

## توزیع سرعت و آشفتگی جریان دوفازی آب و هوا در کانال‌های سیلاب‌روی پلکانی

محمد رضا بهشتی<sup>۱\*</sup>، امیر خسرو جردی<sup>۲</sup>، حسین صدقی<sup>۳</sup> و سید محمود برقی<sup>۴</sup>

\*<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ گروه علوم و مهندسی آب؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات؛ تهران؛ ایران؛

نویسنده مسئول مکاتبات: [mr.beheshti@srbiau.ac.ir](mailto:mr.beheshti@srbiau.ac.ir)

<sup>۲</sup> استادیار و عضو هیئت علمی؛ گروه علوم و مهندسی آب؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات؛ تهران؛ ایران

<sup>۳</sup> استاد و مدیر گروه؛ گروه علوم و مهندسی آب؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات؛ تهران؛ ایران

<sup>۴</sup> استاد و عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران؛ دانشگاه صنعتی شریف؛ تهران؛ ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۹/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۵/۲۰

### چکیده

حفاظت خاک در برابر فرسایش سیلابی برای بهره‌برداری بهینه از منابع آب و خاک بسیار ضروری است. یکی از روش‌های ساختمانی موثر و کارآمد در تخلیه سیلاب در مناطق پرشیب شهری، استفاده از کانال‌های سیلاب‌روی پلکانی می‌باشد. مشخصه عمده جریان عبوری از کانال‌های سیلاب‌روی پلکانی، وجود تلاطم بسیار شدید و هوادهی سطحی زیاد می‌باشد که در اغلب مطالعات صورت پذیرفته، خصوصیات آشفتگی و تلاطم جریان بطور کامل مورد بررسی و ارزیابی قرار نگرفته است. در این تحقیق، جریان کاملاً 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 (متر  $l = 0.10$ ، متر  $h = 0.04$ ،  $\theta = 21/8^\circ$ )، بر روی موقعیت آستانه شروع هوادهی طبیعی جریان، پروفیل‌های سرعت و نیز شدت آشفتگی جریان می‌باشد. برای انجام اندازه‌گیری‌های مربوط به تعیین پروفیل سرعت و پارامتر شدت آشفتگی در امتداد جریان دوفازی عبوری از سرریز، از دستگاه کاوشگر الکتریکی دو سوزنه که توسط نویسندگان، طراحی، توسعه و واسنجی شده است، استفاده گردید. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که مشخصه‌های تلاطم در نواحی مختلف از عمق جریان بر روی پله‌ها متفاوت می‌باشند. بطور کلی، نتایج نشان داد که ۱- پارامتر شدت تلاطم در مجاورت کف پله و در زیر لایه لزج بسرعت افزایش یافته و در محدوده ناحیه میانی  $(0.4 \leq y/dc \leq 0.5)$  به حداکثر مقدار خود می‌رسد و سپس در ناحیه فوقانی از عمق جریان بتدریج 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 تغییر شکل‌ها و اصلاحات پیوسته در ساختار سطحی جریان آب-هوا می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آستانه شروع هوادهی؛ شدت آشفتگی جریان؛ کانال سیلاب‌روی پلکانی؛ کاوشگر الکتریکی

### مقدمه

روش‌های ساختمانی و مدیریتی می‌باشند و در هر مورد دربرگیرنده حوزه آبریز (برون‌شهری) و یا اراضی سطح شهر (درون‌شهری) هستند (Amador et al., 2006). یکی از این

روش‌های حفاظت از خاک در برابر فرسایش‌های احتمالی ناشی از وقوع پدیده سیلاب بطور کلی مشتمل بر

در اغلب اوقات بر روی این سازه‌ها مشاهده می‌گردد (Chachereau and Cha Chanson, 2010). بدلیل وجود معادلات و پارامترهای متعدد حاکم بر چنین جریان‌های با سرعت و هوادهی بالا، امکان تحلیل عددی آنها بطور 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 (Meireles and Matos, 2009).

از این رو، دانش کنونی برای بررسی مسائل و مشکلات پیش روی این قبیل سازه‌های هیدرولیکی، متکی بر انجام مدلسازی فیزیکی و اندازه‌گیری‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی می‌باشد که اطلاعات کامل و جزئیات لازم را در اختیار قرار خواهد داد (Pfister and Hager, 2010). سیستم دقیق اندازه‌گیری پارامترهای جریان دوفازی آب- هوا به دلیل پیچیدگی‌های موجود محدود به عملکرد دستگاه‌هایی خاص نظیر کاوشگرهای فیلم داغ<sup>۲</sup>، لیزر داپلر<sup>۳</sup>، کاوشگرهای الکتریکی<sup>۴</sup> و نوری می‌باشند (Toombes and Chanson, 2005). با توجه به مرورهای انجام شده در منابع و مراجع متعدد، اندازه‌گیری متغیر سرعت جریان مخلوط آب و هوا شامل مولفه طولی (در جهت جریان) این پارامتر می‌باشد که به موازات شیب متوسط 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>۵</sup> برای سرعت سنجی جریان محدود به جریان‌های با هوادهی بسیار پایین (غلظت هوای کمتر از ۷ درصد) می‌باشند و در غلظت‌های هوای بالا بدلیل ورود حبابهای هوا به درون حفرهای موجود در بدنه

روش‌های ساختمانی مهم و تأثیرگذار، مقابله با سیلاب در سطح حوزه استفاده از سیلابروهای<sup>۱</sup> کمکی است که در مناطق پرشیب شهری اغلب بصورت پلکانی احداث می‌گردند (Boes and Hager, 2003b). شکل پلکانی اینگونه کانال‌ها بدلیل ایجاد زبری‌های بزرگ مقیاس در مسیر جریان، در استهلاك انرژی جنبشی و مخرب سیلاب و انتقال ایمن آن نقش بسزایی دارد. یکی از پدیده‌های هیدرولیکی حائز اهمیت که در ارتباط با کانالهای سیلابرو پلکانی همواره مطرح بوده و اغلب نیز در طراحی این سازه‌ها مورد توجه قرار نگرفته است، اندرکنش‌های بین جریان آب عبوری و جریان هوا می‌باشد که منجر به اختلاط شدید آب و هوا و ایجاد پیچیدگی‌های زیاد در تحلیل هیدرولیکی این نوع جریان دوفازی می‌گردد (Zare and Doering 2004). ارزیابی مشخصه‌های جریان آب- هوا بدلیل ورود مقادیر زیادی هوا در بالادست اینگونه کانالها با دبی واحد عرض متوسط، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. مطالعات متعددی بر روی جریان عبوری از کانال‌های پلکانی با روش‌های مختلف طی چهل سال گذشته انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات و مطالعات افرادی نظیر Sorensen (1985)، Peyras و همکاران (1992)، Christodoulou (1993)، Chamani و Rajaratnam (1999)، Wongwises و Chinnarasi (2006)، Felder و Chanson (2009a)، Pinheiro Felder و Chanson (2009b) و Relvas (2011) 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 (Chanson, 2003, Chanson & Toombes, 2002).

