

## هوادهای حلقوی در تونل‌های نعل اسبی

محمد جواد استادمیرزا<sup>۱</sup>، امیر رضا زراتی<sup>۲\*</sup>، رضا روشن<sup>۳</sup>، خداداد صفوی<sup>۴</sup>، حامد سرکرده<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- عضو هیئت علمی گروه سازه‌های هیدرولیکی، موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو

۴- کارشناس ارشد گروه سازه‌های هیدرولیکی، موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو

\* تهران، خ حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

zarrati@aut.ac.ir

**چکیده-** یکی از عملی‌ترین و اقتصادی‌ترین روشهای شناخته شده برای پیشگیری و کاهش خطر ناشی از حفره‌زایی در جریان‌های با سرعت بالا در سازه‌های هیدرولیکی، هوادهی به جریان است. پژوهشهای متعددی در زمینه هوادهای به‌کار رفته در سرریزها انجام شده است. با آن‌که تا کنون روشی کامل برای طراحی هوادهای ارائه نشده، اما نمونه‌های زیادی در سراسر دنیا ساخته و اجرا شده است. برای مثال خطر حفره‌زایی در تونل‌ها، طراحان را وادار به ساخت هوادهی برای این سازه‌ها می‌کند. با توجه به مقاطع رایج یعنی دایره‌ای و نعل اسبی، نوع خاصی از هوادهای حلقوی برای تونل‌ها لازم است. کمبود اطلاعات و تجربه در زمینه این نوع هوادهی سبب می‌شود که بعضی از طراحان با ریختن بتن ثانویه مقطع تونل را ابتدا چهار گوش کرده و سپس از هوادهایی شبیه به سرریز بر روی آنها استفاده کنند. این کار بسیار پر هزینه و زمان‌بر است. مقاله حاضر به مطالعه هوادهای حلقوی با استفاده از مدل فیزیکی تونل با مقطع نعل اسبی پرداخته و در آن اثر هندسه این نوع هوادهی بر طول جت تشکیل شده و میزان پاشش آب مطالعه شده است. نتایج تحقیقات حاکی از لزوم تبعیت شکل هوادهی از مقطع تونل برای کاهش میزان پاشش است. نتایج مطالعات نشان داد که در محدوده اعداد فرود آزمایش شده و کاهش پاشش آب بهتر است زاویه شیب کمتر از ۵ درجه در نظر گرفته شده و برای افزایش طول جت و در نتیجه کارایی هوادهی، ارتفاع شیب افزایش یابد.

**کلیدواژگان:** تخلیه‌کننده تحتانی، تونل نعل اسبی، حفره‌زایی، هوادهی، هوادهی حلقوی.

### ۱- مقدمه

جریانهای مخلوط آب و هوا، از مقیاس بسیار کوچک مانند جت آب چرخشی برای مخلوط کردن و هوادهی به مواد در مهندسی شیمی (با قطر جت ۱ میلی‌متر و دبی ۰/۰۰۱ لیتر در ثانیه) تا مقیاس بسیار بزرگ مانند مطالعه

جریانهای آب و هوا در رشته‌های مختلف علوم و مهندسی برای هدف‌های پژوهشی و کاربردی متفاوتی مطالعه می‌شوند. طیف گسترده کاربردهای مطالعه

ساخت مناسب بتن به طوری که نسبت ارتفاع ناهمواری سطح بتن به طول آن از ۱:۲۰ کمتر شود، (USBR, 1997) مقدار  $\sigma_c$  را ۰/۲ تا ۰/۲۵ پیشنهاد می‌کند. برای کیفیت‌های دیگر ساخت و زبری‌های مختلف، (USBR, 1997) نموداری را برای  $\sigma_c$  ارائه کرده است. بالا بردن مقاومت سطوح بتنی یا پوشش و اندود کردن آنها با مواد و مصالحی که هم صیقلی و هم دارای مقاومت بالا باشند، گزینه مناسبی برای به حداقل رساندن خسارت حفره‌زایی است که البته هزینه بسیار بالا دارد.

روکش فولادی بیشتر از سایر مصالح در برابر حفره‌زایی مقاوم است. (Colgate (1971) نشان داد که سرعت ۳۰ متر در ثانیه در مدت سه ساعت حفره‌ای به عمق ۱۳ میلی‌متر را در بتن به وجود می‌آورد. برای به وجود آمدن حفره‌ای با همین اندازه در بتن پلی‌مری به ۱۲۵ ساعت و در فولاد استیل به ۶۰۰۰ ساعت زمان نیاز است.

در مقایسه با سایر روشهای ذکر شده یکی از عملی‌ترین و اقتصادی‌ترین روشهای پیشگیری و کاهش خطرات ناشی از حفره‌زایی هوادهی به جریان است. (Peterka (1953) با آزمایش بر روی قطعات بتنی، وزن کم شده از قطعات بتن را بر اثر حفره‌زایی در جریان آب و هوا اندازه‌گیری کرد. نتایج او نشان داد که در صورت وجود ۲ درصد هوا، تخریب در قطعات بتنی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد و در صورت وجود ۸ درصد هوا، قطعات بتنی کاملاً سالم می‌مانند. همچنین Zhang (1991) با آزمایش بر روی قطعات بتنی در یک تنداب که سرعت جریان در آن تا ۴۵ متر در ثانیه بود نشان داد که وجود ۴ تا ۸ درصد هوا می‌تواند خطر حفره‌زایی را به‌طور کامل برطرف کند. هوادهی جریان، به‌علت وجود حباب‌های هوا که به‌صورت بالشک‌های محافظ در برابر ضربه‌های ناشی از

سرریز سدهای بزرگ در مهندسی عمران (با عمق بیش از ۱۰ متر و دبی بالغ بر ۱۰۰۰۰ متر مکعب در ثانیه) را شامل می‌شود.

