم جریان غلنتی اساساً همانند نیمرخ‌های اندازه‌گیری شده در جریان هوادهی شده بر روی تنداب‌های ساده و غیر پلکانی می‌باشد (چانسون ۱۹۹۴ و چین ۱۹۷۸)، اگرچه نرخ استهلاك انرژی در تنداب‌های پلکانی به مراتب بیشتر از تنداب‌های معمولی است و نیروی کشش<sup>۲</sup> ایجاد شده بر مقاومت جریان غالب می‌باشد.

در جریان متلاطم، هر مولفه سرعت لحظه‌ای در لایه مرزی به دلیل وجود ریزگردابه‌های متلاطم دارای

فیزیکی تنداب پلکانی که توسط دستگاه کاوشگر الکتریکی (توسعه داده شده در این تحقیق) برداشت شده است، ارائه گردیده و با داده‌های آزمایشگاهی چانسون و تومبز (۲۰۰۲) مقایسه به عمل آمده است.

با استفاده از مقادیر غلظت هوا در عمق جریان، توزیع پارامتر شدت آشفتگی در رژیم‌های مختلف برآورد و نسبت به پارامتر عمق بی بعد  $(y/dc)$  در شکل ۷ نمایش داده شده است. داده‌ها در لبه پله‌ها و در فواصل بی‌بعد یکسان از نقطه شروع هوادهی جریان، برداشت شده است.

همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، مشخصه‌های آشفتگی در نواحی مختلف از عمق جریان متفاوت خواهند بود. در اینجا، شدت آشفتگی در مجاورت کف پله و در زیرلایه لزوج ۳ به سرعت افزایش می‌یابد و در محدوده میانی از عمق جریان در بازه  $0.4 \leq y/dc \leq 0.5$  به بیشینه مقدار خود خواهد رسید و سپس در ناحیه فوقانی جریان به تدریج کاهش می‌یابد.

این روند تغییرات در مطالعات قبلی نیز مشاهده گردیده بود (گوانزالز ۲۰۰۵، چانسون و تومبز ۲۰۰۲ و چانسون و کاروسی ۲۰۰۷). فرض بر این است که مقادیر بالای شدت آشفتگی جریان در ناحیه میانی جریان به دلیل تغییرات پیوسته ساختار سطحی جریان مخلوط آب و هوا می‌باشد.

### نتیجه‌گیری کلی

جریان عبوری از سرریز پلکانی با شیب متوسط، با هوادهی شدید و آشفتگی زیاد در جریان همراه است. در این مطالعه، مجموعه‌ای از آزمایشات جریان دوفازی آب و هوا در سرعت‌های بالا بر روی مدل سرریز پلکانی نسبتاً بزرگ مقیاس براساس قانون تشابه‌سازی فرود، برنامه‌ریزی و اجرا گردید.

اندازه‌گیری‌های مربوط به جریان مخلوط آب و هوا در پایین دست نقطه شروع هوادهی طبیعی جریان با استفاده از دستگاه پیشرفته کاوشگر الکتریکی دو سوزنی که توسط محققین توسعه داده شده است، انجام

است که معرف میزان آشفتگی جریان بوده و براساس نسبت مجذور میانگین مربعات نوسانات سرعت در جهت جریان به سرعت برشی<sup>۱</sup> تعریف می‌گردد.

$$T_U = \frac{u'_{rms}}{u^*} \quad [۹]$$

در رابطه فوق  $u^*$  سرعت برشی یا اصطکاکی جریان می‌باشد و براساس توزیع تنش برشی مرزی<sup>۲</sup> بر مبنای شیب خط انرژی قابل برآورد است (در صورتی که جریان از نوع متغییر تدریجی باشد). پارامتر سرعت برشی تاثیر عمده‌ای بر روی توزیع سرعت متوسط لحظه‌ای و ساختار متلاطم جریان در لایه مرزی داشته و اساسی‌ترین معیار سرعت برای نرمالیزه کردن سرعت متوسط و شدت آشفتگی جریان می‌باشد.

$$u^* = \sqrt{\tau_o / \rho_w} \quad [۱۰]$$

$$\tau_o = g \rho_w S_f \int_0^{y=y_0} (1-C) dy \quad [۱۱]$$

معادل گرادیان خط انرژی کل جریان  $S_f = -\frac{\partial H}{\partial x}$  هواگیری شده عبوری از تنداب پلکانی می‌باشد که به صورت زیر برآورد گردید:

$$S_f = \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\Delta H}{\Delta x} = \frac{H_2 - H_1}{\sqrt{h^2 + l^2}} = \frac{(d_2 - d_1) + \frac{q_w^2}{2g} \left( \frac{1}{d_2^3} - \frac{1}{d_1^3} \right)}{\sqrt{h^2 + l^2}} \quad [۱۲]$$