بطور معمول در کانالهای بزرگ شیبدار، سرعت جریان در عمل بیش از ۵ تا ۱۰ متر بر ثانیه و عدد رینولدز جریان در محدوده  $10^7$  تا  $10^9$  می‌باشند و هوادهی سطحی نیز تقریباً

2 -Hot Film  
3 -Laser Doppler Anemometer  
4 -Conductivity Probe  
5 -Pitut Tube

1- Floodway

و ۲۰۰ سانتی‌متر و شیب کف آن نیز  $\theta = 21/8^\circ$  (H = ۲/۵):  
 (۱۷) می‌باشد. شکل شماره ۱ طرحواره ساختار آزمایشگاهی  
 مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد که شامل: (۱)  
 پمپ سانتریفیوژ با قدرت آبدی حداکثر ۲۵۰ لیتر در ثانیه  
 در ارتفاع ۱۶ متر (۲ شیر کشویی برای تنظیم و تغییر دبی به  
 قطر ۲۰۰ میلی‌متر (۳ فلومتر الکترومغناطیسی برای اندازه  
 گیری دبی (۴ لوله فولادی انتقال آب به قطر ۲۰۰ میلی‌متر (۸  
 اینچ) و طول کلی ۸ متر (۵ مخزن بتنی آرامش جریان در  
 بالادست کانال به حجم ۲۷۰۰ لیتر (۶ سبد فلزی مشبک<sup>۴</sup>  
 پر شده از ذرات شن و ماسه برای کاهش تلاطم جریان  
 ورودی به کانال (۷ تعداد ۲۰ عدد پله از جنس پلکسی  
 گلاس با ابعاد  $4 \times 10 \times 83$  سانتی‌متر با آستانه ورودی از  
 نوع سرریز لبه پهن (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 پایین دست به طول ۴ متر (۱۱ سرریز لبه تیز  
 مستطیلی با ابعاد  $90 \times 90$  متر (عرض)  $\times 35$  متر (ارتفاع) برای  
 کنترل و اندازه‌گیری دبی آزمایشی (۱۲) مخزن تخلیه پایین  
 دست به ابعاد  $1/2 \times 1 \times 1/5$  متر، می‌باشد.

## ۲-۲- ابزار و روش اندازه‌گیری

امروزه با طراحی دستگاه‌های مدرن و پیشرفته آزمایشگاهی  
 سعی در رفتارشناسی و مطالعه پدیده‌های مختلف  
 هیدرولیکی، جهت تدقیق طراحی‌های مربوط به سازه‌های  
 آبی می‌گردد. از مهمترین اهداف ساخت هر مدل  
 آزمایشگاهی، جمع‌آوری اطلاعات لازم به منظور بررسی  
 عملکرد سازه در اصل<sup>۵</sup>، مقایسه گزینه‌های مختلف طراحی  
 و یا قانونمند کردن پدیده‌های هیدرولیکی می‌باشد که  
 بتوانند در موارد مشابه کاربرد داشته باشند. در مطالعه

لوله پیتو، اندازه‌گیری سرعت با خطای بسیار بالایی همراه  
 خواهد بود. مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات بعمل آمده  
 در مطالعه حاضر بر روی مدل فیزیکی کانال پلکانی با  
 شیب ۲۱/۸ درجه با کارهای سایر محققین، نشان داد که  
 دستگاه پیشرفته کاوشگر الکتریکی دو سوزنی<sup>۱</sup> (توسعه داده  
 شده توسط نویسندگان)، اطلاعات دقیق و با ارزشی در  
 ارتباط با مشخصه‌های تلاطم جریان مخلوط آب و هوا  
 روی تنداب‌های پلکانی ارائه خواهد داد. برای اندازه‌گیری  
 در جریانهای آب و هوا، کاوشگرهای الکتریکی، با توجه به  
 مزیت‌هایی از قبیل حساسیت بالا، محدوده کاربرد گسترده،  
 کاربرد آسان، تحلیل ساده نتایج و همچنین قیمت پایین، به  
 عنوان مناسبترین وسیله اندازه‌گیری معرفی شده‌اند.  
 پارامترهای جریان دوفازی آب و هوا نظیر کسر حجمی  
 هوا<sup>۲</sup>، شدت آشفتگی جریان<sup>۳</sup> و توزیع سرعت با جزئیات  
 کامل و به ازای مقادیر دبی‌های مختلف، توسط کاوشگر  
 الکتریکی اندازه‌گیری و ثبت گردید. نتایج بدست آمده،  
 درک جدیدی از ساختار پیچیده جریان آب و هوا بر روی  
 سرریزهای پلکانی را ارائه می‌دهد.

## مواد و روش‌ها

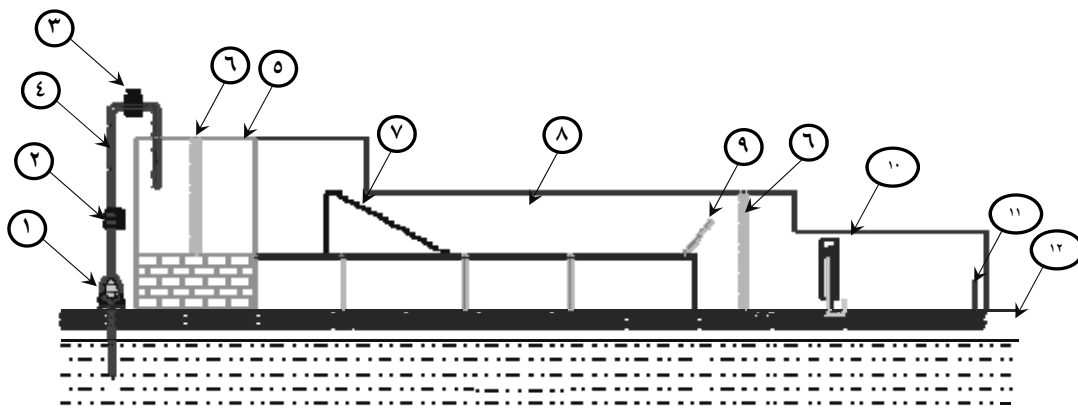
### ساختار آزمایشگاهی

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 (طول)  $5 \times 90$  /  
 (عرض) متر که دیواره سمت راست آن (درجهت 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 پمپ آب از مخزن  
 زیرزمینی واقع در کف آزمایشگاه هیدرولیک تامین خواهد  
 شد. ارتفاع و طول کل مدل کانال پلکانی بترتیب معادل ۸۰

- 1 -Double-tip Conductivity Probe
- 2 -Void Fractions
- 3 -Turbulence Intensity

توسط لوله پیتو (با قطر خارجی ۳/۳ میلی‌متر و حفره‌های جانبی با فاصله ۲۰ میلی‌متر از نوک لوله) و کاوشگر الکتریکی دو سوزنی بر روی مدل فیزیکی کانال پلکانی اندازه‌گیری گردید. لازم به ذکر است که مراحل واسنجی دستگاه کاوشگر الکتریکی دوسوزنی، طبق روش ارائه شده توسط Zarrati و همکاران (۱۹۹۸) انجام شده است.