یکی از کاربردهای مطالعه جریان آب و هوا، جریان عبوری از روی تنداب سرریزها (آزاد و تونلی) و جریان داخل تخلیه‌کننده‌های تحتانی است. تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی سدها، گاهی سیلابهای با دوره بازگشت طولانی را عبور می‌دهند که معمولاً با سرعت بالا انجام می‌شود. افزایش سرعت جریان عبوری، خطر پدیده حفره‌زایی (کاویتاسیون) را تشدید می‌کند.

حفره‌زایی پدیده‌ای است که در سرعت‌های بالا، به خرابی و ایجاد حفره در سازه‌های هیدرولیکی منجر می‌شود. در سازه‌های هیدرولیکی در صورت بالا رفتن سرعت، کوچکترین ناهمواری در مرزهای جریان، فشار موضعی را پایین می‌آورد که ممکن است تا حد فشار بخار آب کاهش یابد. در این صورت آب به بخار تبدیل شده و حباب‌هایی از بخار آب به وجود می‌آید. این حباب‌ها پس از طی کردن مسیری کوتاه به منطقه‌ای با فشار بالا رسیده و منفجر می‌شوند که این، سر و صدا و امواج ضربه‌ای ایجاد می‌کند. رخداد این پدیده با شاخص حفره‌زایی - که افت فشار لازم را نسبت به انرژی سینماتیک جریان برای شروع حفره‌زایی نشان می‌دهد- بیان می‌شود. چنانچه شاخص حفره‌زایی جریان ( $\sigma$ ) برابر یا کمتر از شاخص حفره‌زایی بحرانی ( $\sigma_c$ ) باشد، احتمال حفره‌زایی بسیار زیاد است. پیش‌بینی حفره‌زایی با تعریف کردن عدد زیر به‌عنوان شاخص حفره‌زایی انجام می‌شود (Falvey, 1990):

$$\sigma = \frac{(P - P_v)}{\rho V^2 / 2} \quad (1)$$

که در آن  $P$  فشار مطلق،  $P_v$  فشار بخار آب،  $\rho$  جرم حجمی سیال و  $V$  سرعت جریان است.  $\sigma_c$  به کیفیت اجرای بتن و سطح تمام شده آن بستگی دارد. برای

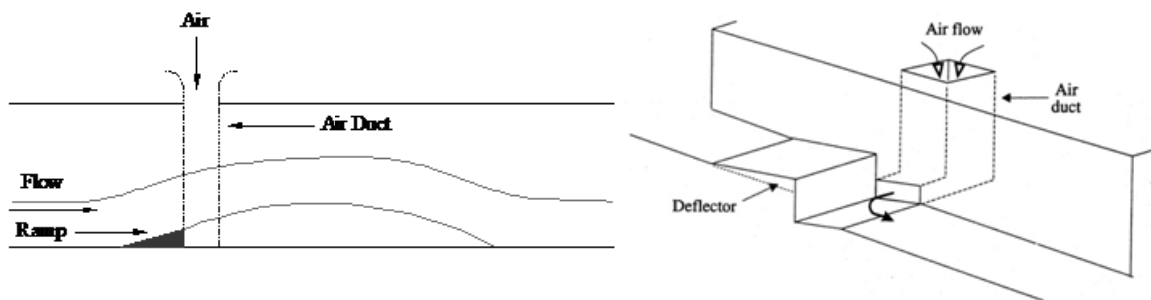
تجربیات چندانی در اجرای هواده در تونل‌ها وجود ندارد و طرح‌های مختلفی برای آن در دسترس نیست. در مجاری بسته با مقطع مستطیلی می‌توان از طرح هواده در سرریز سدها به صورت شکل ۱ استفاده کرد. نکته حائز اهمیت آن است که مقطع مجاری بسته محدود است و بنابراین ارتفاع شیب باید طوری باشد که ضمن ایجاد جت بلند و هواگیری کافی جت جریان، به سقف آن برخورد نکند یا پاشش زیاد جریان اتفاق نیفتد. زیرا پاشش آب به اطراف ممکن است موجب جلوگیری از حرکت آزادانه هوا در بالای سطح آب شود. در سرریزها معمولاً زاویه ۵ تا ۱۲ درجه برای شیب استفاده می‌شود. از طرفی مجاری بسته همیشه مقطع مستطیلی ندارند، بلکه اغلب گرد یا نعل اسبی هستند، در نتیجه با توجه به مقطع گرد و نعل اسبی تونل‌ها، بهتر است از هواده‌هایی با شکل حلقوی برای آنها استفاده نمود.