$$d = \int_0^{y_0} (1-C) dy = (1-C_{mean}) Y_{90} \quad [۱۳]$$

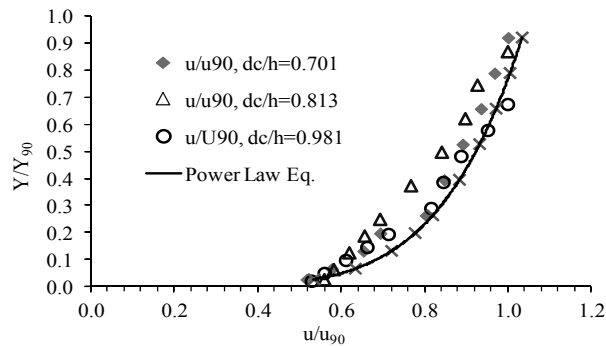
در رابطه فوق،  $h$  ارتفاع پله،  $l$  طول پله،  $d$  عمق خالص جریان عبوری در هر مقطع اندازه‌گیری،  $Y_{90}$  عمقی از جریان که در آن غلظت هوای موجود در جریان به ۹۰ درصد می‌رسد و  $C_{mean}$  غلظت متوسط هوا در اعماق مختلف جریان است که توسط دستگاه کاوشگر الکتریکی (پروب الکتریکی)، اندازه‌گیری شده است. در شکل ۶، توزیع قائم پارامتر غلظت هوای موجود در جریان هواگیری شده بر روی یکی از پله‌های مدل

3 -Viscous sub-layer

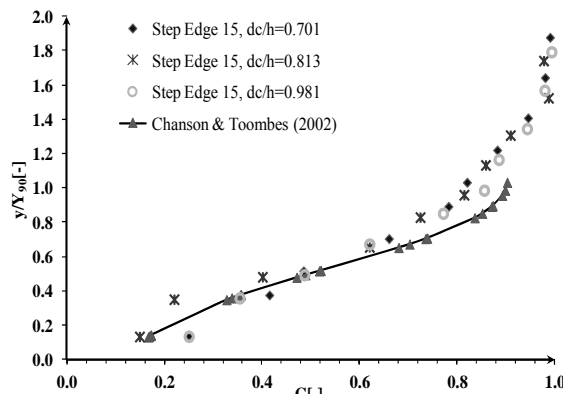
1 -Shear velocity  
2 -Boundary shear stress

برآورد گردیدند. مشخصه‌های جریان دوفازی آب و هوا بر روی مدل سرریز پلکانی، برخی از خصوصیات اساسی که بصورت کمی و کیفی با مطالعات و نتایج تجربی قبلی همخوانی و تطابق داشتند را نشان داد.

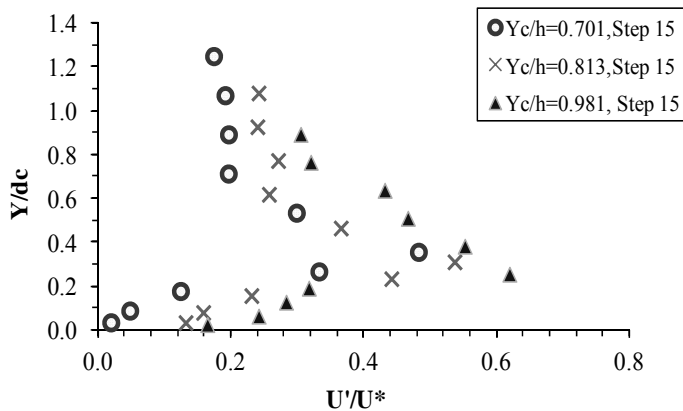
پذیرفت. نتایج شامل پارامترهای جریان مخلوط آب و هوا نظیر غلظت هوا، سرعت جریان و شدت آشفتگی در هر مقطع معین، می‌باشد. براساس سرعت‌های اندازه‌گیری شده جریان دوفازی آب و هوا، تنش برشی، سرعت برشی و نیز شدت آشفتگی با دقت مطلوبی



شکل ۵- نیمرخ قائم توزیع پارامتر سرعت بی بعد در رژیم‌های مختلف جریان (پله شماره ۱۵).



شکل ۶- نیمرخ قائم توزیع پارامتر غلظت هوا در رژیم‌های مختلف جریان (پله شماره ۱۵ تنداب پلکانی).



شکل ۷- توزیع قائم شدت تلاطم در جریان مخلوط آب و هوا بر روی تنداب پلکانی.