حاضر، پارامترهای اندازه‌گیری شده عبارتند از: عمق جریان آب زلال<sup>۱</sup> (ناحیه هوادهی نشده)، سرعت جریان مخلوط آب و هوا، غلظت یا کسر حجمی هوای موجود در جریان و دبی ورودی به کانال. برای اندازه‌گیری عمق جریان در طول کانال سرریز، از دستگاه عمق‌سنج نقطه‌ای<sup>۲</sup> با دقت ۱ میلی‌متر استفاده شد. سرعت جریان در آب زلال و جریان هوادهی شده بترتیب



شکل ۱- طرحواره ساختار آزمایشگاهی کانال پلکانی و تاسیسات جنبی آن

گاز و برخورد حبابها به نوک حسگرهای آن می‌باشد و شامل دو حسگر از نوع سوزن‌های جراحی به قطر ۰/۹ میلی‌متر از جنس فولاد ضد زنگ می‌باشند که در فاصله عرضی  $(\Delta Z)$  ۴ میلی‌متری از یکدیگر واقع شده اند. در شکل شماره ۲ نحوه عملکرد کاوشگر الکتریکی دو سوزنی در جریان مخلوط آب و هوا 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 بترتیب معادل ۵۰ کیلوهرتز و ۹۰ ثانیه می‌باشد.

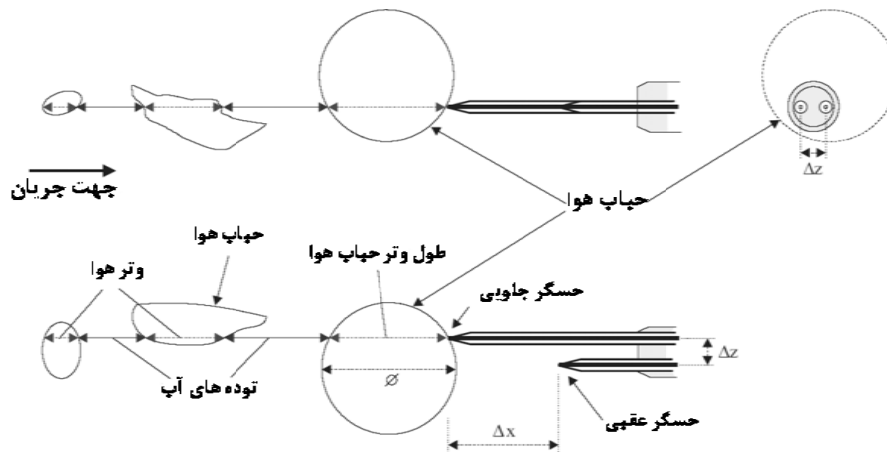
برای اندازه‌گیری دبی‌جریان، از سرریز لبه‌تیز مستطیلی‌شکل در انتهای کانال خروجی و نیز دبی‌سنج الکترومغناطیسی نصب شده بر روی لوله‌ورودی به مخزن بتنی بالادست مدل استفاده بعمل آمد. سایر اطلاعات مربوط به مشخصات جریان دوفازی آب و هوا نظیر سرعت، غلظت هوا، اندازه و فرکانس حباب‌های عبوری در یک مقطع معین از کانال پلکانی توسط کاوشگر الکتریکی دوسوزنی که توسط نویسندگان در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران 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

- 1 -Clear Water
- 2 -Point Gauge

توسعه داده شده به تائید علمی موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو رسیده و در اداره‌مالکیت‌های صنعتی ایران به شماره ۷۹۷۰۹ ثبت اختراع گردیده است. 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 کانال سیلابری پلکانی انجام پذیرفت.

همچنین با بهره‌گیری از این کاوشگر، می‌توان اطلاعات بیشتری در ارتباط با تعداد حبابهای هوا<sup>۱</sup> و توزیع اندازه آنها کسب نمود. این اطلاعات برای درک بهتر فرآیند انتقال جرم مخلوط آب و هوا در کاربردهای مهندسی هیدرولیک حائز اهمیت و اساسی می‌باشند. اعتبارسنجی دستگاه مزبور با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی (Chanson 2002) مورد ارزیابی قرار گرفته و همانگونه که از نتایج بدست آمده در این مقاله مشاهده می‌گردد، از انطباق مناسبی برخوردار می‌باشد. همچنین صحت عملکرد کاوشگر الکتریکی



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

### ۲-۳- 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 با توجه به پارامترهایی نظیر محدودیت ابعاد هندسی کانال آزمایشگاهی، حداکثر دبی قابل انتقال توسط سیستم پمپاژ موجود، حجم آب موجود در مخازن 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"<sup>۲</sup> سعی گردید تا شرایطی در مدل فراهم شود تا نیروهایی که در اصل 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 شماره ۱، خلاصه‌ای از مشخصات و شرایط هیدرولیکی حاکم بر انجام آزمایشات ارائه شده است. 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  $5/8 \times 10^4$  تا  $1/7 \times 10^5$  در رژیم‌های مختلف (جریان ریزشی<sup>۳</sup> تا غلظتی<sup>۴</sup>) می‌باشد. در اینجا پارامتری بعد رینولدز براساس رابطه ذیل بیان می‌گردد:

3 -Nappe Flow  
4 -Skimming Flow

1 -Bubble Count Rate  
2 -Scale Effect

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، بیانگر برخی از ویژگی‌های شاخص این نوع جریان دوفازی می باشد.

$$R_e = VD_H / \nu_w \quad (1)$$

که در رابطه فوق،  $D_H$ ،  $V$  و  $\nu_w$  بترتیب قطر هیدرولیکی، سرعت جریان و لزجت سینماتیکی آب می باشد.

### نتایج و بحث

**۳-۱-۳- مشاهدات جریان دوفازی آب و هوا**  
**۳-۱-۱- بررسی رژیم های مختلف جریان بر روی کانال پلکانی**  
 الگوی جریان عبوری از تنداب پلکانی با هندسه مشخص معمولاً بصورت یکی از رژیم های ریزشی، انتقالی و غلتشی می باشد. نوع رژیم جریان تشکیل شده بر روی این سازه ها تابعی از دبی و هندسه پله ها می باشد (Chanson, 1996; Chanson and Carosi, 2007a; Chanson and Carosi, 2007b).