هرچند در گذشته برای هواده‌ی تونل‌های گرد از شیب‌های حلقوی استفاده شده Flaming Gorge, Blue Mesa Hoover, Glen Canyon و Elbow Tail (Falvey 1990)، اما طراحی‌ها بیشتر به صورت خاص و موردی بوده و مسأله هواده‌ی به طور مستقل و خاص مطالعه نشده است.

انفجار عمل کرده و فشارها را مستهلک می‌کنند، مفید است (Kramer and Hager 2005, Chanson 1996).

هواده‌ی جریان در سرریزها معمولاً با قراردادن هواده در مسیر صورت می‌گیرد (شکل ۱). بدین منظور می‌توان در مسیر جریان از شیب، پله، شیار یا ترکیبی از آنها استفاده کرد.

هواده با ایجاد جدایش، باعث ورود هوا از مرزهای جریان به داخل آن می‌شود. جریان با گذشتن از روی شیب، از سطح جدا شده و به صورت جت آزاد ادامه مسیر می‌دهد. در طول جت جریان، به علت تغییر توزیع فشار از حالت هیدرواستاتیکی به حالت توزیع یکنواخت، هواگیری سطحی نیز با شدت بیشتری انجام می‌شود (Zarrati, 1993). پس از برخورد جت هواده‌ی شده به بستر سرریز یا تونل، حباب‌های هوا تحت فشار هیدرواستاتیک کم‌کم از جریان خارج شده و غلظت هوا در لایه‌های پایینی کاهش می‌یابد. اگر غلظت هوا به کمتر از ۸٪ برسد و خطر حفره‌زایی باقی باشد، به هواده دیگری نیاز است. طول محافظت شده در پایین دست هواده را طول موثر آن می‌نامند و چند معادله برای محاسبه آن ارائه شده است (Pfister and Hager 2010, Ostadmirza et al. 2011).



شکل ۱ تشکیل جت بر روی شیب و هواده‌ی جریان (Falvey, 1990)

آشفستگی به اندازه کافی بالا باشد (عددهای رینولدز و وبر بالا) تا بتوان از تأثیر لزجت و کشش سطحی بر نتایج صرف‌نظر کرد (جدول ۱). بنابراین استفاده از معیار تشابه فرود هنگامی اعتبار دارد که مقیاس مدل به اندازه کافی بزرگ انتخاب شده باشد. البته باید توجه داشت که در مدل هیدرولیکی، سرعت جریان نسبت به نمونه واقعی کمتر و سرعت بالا رفتن حباب‌ها در جریان، مشابه نمونه است، لذا نتایج حاصل از مدل برای کاهش غلظت در نزدیکی بستر در جهت اطمینان بیشتر خواهد بود.

در این تحقیق به منظور کاهش اثرهای مقیاسی، آزمایش‌ها در مدلی انجام شد که در آن آزمایش‌ها در محدوده عددهای رینولدز و وبر زیر درجه به صورت  $180 < We < 408$  و  $3.43 E + 8 < Re < 1.31 E + 9$  قابل انجام بود.

با توجه به محدوده اعداد رینولدز و وبر مشاهده می‌شود که این محدوده نسبت به محدوده توصیه شده برای کاهش اثرهای مقیاسی توسط دیگر پژوهشگران (جدول ۱) بسیار بیشتر بوده و بنابراین می‌توان گفت که اثرهای مقیاسی ناشی از لزجت و کشش سطحی در این آزمایش‌ها به حداقل مقدار خود می‌رسد.

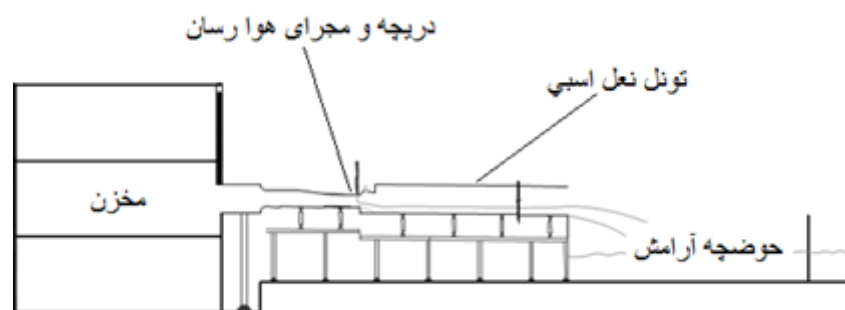
کمبود تجربه در زمینه این نوع خاص از هواده‌ها سبب شده تا بعضی طراحان، نخست مقطع تونل را به شکل مستطیل در آورده و سپس از هواده‌های شبیه به سرریز استفاده کنند. این کار البته به دلیل نیاز به اجرای بتن ثانویه بسیار پر هزینه و زمانبر است. در مقاله حاضر تلاش می‌شود که با مطالعه هواده حلقوی با استفاده از مدل فیزیکی تونل با مقطع نعل اسبی، عملکرد این نوع هواده بررسی و با استفاده از نتایج به دست آمده، روش طراحی این نوع هواده روشن تر شود.