به عمل آمده در محدوده وسیعی از هندسه‌های مختلف تنداب پلکانی و شرایط مختلف جریان، معتبر و قابل استفاده می‌باشد.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان این اثر، بر خود می‌دانند که از تلاش‌های فراوان سرکار خانم‌ها مهندسین زیبا فاضل و معصومه فاضلیان در طراحی و توسعه دستگاه پروب الکتریکی، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورند. همچنین از کلیه پرسنل، کارشناسان و مدیریت محترم گروه سازه‌های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو که در این تحقیق ما را همراهی نمودند، سپاسگزاری و تشکر می‌گردد.

در پایین دست نقطه شروع هوادهی سطحی جریان، مقادیر بالای شدت آشفتگی ثبت گردید. توزیع شدت آشفتگی در این محدوده از جریان دارای شکل مشابهی نظیر توزیع آن در داده‌های جریان صاف و زلال آب در مطالعات یاسودا و آتسو (۱۹۹۹) دارد. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که بلافاصله در پایین دست نقطه شروع هوادهی جریان، جریان به سرعت تغییر یافته و حداکثر مقادیر شدت آشفتگی در بازه میانی بین ناحیه جریان حباب‌دار و پاشش ذرات آب روی می‌دهد (به عبارت دیگر در محدوده‌ای که  $0.7 < C < 0.3$  است). اگرچه یافته‌ها و نتایج این تحقیق برای سرریز با شیب متوسط ( $\theta = 21/8^\circ$ ) بدست آمده است، اما عقیده بر این است که خروجی‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های

#### منابع مورد استفاده

- Boes M, 2000. Role of natural and immune Igm antibodies in immune responses. *Mol Immunol* 37: 1141-1149.
- Boes M and Hager WH, 2003. Hydraulic design of stepped spillways. *J Hydr Eng ASCE*: 671-679.
- Cain P, 1978. Measurements within self aerated flow on a large spillway. Ph.D. Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Chamani MR and Rajaratnam N, 1994. Jet flow on stepped spillways. *J Hydr Eng ASCE* 120(2): 254-259.
- Chamani MR and Rajaratnam N, 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *J Hydr Eng* 125(4): 361-368.
- Chanson H, 1989. Study of air entrainment and aeration devices. *J Hydr Res* 27(3): 301-319.
- Chanson H, 1994. *Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways*. Pergamon, Oxford, UK, Jan. P.292 (ISBN 0-08- 041918-6).
- Chanson H, 2001. A Transition flow regime on stepped spillways. Pp. 490-498. Proceedings of the 29th IAHR Biennial Congress, Beijing, China, Theme D. Vol.1. Edited by G. LI. Tsinghua University Press, Beijing.
- Chanson H and Cummings PD, 1996. Air-water Interface Area in Supercritical Flows Down Small-slope Chutes. Research Report No. CE151, Dept of Civil Engineering, University of Queensland, Australia, 60 p.
- Chanson H and Toombes L, 2002. Air-Water flows down stepped chutes: Turbulence and flow structure observations. *Int. J. Multiphase Flow*. 28(11): 1737-1761.
- Chanson H and Carosi G, 2007. Advanced post-processing and correlation analyses in high-velocity air-water flows. Springer, *J Environ Fluid Mechanics* 7: 495-508.
- Chinnarasri C and Wongwises S, 2006. Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes. *J Irrig Drain Eng ASCE* 132(1): 70-76.
- Christodoulou GC, 1993. Energy dissipation on stepped spillways. *J Hydr Eng ASCE* 119(5): 644-650.
- Gonzalez CA, 2005. An Experimental study of free-surface aeration on embankment stepped chutes. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Ohtsu I, Yasuda Y and Takahasi M, 2004. Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. *J Hydr Eng ASCE* 130(9): 860-869.
- Peyras L, Royet P and Degoutte G, 1991. Flow and energy dissipation of energy on gabion weirs. *La Houille Blanche* 1:37-47.
- Relvas AT and Pinheiro AN, 2011. Stepped chutes lined with wedge-shaped concrete blocks: Hydrodynamic pressures on blocks and stability analysis. *Can J Civ Eng* 38(3): 338-349.
- Sorensen RM, 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. *J Hydr Eng* 11(12): 1461-1472.
- Dept of Civil Engineering, University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Toombes L and Chanson H, 2008. Flow patterns in nappe flow regime down low gradient stepped chutes. *J Hydr Res* 46(1): 4-14.
- Wood IR, 1991. Air Entrainment in Free-Surface Flows. IAHR Hydraulic Structures Design Manual, No. 4, Hydraulic Design Considerations, Balkema Publ., Rotterdam, The Netherlands, 149p.

- Yasuda Y and Chanson H, 2003. Micro -and macrol-Scopic study of two-phase flow on a stepped chute. Pp. 695-703. Proc. XXX IAHR Congress, Thessaloniki, Greece.
- Yasuda Y, Ohtsu I.O, 1999. Flow resistance of skimming flow in stepped channels. Proceeding 28th IAHR Congress, 22-27 August 1999. Graz, Austria.