نتایج اندازه گیری های مربوط به مشخصه های سرعت و تلاطم جریان دوفازی آب و هوا بطور کامل و به ازای تعدادی از پارامترهای دبی بی بعد ( $d_c/h$ ) صورت پذیرفت. حداکثر بار آبی روی دهانه ورودی کانال پلکانی بین ۸۶/۲۵ تا ۹۳/۹۵ سانتی متر و معادل دبی های واحد عرض ۰/۰۱۴۷ تا ۰/۰۴۲ مترمکعب بر ثانیه در واحد عرض می باشد. عدد فرود جریان نزدیک شونده به سرریز در

جدول ۱- خلاصه مشخصات و شرایط هیدرولیکی حاکم بر آزمایشات در تحقیق حاضر

محل شروع هواگیری طبیعی	نوع رژیم مشاهداتی	عدد وبر We	عدد بی بعد رینولدز Re	$d_c/h$	دبی واحد عرض $q_w$ (لیتر در ثانیه بر متر)	دبی $Q_w$ (لیتر در ثانیه)	$\beta$
لبه پله ۴	ریزشی	۱۰۲/۵۱۹	$۵/۸ \times 10^4$	۰/۷۰۱	۱۴/۷	۱۲	۱
لبه پله ۴	ریزشی	۱۰۹/۹۷۵	$۷/۲ \times 10^4$	۰/۸۱۳	۱۸/۴	۱۵	۲
لبه پله ۶	انتقالی	۱۱۹/۳۸۰	$۹/۶ \times 10^4$	۰/۹۸۱	۲۴/۱	۲۰	۳
لبه پله ۷	غلتشی	۱۱۹/۷۸۸	$۱/۲ \times 10^5$	۱/۱۳۱	۳۰/۱	۲۵	۴
لبه پله ۷	غلتشی	۲۰۴/۷۸۹	$۱/۴ \times 10^5$	۱/۲۸۲	۳۶/۱	۳۰	۵
لبه پله ۸	غلتشی	۳۱۴/۵۸۰	$۱/۷ \times 10^5$	۱/۴۱۵	۴۲/۲	۳۵	۶

در دبی های نسبتاً متوسط، جریان بینابینی یا انتقالی مشاهده می شود که از مشخصه های بارز آن می توان به رفتار آشفته جریان، برخورد شدید جت آب به کف پله ها، پاشش قطرات آب به هوا در پایین دست نقطه شروع هوادهی سطحی جریان و ایجاد ریزگردابه ها در زیر جت عبوری جریان در پله های انتهایی و تشکیل جریان نسبتاً استخری (و وجود حفره هوا<sup>۲</sup>) در پله های اولیه تنداب اشاره نمود. به عبارت دیگر در این نوع رژیم، الگوی جریان در

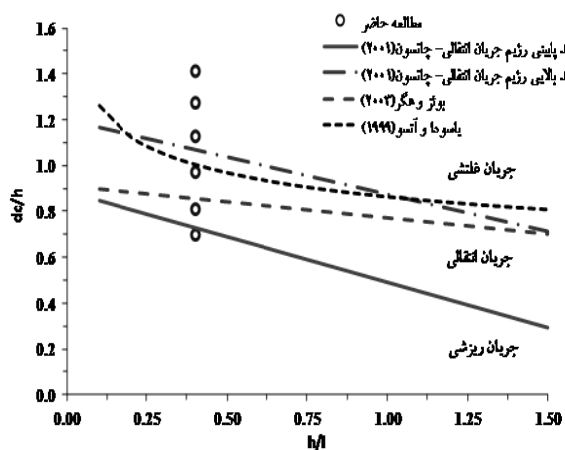
در مطالعه حاضر از روش های آزمایشگاهی برای بررسی شکل گیری انواع جریان های فوق اشاره استفاده می شود. در دبی های پایین، جریان آب بصورت جت های ریزشی و در میان یک سری حوضچه های غوطه وری<sup>۱</sup> از پله ای به پله دیگر بر روی تنداب پلکانی منتقل می شود که به این نوع الگوی جریان در اصطلاح رژیم جریان ریزشی می گویند (Toombes and Chanson, 2008).

<sup>2</sup> Air Cavity

<sup>1</sup> Plunge Pool

دبی‌های زیاد ( $d_0/h > 1/131$ )، جریان غلظتی و در دبی‌های متوسط ( $1/131 < d_0/h < 0/981$ ) الگوی جریان انتقالی بر روی تنداب پلکانی مشاهده گردید.

مقادیر پارامتری بی‌بعد عمق مشخصه جریان ( $d_0/h$ ) متناظر با هریک از رژیم‌های جریان مشاهده شده در شکل شماره ۴ نمایش داده شده است و با مشاهدات سایر محققین مورد مقایسه قرار گرفته است.



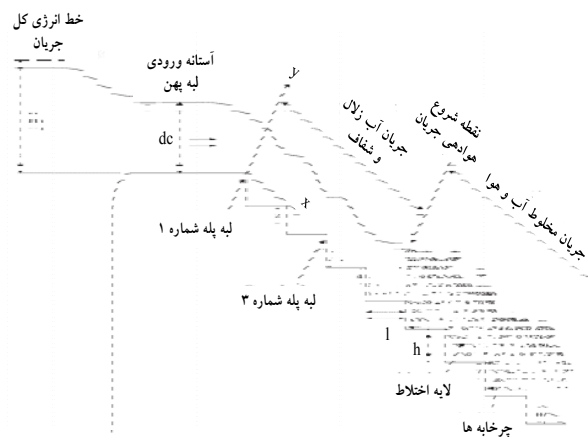
شکل ۴- پیش بینی آستانه وقوع رژیم‌های مختلف جریان بر روی تنداب پلکانی و مقایسه با سایر نمودارهای تجربی همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، نتایج مشاهدات بعمل آمده برای پیش‌بینی رژیم‌های مختلف شده بر روی مدل‌فیزیکی تنداب پلکانی در دبی‌های عبوری مختلف، با توابع و روابط ارائه شده در منابع (Chanson 2002; Cheng et al., 2004) از مطابقت مناسبی برخوردار است.

۳-۱-۲- تشریح مشخصه‌های نقطه شروع هوادهی جریان در بالادست تنداب پلکانی، لایه مرزی متلاطم<sup>۴</sup> از طریق اصطکاک کف سازه تشکیل و در جهت جریان رشد و توسعه می‌یابد. هنگامی که لبه خارجی لایه مرزی توسعه یافته به مجاورت سطح آزاد جریان نزدیک می‌شود، پدیده ورود هوا به داخل جریان روی می‌دهد.

برخی از پله‌های بالادست بصورت نسبتاً ریزشی و در برخی از پله‌های پایین‌دست بصورت غلظتی مشاهده می‌گردد.

در دبی‌های بالاتر، غلظش جریان بر روی کف کاذب<sup>۱</sup> تشکیل شده توسط لبه خارجی پله‌های تنداب مشاهده خواهد شد که تحت عنوان جریان غلظتی بیان می‌گردد. جریان غلظتی شامل چرخابه‌های<sup>۲</sup> قوی همراه با الگوهای گردابه‌ای سه بعدی می‌باشد (Ohtsu et al., 2004). همچنین در این نوع جریان، یکسری ریزگردابه<sup>۳</sup> در گوشه پله‌ها تولید می‌شود.

برای به کمیت درآوردن رژیم جریان بر روی مدل فیزیکی کانال پلکانی اکثر محققین از پارامترهای بی‌بعد  $d_0/h$  و  $h/l$  استفاده نموده‌اند که  $d_0$  معرف عمق بحرانی جریان و  $h$  و  $l$  بترتیب 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 شماره ۳ نمایش داده شده است.