## ۲- تجهیزات آزمایشگاهی

### ۲-۱- تونل

تحقیق حاضر در نمونه‌ای تونل با ابعادی بزرگ شامل مخزن و مجرای تحت فشار خروجی آن، دریچه، مجرای هوارسان و تونل نعل اسبی با قطر (فاصله بین کف تا سقف تونل در مرکز) برابر ۳۸ سانتی‌متر و طول ۴۰ متر، حوضچه آرامش و سرریز لبه تیز در انتهای آن انجام شده است (شکل ۲).

در جریان‌های توأم با هوادهی، شبیه‌سازی هواگیری جریان توسط تشابه‌سازی فرود انجام می‌شود، به شرط آنکه ابعاد مدل به اندازه کافی بزرگ بوده و شدت



شکل ۲ طرحواره مدل آزمایشگاهی (بدون مقیاس)

## ۲-۲- هواده حلقوی

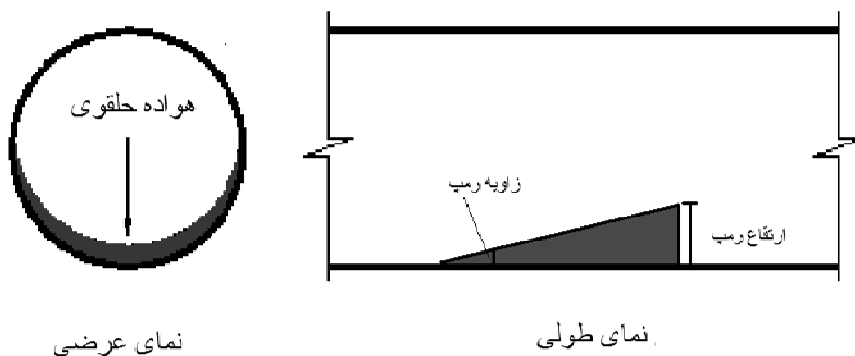
در هواده حلقوی در تونل گرد، ارتفاع شیب در محور وسط کف تونل باید بیشترین مقدار را داشته و به سمت دیوارهای تونل از حداکثر ضخامت تا ضخامت صفر در نقطه‌ای بالاتر از سطح آب در دبی حداکثر به صورت کمانی از دایره (Falvey, 1990)، به تدریج کاهش یابد (شکل ۳). با این کار علاوه بر هواده‌ی جریان در تمام سطح تونل، از تشکیل جریان باله‌ای شکل در پایین دست هواده نیز جلوگیری می‌شود. همچنین، ارتفاع در نظر گرفته شده برای شیب حلقوی باید به گونه‌ای در نظر

گرفته شود که در تمامی شرایط بهره‌برداری از تونل، جت جریان به‌خوبی تشکیل شده و راه از زیر جت به فضای بالای تونل باز باشد و فضای کافی در زیر جت برای هواده‌ی وجود داشته باشد.

در صورتی‌که ارتفاع شیب در برخی نقاط کافی نباشد، ممکن است جت خروجی از لبه شیب، بلافاصله به کناره تونل برخورد کرده و لذا امکان هواده‌ی به زیر جت وجود نداشته باشد. در این صورت اختلال زیادی در جریان همراه با پاشش آب ایجاد می‌شود که باید از رخداد این مسأله جلوگیری شود.

جدول ۱ محدوده پیشنهادی برای کاهش اثرهای مقیاسی در جریان‌های آب و هوا (Hager and Pfister (2010)

محدوده کاربرد	طول مرجع	محدوده	مرجع
هواگیری محلی	عمق آب	$Re > 1 \times 10^5$	Kobus (1984)
هواده‌ها	عمق آب	$We > 110$	Rutschman (1988)
هواده‌ها	عمق آب	$We > 170$	Skripalle (1994)
مخلوط آب و هوا بر روی سرریزهای پله‌ای	عمق آب	$Re > 1 \times 10^5$	Boes (2000)
هواده‌ها	عمق آب	$Re > 2.2 \times 10^5, We > 140$	Pfister (2008)
جریان با هواگیری طبیعی بر روی پرتاب کننده	عمق آب	$Re > 5 \times 10^5$	Chanson (2009)



شکل ۳ طرحواره هواده حلقوی و روش جاسازی آن در داخل تونل

### ۲-۳- دستگاه آب‌سنج و پیرومتر

به‌منظور به‌دست آوردن طول جت بعد از هواده، نمونه‌ای از دستگاه آب سنج ساخته شد. سر این دستگاه از دو صفحه موازی مسی تشکیل شده که ۱ میلی‌متر از هم فاصله داشته و ابعاد هر یک ۲×۲ میلی‌متر بوده و یک لامپ و باتری در مدار آن قرار داشت. زمانی که دستگاه به سطح بیرونی جت نزدیک می‌شد، بر اثر برخورد آب به آن، اتصال بین دو صفحه مسی برقرار شده و لامپ روشن می‌شد. بدین ترتیب موقعیت مرز بیرونی جت آب تعیین می‌شد. علاوه بر استفاده از آب‌سنج به‌منظور به دست آوردن طول جت بعد از هواده، در طول ۱۰۰ سانتی‌متر پایین‌دست هواده و به فاصله هر ۲ سانتی‌متر یک پیرومتر در کف تونل تعبیه شده و محل بیشینه فشار به‌عنوان نقطه برخورد جت با کف تونل ثبت می‌شد.

### ۲-۴- دستگاه غلظت‌سنج

در مخلوط آب و هوا ابزاری برای اندازه‌گیری غلظت هوای وارد شده به جریان لازم است. در سال‌های گذشته برای این منظور تجهیزاتی مانند انواع لیزرها، فیبرهای نوری و پرب‌های سوزنی استفاده شده است، اما استفاده از این وسایل با مشکلاتی مانند بالا بودن هزینه ساخت و تعمیر، نداشتن استحکام کافی در برابر جریان‌های با سرعت بالا و نیاز به خرید تجهیزات پیچیده از مراکز خاصی همراه است.

برای اندازه‌گیری غلظت هوا در آب در تحقیق حاضر دستگاهی به شرح زیر ساخته شد (Zarrati and Ostadmirza, 2010). این دستگاه "پرب مقاومتی صفحه‌ای دیجیتال اندازه‌گیری غلظت هوا" نام دارد و بر اساس خاصیت رسانایی عمل می‌کند. خطای آن برابر ۰.۳٪ اعلام شده است (Lamb and Kilen, 1950). این دستگاه

به علت نبودن راهنمایی برای طراحی هواده‌های حلقوی، سوال‌های متعددی در زمینه طراحی شکل حلقه و ارتفاع شیب وجود دارد. باید توجه داشت که ارتفاع شیب از محور تونل به سوی دو طرف کم شود، آنگاه زاویه شیب می‌تواند ثابت بماند که در این صورت نقطه شروع شیب در محیط مقطع تونل عوض می‌شود و این کار ساخت هواده را مشکل می‌کند. اگر زاویه شیب ثابت نماند، با کاهش زاویه به طرف کنارها، طول جت هواده در مقطع تغییر کرده و رفتار هواده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مقاله حاضر، پنج گزینه هواده حلقوی طراحی و آزمایش شد (جدول ۲).

جدول ۲ مشخصات هندسی هواده‌های آزمایش شده

شماره هواده	شکل هواده	زاویه شیب	ارتفاع شیب (سانتی‌متر)	طول شیب (سانتی‌متر)
A1	دایره‌ای	۵/۷	۳	۳۰
A2	نعل اسبی	۵/۷	۱/۴	۱۴
A3	نعل اسبی	۴	۱/۴	۲۰
A4	نعل اسبی	۴	۱/۶	۲۳
A5	نعل اسبی	۴	۲	۲۸

عملکرد هر گزینه در شرایط مختلف هیدرولیکی بررسی شده و پارامترهای مورد نیاز به‌منظور تحلیل شرایط جریان -مانند طول جت تشکیل شده بر روی هر هواده با استفاده از دستگاه آب‌سنج که در بخش بعدی تشریح می‌شود و پیرومترهای تعبیه شده در کف تونل- اندازه‌گیری شد. به‌علاوه با استفاده از غلظت‌سنج ساخته شده، به اندازه‌گیری میزان پاشش آب ایجاد شده در اثر جت عبوری از روی شیب پرداخته شد (Ostadmirza, 2010). دستگاه‌های مورد استفاده و نتایج در بخش‌های بعدی توضیح داده شده است.

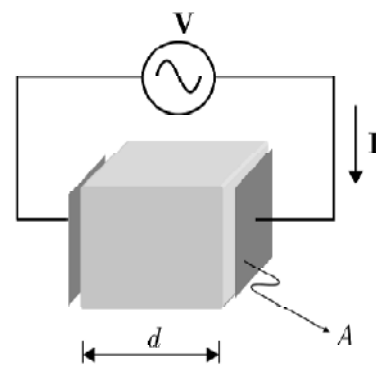
در مدت زمان و فواصل زمانی مشخص شده که قابل تنظیم است (پیش فرض نمونه‌گیری در دستگاه، زمان یک دقیقه و ۲۰ نمونه در هر ثانیه)، دریافت کرده و با تبدیل آن به دیجیتال، آن را به کامپیوتر انتقال داده و در یک فایل متنی ذخیره می‌کند. این مدار، برای این پرب در تحقیق حاضر طراحی و ساخته شده است.

با اعمال ولتاژ خاص به نوک دستگاه به وسیله اتصال به یک دستگاه تولید سیگنال‌های الکترونیکی<sup>۱</sup> و بررسی تغییرات ایجاد شده در ولتاژ خروجی از پرب به وسیله نوسان‌نگار<sup>۲</sup> بر اساس سیال قرار گرفته در حجم کنترل درصد هوا یا آب عبوری از محل نوک دستگاه تعیین می‌شود. در تحقیق حاضر کاربرد این دستگاه در دو حیطه اندازه‌گیری غلظت هوای محبوس در آب و همچنین بررسی و ارزیابی میزان پاشش جریان<sup>۳</sup> بوده است (Ostadirza et al., 2011). در مقاله حاضر، پاشش در حقیقت میزان آب در حجم مورد اندازه‌گیری (حجم کنترل) است. میزان پاشش برای هر نقطه، از مقدار متوسط‌گیری شده ۱۲۰۰ داده برداشت شده توسط دستگاه در مدت زمان ۶۰ ثانیه در آن حجم کنترل -معرف میزان قطرها و شدت عبور آنها از آن- به دست آمده است. توضیحات بیشتر در بخش‌های بعدی ارائه شده است.