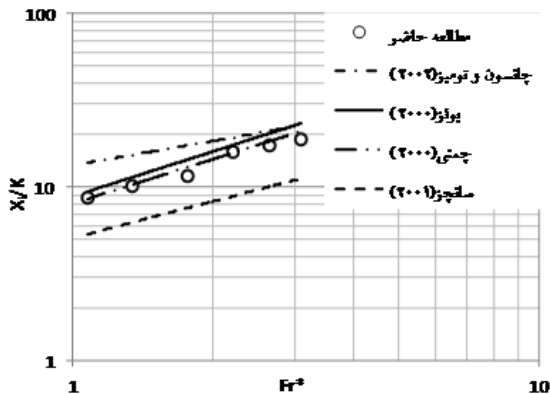


شکل ۳- نمایش برخی از مولفه‌های هیدرولیکی جریان و هندسه تنداب پلکانی برای مقادیر دبی‌های عبوری پایین ( $d_0/h < 0/981$ )، رژیم جریان ریزشی بدون تشکیل پرش هیدرولیکی و برای

<sup>1</sup> Pseudo Bottom  
<sup>2</sup> Recirculation  
<sup>3</sup> Eddies

<sup>4</sup> Turbulent Boundary Layer

در شکل شماره ۵ علاوه بر نمایش نتایج آزمایشگاهی مطالعه حاضر، داده های مربوط به منابع دیگر نیز ارائه و مورد مقایسه قرار گرفته اند. همانگونه که در این شکل ملاحظه می گردد، نتایج بدست آمده در قیاس با کارهای سایر محققین از مطابقت مطلوبی برخوردار می باشند.



شکل شماره ۵- موقعیت شروع هواگیری طبیعی جریان در مدل تنداب پلکانی و مقایسه با سایر تحقیقات

موقعیت نقطه شروع هواگیری طبیعی جریان بر روی مدل فیزیکی کانال سیلابرو پلکانی با شیب  $21/8$  درجه و در بازه  $1/415 < d/h < 0/701$  با رابطه توانی ذیل تخمین زده شد.

$$\frac{X_1}{K} = 8.0833F_r^{*0.7723}, \quad R^2 = 0.97 \quad (4)$$

به منظور ارزیابی کارایی و دقت رابطه فوق، معیار ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برآورد گردید. مقدار ضریب همبستگی بدست آمده بین نتایج آزمایشگاهی و رابطه فوق الاشاره، موکد این مطلب است که این رابطه به خوبی قادر به برآورد و پیش بینی موقعیت شروع هواگیری جریان در کانالهای سیلابروی پلکانی با مشخصات هندسی و هیدرولیکی مشابه مدل فیزیکی توسعه داده شده، می باشد.

همچنین برای سنجش دقت روابط پیشنهاد شده توسط محققین مختلف برای تخمین موقعیت شروع هواگیری جریان در کانال های سیلابروی پلکانی (که در شکل شماره ۵ ارائه گردیده است)، از شاخص آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) بر طبق رابطه زیر استفاده گردید:

موقعیتی که در آن پدیده هوادهی سطحی جریان ایجاد می شود را نقطه شروع هوادهی<sup>۱</sup> می نامند. بلافاصله در پایین دست این نقطه، تلاطم در مجاورت سطح آزاد جریان در حدی است که منجر به شروع هوادهی شدید می گردد.

در این تحقیق، موقعیت نقطه شروع هوادهی طبیعی جریان در رژیم های مختلف با استفاده از روش های آزمایشگاهی و اندازه گیری تراز سطح آب در محل شروع هوادهی (با استفاده از عمق سنج نقطه ای) در طول محور میانی سرریز ثبت و مورد بررسی قرار گرفت. تعیین موقعیت نقطه شروع هوادهی جریان در طول سرریز پلکانی از نظر برآورد ناحیه هوادهی نشده<sup>۲</sup> جریان که در معرض خطر کاویتاسیون قرار دارد، بسیار حائز اهمیت است. پدیده کاویتاسیون یکی از معضلات اساسی و جدی در سازه های هیدرولیکی است که در نتیجه فشارهای هیدرودینامیکی کمتر از فشار بخار آب، بر روی سطوح یا لبه پله ها ممکن است ایجاد گردد (Boes & Hager, 2003a) و خسارات شدیدی بر روی پله های سرریز ایجاد نماید. این پدیده ممکن است و منجر به تخریب بتن سازه گردد. امکان کاهش خسارات احتمالی پدیده کاویتاسیون و به حداقل رساندن شدت آن، از طریق هوادهی طبیعی جریان در طول سازه سرریز، میسر می باشد. موقعیت نقطه شروع هوادهی طبیعی جریان تابعی از زبری سطح ( $k_s$ )، دبی جریان و شیب سرریز ( $\theta$ ) می باشد. در شکل شماره ۵، تغییرات پارامتر بی بعد  $X_1/k_s$  بصورت تابعی از عدد فرود زبری جریان ( $Fr^*$ ) برای دبی های مورد آزمایش ترسیم شده است. پارامتر  $k_s$  بیانگر ارتفاع زبری سطح پله بوده و برحسب  $h \cos \theta$  بیان می گردد. پارامتر  $Fr^*$  عدد فرود جریان برحسب زبری پله می باشد:

$$F_r^* = q_w / \sqrt{(h \cos \theta)^3 g \sin \theta} \quad (3)$$

<sup>1</sup> Inception Point of Air Entrainment

<sup>2</sup> Non-aerated Region



است که مقادیر بالای بدست آمده برای پارامتر RMSE در روابط سایر محققین، بدلیل دامنه عدد فرود بالای جریان و نیز مشخصات هندسی متفاوت مدل فیزیکی بکاررفته در آن تحقیقات نسبت به تحقیق حاضر می‌باشد. به عبارت دیگر، اگرچه روابط توسعه داده شده (توسط محققین نام برده شده در جدول شماره ۲)، برای شرایط جریان و هندسه مدل فیزیکی بکار رفته در این تحقیق، از دقت چندان بالایی برخوردار نمی‌باشند اما در شرایط هیدرولیکی تعریف شده در تحقیقات آنها دارای دقت مناسبی هستند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{X_I}{K} \right)_p - \left( \frac{X_I}{K} \right)_o \right)^2} \quad (5)$$

که در آن  $\left( \frac{X_I}{K} \right)_p$  مقادیر تخمینی،  $\left( \frac{X_I}{K} \right)_o$  مقادیر مشاهداتی و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشد. نتایج حاصل از ارزیابی و مقایسه دقت روابط سایر محققین با مطالعه حاضر بر مبنای معیار آماری فوق‌الاشاره، در جدول شماره ۲ ارائه گردیده است. همانطور که در این جدول ملاحظه می‌گردد، مقدار پارامتر RMSE برای رابطه پیشنهاد شده در این مقاله (رابطه شماره ۴) دارای کمترین مقدار بوده و در نتیجه نسبت به روابط سایرین از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. لازم به ذکر