### ۳- آزمایش‌ها و نتایج

یکی از پارامترهای اندازه‌گیری شده در مدل، طول جت جریان عبوری از روی شیب در محل محور تونل است. با توجه به این‌که با افزایش طول جت، میزان هوارسانی به جریان در پایین دست هواده نیز بیشتر می‌شود، لذا نتایج این اندازه‌گیری در شرایط مختلف جریان برای بررسی

با قرار دادن دو صفحه رسانا در برابر هم و تشکیل یک سلول (حجم کنترل) به عنوان سر پرب (شکل ۴) ساخته شده و بر اساس تفاوت ماده پرکننده فاصله دو صفحه (آب خالص، مخلوط آب و هوا، هوا) در رسانایی بین دو صفحه دستگاه و اندازه‌گیری ولتاژ خروجی، به تعیین میزان هوای داخل آب می‌پردازد.



شکل ۴ طرحواره سلول اندازه‌گیری

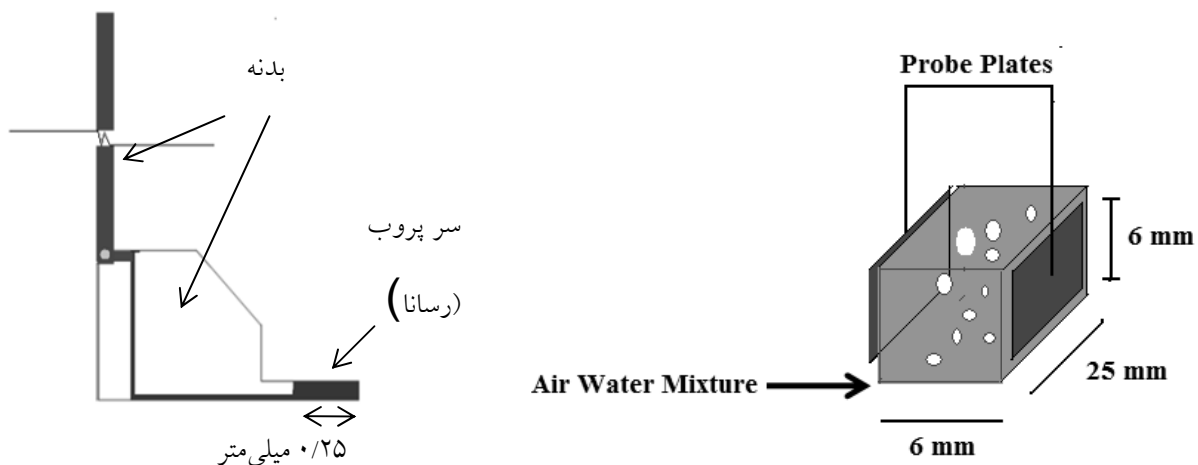
این دستگاه که در تحقیق حاضر ساخته شده از چهار قسمت تشکیل می‌شود:

- ۱) سر پرب: این قسمت از دو صفحه رسانا به طول ۲/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۰/۶ سانتی‌متر تشکیل شده که روبروی یکدیگر و با فاصله ۰/۶ سانتی‌متر، در داخل محیط مورد نظر برای اندازه‌گیری غلظت هوا قرار داده شده و به مدار آنالوگ متصل می‌شود (شکل ۵).
- ۲) مدار آنالوگ: این بخش توسط ۲ عدد باطری ۶ ولت تغذیه شده و با ارسال ولتاژ به سر پرب و اندازه‌گیری ولتاژ خروجی، میزان هوا را مشخص می‌سازد.
- ۳) ولت سنج: ولتاژ خروجی (درصد هوا) از قسمت آنالوگ را نشان می‌دهد.
- ۴) مدار دیجیتال: این قسمت توسط برنامه‌ای که برای میکرووی آن نوشته شده داده‌های خروجی مدار آنالوگ را

1. Signal Generator  
2. Oscilloscope  
3. Splashing

افزایش نیاز به هوا - در صورتی که هوا از جایی تأمین نشود - به کاهش فشار می‌انجامد. از طرفی قطره‌های آب در فضای بالای جریان مانع حرکت آزاد هوا از پایین‌دست به سمت دریچه تونل می‌شوند این پدیده نیز به کمبود هوا در مسیر جریان پر سرعت و لذا کاهش فشار منجر می‌شود.

کارایی گزینه‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. از سوی دیگر، پدیده پاشش علاوه بر امکان وارد کردن صدمه به سقف و دیوار تونل، احتمال مسدود شدن تونل را نیز بالا می‌برد. قطره‌های آب با کششی که ایجاد می‌کنند هوا را در فضای بالای آب در طول تونل به همراه خود کشیده و نیاز به هوا را در فضای بالای سطح آب به شدت افزایش می‌دهند.



شکل ۵ طرحواره سر پروب

جدول ۳ اندازه طول جت جریان از روی شیب هواده در گزینه‌های مختلف هواده نعل اسبی و در شرایط مختلف هیدرولیکی

Fr (بالادست شیب)	A2	A3	A4	A5
	$L_j(Cm)$	$L_j(Cm)$	$L_j(Cm)$	$L_j(Cm)$
۶/۵	۷۵	۷۰	۷۵	۸۵
۶/۳	۵۵	۵۰	۵۸	۶۵
۵/۳	۶۰	۵۵	۶۰	۶۵
۴/۳	۵۰	۴۵	۵۰	۵۵
۳	۵۰	۴۵	۴۸	۵۰
۳/۹	۴۰	۴۰	۴۲	۴۵

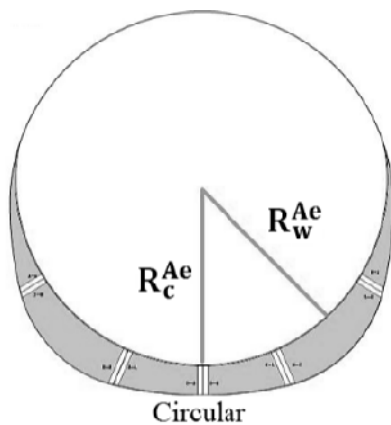


کف شیب به این ترتیب به دست آمد که از مرکز دایره مقطع اصلی ۳ سانتی‌متر بالا رفته و قوسی به شعاع ۳۸ سانتی‌متر زده شده است. در این حالت زاویه شیب در محور تونل با افق برابر ۵/۷ درجه است.

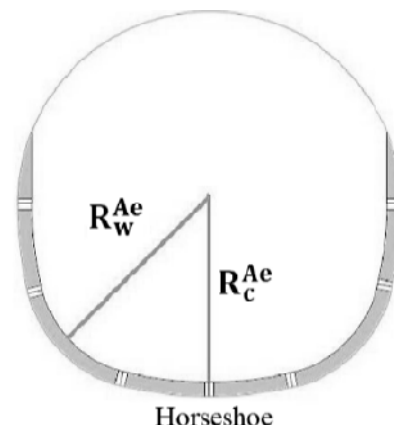
پس از نصب و آزمایش این گزینه مشاهده شد که شرایط جریان عبوری، به دلیل ارتفاع و زاویه زیاد شیب، به گونه‌ای است که جریان کل مقطع تونل را در پایین‌دست هواده مسدود می‌کند (شکل ۷) که چنین شرایطی مطلوب نیست. لذا شرایط ایجاد شده برای جریان در تونل (ناشی از این گزینه) مناسب نبوده و باید تغییراتی در هندسه هواده‌ها اعمال می‌شد.

در این تحقیق، برای بررسی تأثیر هندسه هواده بر طول جت عبوری از آن و میزان پاشش متناظر ایجاد شده، با ثابت نگاه داشتن زاویه شیب، طول جت عبوری و میزان پاشش ایجاد شده به ازای ارتفاع‌های مختلف شیب و با ثابت نگاه داشتن ارتفاع شیب، طول جت عبوری و میزان پاشش ایجاد شده به ازای زوایای مختلف شیب اندازه‌گیری و مقایسه شده است.

اولین گزینه هواده مطابق طرح‌های موجود در تونل‌های گرد به شکل قوسی از دایره (شکل ۳) طراحی و ساخته شد (شکل ۶-الف). در این گزینه، ارتفاع شیب در کف برابر ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در واقع قوس

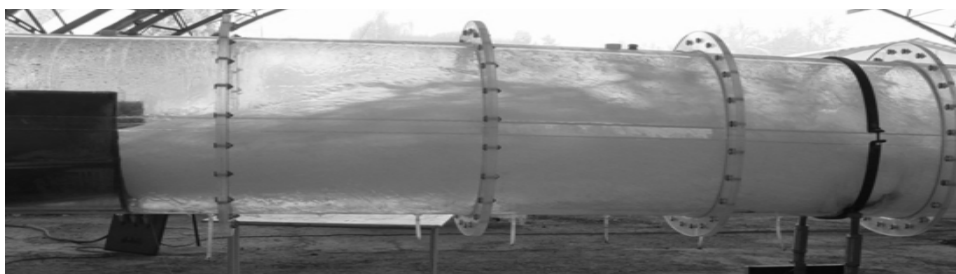


(الف)



(ب)

شکل ۶ طرحواره هواده حلقوی الف (دایره‌ای (گزینه اول)، ب) نعل اسبی (گزینه‌های ۲ تا ۵  $R_w^{Ac} = R_c^{Ac}$ )  
( $R_w^{Ac}$  شعاع هواده در دیوار،  $R_c^{Ac}$  شعاع هواده در مرکز)



شکل ۷ شرایط جریان روی اولین هواده و مسدود شدن مقطع جریان در پایین‌دست آن

پرواز می‌تواند وجود داشته باشد، طوری که جریان هوا دچار اختلال نشود. در تحقیق حاضر به وسیله دستگاه سنجش غلظت، درصد آب اندازه‌گیری و برای گزینه‌های مختلف مقایسه شده است.

در ادامه کار و با توجه به نتایج به دست آمده، چند گزینه دیگر برای هواده حلقوی نعل اسبی مطابق جدول ۱ انتخاب، آزمایش و مقایسه شد. برای بررسی تأثیر هندسه هواده بر طول جت و میزان پاشش، ابتدا به مقایسه تأثیر تفاوت زاویه شیب (۵/۷ و ۴ درجه) با ارتفاع یکسان ۱/۴ سانتی‌متر بین گزینه دوم و سوم و سپس با ثابت نگه داشتن زاویه شیب به اندازه ۴ درجه، طول جت عبوری و میزان پاشش ایجاد شده به ازای ارتفاع‌های مختلف شیب برابر ۱/۴ و ۱/۶ و ۲ سانتی‌متر بین گزینه‌های سوم، چهارم و پنجم اندازه‌گیری و مقایسه شد.