جدول ۲- مقایسه کارایی و دقت روابط محاسباتی مختلف بر مبنای معیار آماری RMSE برای پیش بینی موقعیت شروع هواگیری جریان بر روی مدل فیزیکی کانال سیلابری پلکانی در تحقیق حاضر

نام محقق	رابطه چانسون و تومبز	رابطه بوئز	رابطه چمنی	رابطه سانچز	مطالعه حاضر
	$\left( \frac{X_I}{K} \right)_p$	$\left( \frac{X_I}{K} \right)_p$	$\left( \frac{X_I}{K} \right)_p$	$\left( \frac{X_I}{K} \right)_p$	$\left( \frac{X_I}{K} \right)_p$
	۱۳/۸۱۵	۱۶/۵۹۷	۸/۵۴۸	۵/۳۵۸	۸/۵۵۳
	۱۵/۳۰۲	۱۹/۷۸۹	۱۰/۳۰۵	۶/۲۴۹	۱۰/۱۳۶
	۱۷/۳۸۵	۲۴/۶۴۷	۱۳/۰۱۲	۷/۵۷۳	۱۲/۵۲۹
	۱۹/۲۸۵	۲۹/۴۶۵	۱۵/۷۳۰	۸/۸۵۳	۱۴/۸۸۶
	۲۰/۹۹۲	۳۴/۰۹۱	۱۸/۳۶۷	۱۰/۰۵۸	۱۷/۱۳۷
	۲۲/۵۵۲	۳۸/۵۶۶	۲۰/۹۳۸	۱۱/۲۰۴	۱۹/۳۰۳
	۸/۷۰۰	۱۳/۸۱۵	۸/۵۴۸	۵/۳۵۸	۸/۵۵۳
	۱۰/۱۵۰	۱۵/۳۰۲	۱۰/۳۰۵	۶/۲۴۹	۱۰/۱۳۶
	۱۱/۶۰۰	۱۷/۳۸۵	۱۳/۰۱۲	۷/۵۷۳	۱۲/۵۲۹
	۱۵/۹۵۰	۱۹/۲۸۵	۱۵/۷۳۰	۸/۸۵۳	۱۴/۸۸۶
	۱۷/۴۰۰	۲۰/۹۹۲	۱۸/۳۶۷	۱۰/۰۵۸	۱۷/۱۳۷
	۱۸/۸۵۰	۲۲/۵۵۲	۲۰/۹۳۸	۱۱/۲۰۴	۱۹/۳۰۳

### ۲-۳- تعیین نیمرخ قائم سرعت و شدت آشفتگی جریان

تبعیت می‌کند. اما بدلیل 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- پراتل، قابل کاربرد نمی‌باشد.

با مقایسه مطالعات و پژوهش‌های گذشته در ارتباط با جریان یکنواخت زبر<sup>۱</sup> بر روی بسترهای سنگی در رودخانه‌های پرشیب کوهستانی، تنها تعداد معدودی از محققین (Sayre & Albertson (1963), Chamani & Rajaratnam (1999)) پیشنهاد نمودند که بالای کف کاذب، جریان همگن آب و هوا از تئوری لایه مرزی زبر<sup>۲</sup>

$$\frac{u(x)}{\sqrt{\tau_o / \rho_w}} = \frac{2.30}{\kappa} \log\left(\frac{x}{\kappa}\right) + C1 \quad (6)$$

در رابطه فوق  $k$  ضریب ثابت فون کارمن بوده که براساس داده‌های آزمایشگاهی بین ۰/۴ تا ۰/۴۲ در نظر گرفته می‌شود،

<sup>1</sup> Rough Uniform Flow

<sup>2</sup> Rough Boundary Layer

تعیین می‌گردند. رابطه فوق برای تخمین توزیع قائم سرعت جریان مخلوط آب و هوا در کانال های روباز در مدل واقعی و نیز مدل فیزیکی، معتبر بوده و صحت آن در کارهای تحقیقاتی محققین متعددی نظیر Cummings (1996) و Wood (1991) و Chanson (1989) مورد تأیید قرار گرفته است.

با این حال، با توجه به دبی‌های مورد آزمایش یا بخشی از لایه جریان که در برازش‌های تجربی مورد ملاحظه قرار می‌گیرد، قوانین توانی متعددی با ضرایب مختلف  $D$  و  $N$  برای تخمین توزیع قائم سرعت جریان پیشنهاد شده‌اند که برخی از مهمترین آنها در جدول شماره ۳ ارائه گردیده است.

$C1$  ثابت انتگرال گیری و  $\tau_0$  نیز تنش برشی مرزی می‌باشد. با این وجود، اکثر محققین پیشنهاد نموده‌اند که بالای کف کاذب جریان، سرعت موضعی جریان مخلوط آب و هوا به حداکثر سرعت جریان بستگی دارد و از این رو پارامتر سرعت از قانون توانی<sup>۲</sup> بشرح ذیل بدست می‌آید:

$$U_{90} = DY_{90}^{1/N} \quad (V)$$

و  $U_{90} = \frac{u}{u_{90}}$  و  $Y_{90} = \frac{y}{y_{90}}$  بترتیب پارامترهای بی‌بعد سرعت و عمق جریان دوفازی آب و هوا می‌باشند. متغیرهای  $u_{90}$  و  $y_{90}$  بترتیب معرف سرعت و عمق در نقطه‌ای از جریان هستند که غلظت هوا به ۹۰ درصد می‌رسد. مقادیر ضرایب  $D$  و  $N$  توسط داده‌های آزمایشگاهی

جدول ۳- مقایسه مقادیر ضرایب رابطه توانی توزیع سرعت در جریان دوفازی آب و هوا روی تنداب‌های پلکانی

نام محقق	ضریب N	ضریب D	ملاحظات
چانسون (۲۰۰۱)	۵-۶	۱	جریان غلظتی
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	۱/۰۵	$0.04 \leq Y_{90} \leq 0.8, 26^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$
یاسودا و چانسون (۲۰۰۳)	۹	۱	$0.05 \leq Y_{90} \leq 1, \theta = 15.6^\circ$
تحقیق حاضر	۵/۲۱	۱/۰۱۲	$0.03 \leq Y_{90} \leq 0.92, \theta = 21.8^\circ$

مطالعه حاضر، توزیع سرعت در لبه هریک از پله‌ها با تابع توانی و برای  $y/y_{90} < 1$  بخوبی برازش داده شد.

$$\left(\frac{u}{u_{90}}\right) = D \left(\frac{y}{y_{90}}\right)^{1/N}, \quad 0 \leq \frac{y}{y_{90}} \leq 1 \quad (A)$$

در شکل شماره ۶، رابطه (۸) با نتایج آزمایشگاهی برای مقادیر مختلف پارامتر بی‌بعد ( $d/h$ ) مورد مقایسه قرار گرفته است با توجه به پراکنش داده‌های بدست آمده در

در مطالعه حاضر، نمایه تابع توانی سرعت بطور متوسط معادل ۵/۲۱ (یا به عبارت دیگر  $N=5/21$ ) بدست آمد. اگرچه مقدار این ضریب بین پله‌های متوالی کانال سیلابروی پلکانی متغیر خواهد بود. عقیده بر این است که این تغییرات ناشی از ایجاد برخی اندرکنش‌ها بین لایه‌های برشی همجوار و جریان حفره‌ای<sup>۱</sup> روی پله‌ها می‌باشند. در

<sup>2</sup> Power Law

<sup>1</sup> Cavity Flow

دارای نوسانات لحظه‌ای می‌باشند. بنابراین در این جریان‌ها، هر مولفه سرعت لحظه‌ای در لایه مرزی بدلیل وجود ریزگردابه‌های متلاطم دارای نوسانات تصادفی می‌باشد. رینولدز هر خاصیت از سیال در جریان متلاطم را به دو متغیر متوسط زمانی و نوسانی تجزیه نمود که در اصطلاح به آن، تجزیه رینولدزی<sup>۲</sup> می‌گویند. بنابراین مولفه سرعت در جهت جریان (u) با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$u = \bar{u} + u' \rightarrow u' = u - \bar{u} \quad (9)$$

$\bar{u}$  = مقدار متوسط زمانی سرعت جریان است که بصورت

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

بیان می‌گردد.

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

$T$  = مدت زمان نمونه برداری داده‌های سرعت

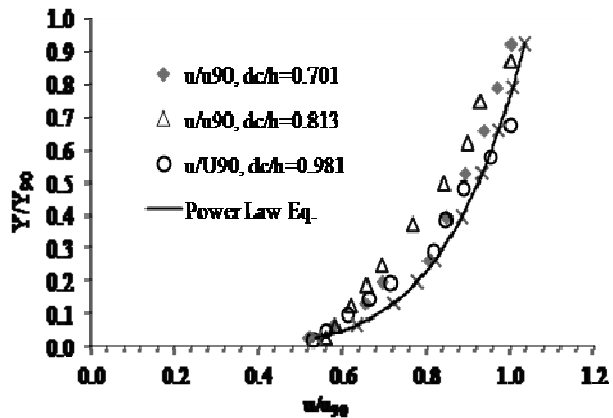
دو روش برای تشریح تلاطم و آشفتگی جریان معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشاهدات تک نقطه‌ای و همبستگی بین چند نقطه. رایج‌ترین روش، استفاده از اندازه‌گیری‌های مربوط به نوسانات سرعت در یک نقطه معین از جریان می‌باشد. بنابراین می‌توان از این طریق معیار دقیقی از شدت آشفتگی جریان بدست آورد.

در اینجا، شدت تلاطم (آشفتگی) جریان دوفازی آب و هوا 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:

$$u'_{rms} = \sqrt{u'^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}{n}} \quad (10)$$

n، تعداد نمونه‌های برداشت شده می‌باشد.

جریان‌های ریزشی و انتقالی، اندازه‌گیری‌های مربوط به سرعت جریان بیانگر پروفیل شبه یکنواخت این پارامتر در لبه پله‌ها می‌باشد.



شکل ۶- نیمرخ قائم توزیع پارامتر سرعت بی بعد در رژیم‌های مختلف جریان (پله شماره ۱۵)

همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، روند پراکندگی مقادیر سرعت موضعی در عمق جریان دوفازی بر روی پله‌ها با تابع توانی برازش مطلوبی ایجاد نموده است. این نتایج با مشاهدات انجام شده توسط Toombes & Chanson, 2002 سازگاری و تطابق فراوانی دارد.

نتایج حاصل از تعیین توزیع قائم سرعت در رژیم جریان غلتشی اساساً همانند نیمرخ‌های اندازه‌گیری شده در جریان هواگیری شده بر روی کانال‌های شیبدار ساده و غیر پلکانی می‌باشد (Cain, 1978, Chanson, 1997a). اگرچه نرخ استهلاك انرژی در کانال‌های سیلابری پلکانی نسبت به کانال‌های شیبدار ساده به مراتب بیشتر است و نیروی کشش<sup>۱</sup> ایجاد شده بر مقاومت جریان غالب خواهد بود.

### ۳-۲-۱- بررسی توزیع شدت آشفتگی جریان

یک جریان آشفته دارای طبیعتی سه بعدی و غیردائمی است. حرکت بسته‌های سیال در چنین جریانی تابع گردابه‌هایی است که در ابعاد مختلف تشکیل شده و سپس مستهلک می‌شوند و به این دلیل مشخصه‌های جریان،

<sup>۱</sup> Drag Force

<sup>۲</sup> Reynolds' decomposition

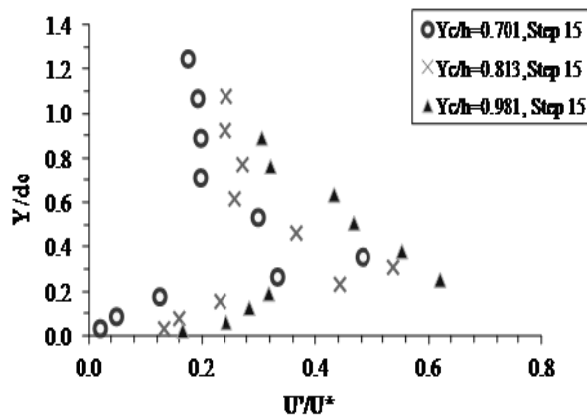
پارامتر شدت آشفتگی نرمال در جریان عبوری از کانال‌های روباز تحت تاثیر الگوی جریان در لایه مرزی و شرایط مرزی در مقاطع مختلف از سرریز می‌باشد. در واقع شدت آشفتگی یک معیار بی‌بعد از نوسانات متلاطم سرعت سطحی است که معرف میزان تلاطم و اغتشاش در جریان بوده و براساس نسبت مجذور میانگین مربعات نوسانات سرعت در جهت جریان به سرعت برشی<sup>۱</sup> تعریف می‌گردد.

$$T_U = \frac{u'_{rms}}{u^*} \quad (11)$$

در رابطه فوق  $u^*$  سرعت برشی یا اصطکاکی جریان می‌باشد و براساس توزیع تنش برشی مرزی بر مبنای شیب خط انرژی قابل برآورد است (در صورتی که جریان از نوع متغییر تدریجی باشد).

$$u^* = \sqrt{\tau_o / \rho_w} \quad (12)$$

$$\tau_o = g\rho_w S_f \int_{y=0}^{y=y_{90}} (1-C) dy \quad (13)$$



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

از عمق جریان در بازه  $0/5 \leq y/d_c \leq 0/4$  به بیشینه مقدار خود خواهد رسید و سپس در ناحیه فوقانی جریان بتدریج کاهش می‌یابد.

این روند تغییرات در مطالعات قبلی نیز مشاهده گردیده بود (Chanson & Toombes 2002a, Gonzalez, 2005, Carosi and Chanson, 2007a). فرض بر این است که

همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، مشخصه‌های آشفتگی در نواحی مختلف از عمق جریان متفاوت خواهد بود. در اینجا، شدت آشفتگی در مجاورت کف پله و در زیر لایه لزج بسرعت افزایش می‌یابد و در محدوده میانی

1 -Shear Velocity  
2 -Boundary Shear Stress  
3 -Viscous Sub-Layer

است). اگرچه یافته‌ها و نتایج این تحقیق برای سرریز با شیب متوسط ( $\theta = 21/8^\circ$ ) بدست آمده است، لکن عقیده بر این است که خروجی‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های بعمل آمده در محدوده وسیعی از هندسه‌های مختلف تنداب پلکانی و شرایط مختلف جریان، معتبر و قابل استفاده می‌باشد.

#### فهرست منابع

- Amador, A., Sánchez-Juni, M. and Dolz, J. 2006a. Characterization of the non-aerated flow region in a stepped spillway by PIV. Trans. ASME 128 (11): 1266–1273.
- Boes, R. M. and Hager, W.H. 2003a. Two-phase flow characteristics of stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, 129(9): 661–670.
- Boes, R.M. and Hager, W.H. 2003b. Hydraulic design of stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, 129(9): 671–679.
- Carosi, G. and Chanson, H. 2008. Turbulence characteristics in skimming flows on stepped spillways. Canadian Journal of civil engineering, 35: 865–880.
- Chachereau, Y. and Chanson, H. 2010. Air-water and water projections in hydraulic jumps. 17th Australasian Fluid Mechanics Conference, Auckland, New Zealand.
- Chanson, H. 2002. Air-water flow measurements with intrusive, phase-detection probes. Can we improve their interpretation?. Journal of Hydraulic Engineering, 128 (3): 252–255.
- Chanson, H. and Carosi, G. 2007a. Advanced post-processing and correlation analyses in high-velocity air-water flows. Journal of Environmental Fluid Mechanics, 7:495–508.
- Chanson, H. and Carosi, G. 2007b. Turbulence characterization of high-velocity free-surface flows. 6th International Conference on Multiphase Flow, Leipzig, Germany.
- Cheng, X., Luo, L., Zhao, W. and Li, R. 2004. Two-phase flow simulation of aeration on stepped spillway. Progress in Natural Science, 14 (7): 626–630.
- Felder, S. and Chanson, H. 2009a. Energy dissipation, flow resistance, and gas liquid interfacial area in skimming flows on moderate-slope stepped spillways. Environmental Fluid Mechanics, 9 (4): 427–441.
- Felder, S. and Chanson, H. 2009b. Turbulence, dynamic similarity and scale effects in high-velocity

مقادیر بالای شدت آشفتگی جریان در ناحیه میانی جریان بدلیل تغییرات پیوسته ساختار سطحی جریان مخلوط آب و هوا می‌باشد.

#### نتیجه‌گیری

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

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

نتایج شامل پارامترهای جریان مخلوط آب و هوا نظیر غلظت هوا، سرعت جریان، شدت آشفتگی و نرخ شمارش تعداد حباب‌های هوای عبوری از مقطع معین، می‌باشد.

براساس سرعت‌های اندازه‌گیری شده جریان دوفازی آب و هوا، تنش برشی، سرعت برشی و نیز شدت آشفتگی با دقت مطلوبی برآورد گردیدند.

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

در پایین دست نقطه شروع هواگیری 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 Ohtsu و Yasuda دارد. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که بلافاصله در پایین دست نقطه شروع هواگیری جریان، جریان بسرعت 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  $0/3 < C < 0/7$

- Fluids, 47 (1): 1–18.
- Gonzalez, C.A. and Chanson, H. 2008. Turbulence and cavity recirculation in air–water skimming flows on a stepped spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 1: 4–14.
- Meireles, I. and Matos, J. 2009. Skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(8): 685–689.
- Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Takahashi, M. 2004. Flow characteristics of skimming flows in stepped channels”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 860-869.
- Pfister, M. and Hager, W.H. 2010. Self-entrainment of air on stepped spillways. Elsevier, *International Journal of Multi phase Flow*, 23-31.
- Sanchez-Juny, M. and Dolz, J. 2005. Experimental study of transition and skimming flows on stepped spillways in RCC dams: qualitative analysis and pressure measurements, *Journal of Hydraulic Research*, 43 (5): 540–548.
- free-surface flows above a stepped chute. *Exp.*
- Toombes, L. and Chanson, H. 2005. Air–water mass transfer on a stepped waterway. *Journal of Environmental Engineering*, 131(10): 1377-1386.
- Toombes, L. and Chanson, H. 2008. Flow patterns in nappe flow regime down low gradient stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*, 46: 30-38.
- Yasuda, Y. and Chanson, H. 2003. Micro -and Macro-Scopic study of two-phase flow on a stepped chute. *Proc. XXX IAHR Congress, Thessaloniki, Greece*, 695-703.
- Zare, H.K. and Doering, J. C. 2012. Inception Point of Air Entrainment and Training Wall Characteristics of Baffles and Sills on Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1119-1124.
- Zarrati, A.R. Morgan, L. 1998. Development of a Needle Probe for Measurement in Air-Water flow, *International Conference on Water Resources Engineering*, ASCE, USA.



ISSN 2251-7480

## Velocity and turbulence distribution in two phase air-water flows on stepped floodway channels

Mohammad Reza Beheshti<sup>1\*</sup>, Amir Khosrojerdi<sup>2</sup>, Hossein Sedghi<sup>3</sup> and Seyed Mahmud Borghei<sup>4</sup>

1\*) PhD student, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Corresponding author email: [mr.beheshti@srbiau.ac.ir](mailto:mr.beheshti@srbiau.ac.ir)

2) Assistant professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3) Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4) Professor, Civil Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Received: 11-08-2012

Accepted: 21-12-2012

### Abstract

Soil conservation against flood erosion is very important for optimal use of soil and water resources. Stepped floodway channels are one of the essential structural approaches for soil protection against flood flows in high slope lands at urban areas. In these channels flows are characterized by intense turbulence and strong flow aeration, but most studies did not investigate the turbulence characteristics. In this study, highly turbulent air-water flows skimming down a large-size stepped chute were systematically investigated. An experimental study of detailed air-water flow properties measurements were introduced in different types of flow regimes on a stepped channel ( $\theta = 21.8^\circ$ ,  $h=0.04\text{m}$ ,  $l=0.10\text{m}$ ) 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 was designed, developed and calibrated by writers. The results showed that the turbulence characteristics vary in different regions. The study showed further that the turbulence intensity increases rapidly close to the step bottom at the viscous sub layer and maximized for  $0.4 \leq y/d_c \leq 0.5$  at intermediate region then decreases gradually in the upper region. It is hypothesized that the high turbulence levels in the intermediate region were caused by the continuous deformations and modification of the air-water interfacial structure.

**Keywords:** conductivity probe; inception point; stepped floodway channel; turbulence intensity