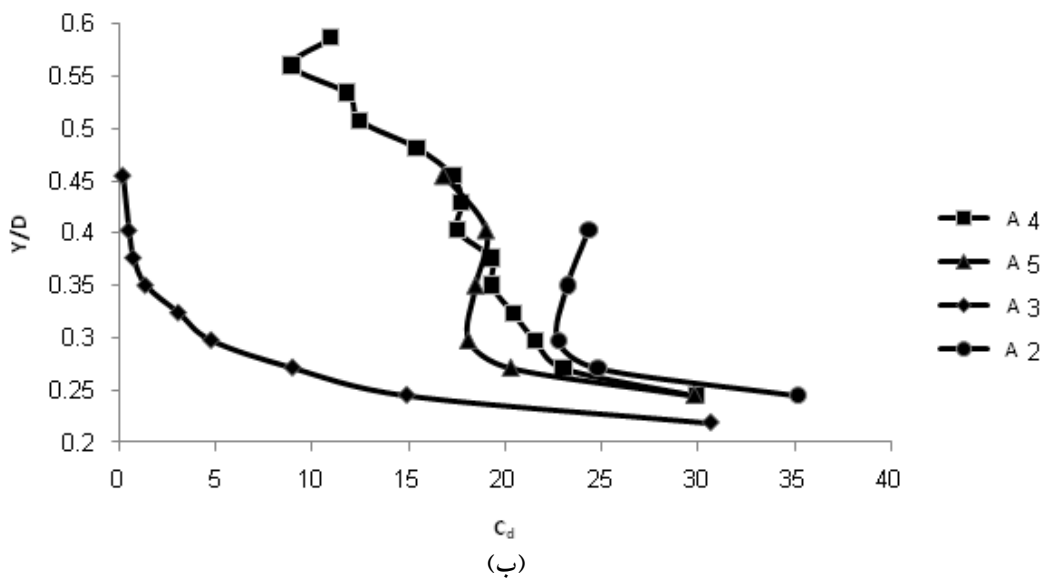
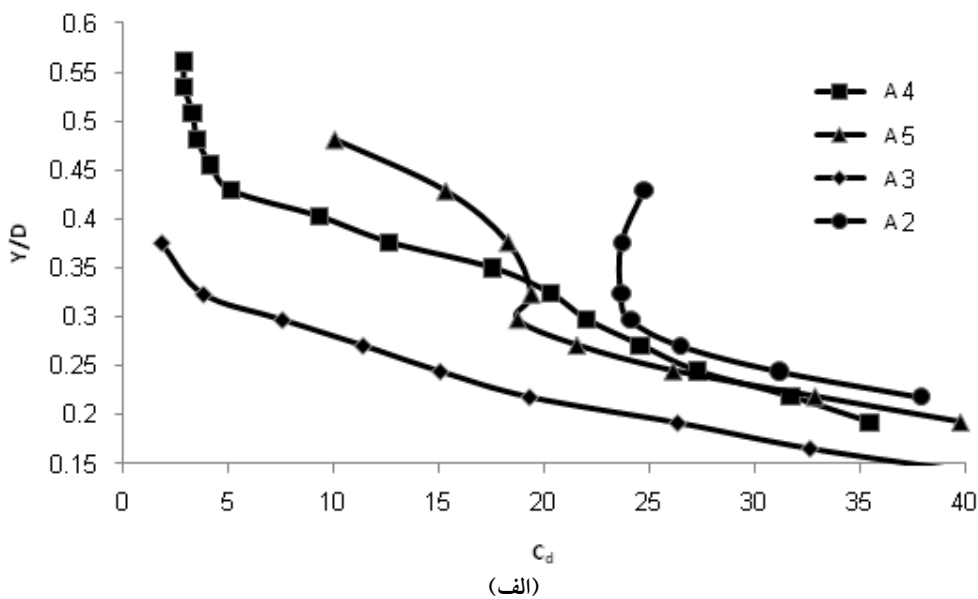
همان‌طور که در جدول ۳ دیده می‌شود، جت عبوری از روی گزینه سوم نسبت به گزینه دوم با ثابت ماندن ارتفاع شیب و کاهش ۳۰ درصدی زاویه، به‌طور متوسط حدود ۷٪ کاهش طول نشان می‌دهد. این در حالی است که میزان پاشش در سطوح بالای جریان به میزان زیادی کاهش یافته است (شکل ۸). با فرض آن که  $C_d$  درصد هوای موجود باشد، شکل ۸ توزیع درصد آب موجود در حجم کنترل ( $C_d = 1 - C$ ) را در مقابل عمق بی‌بعد شده با قطر تونل  $Y/D$  در مقطعی که جت هواده به کف تونل برخورد می‌کند (شکل ۸-الف) و همچنین ۴۰ سانتی‌متر پایین‌دست آن (که انتظار می‌رود بیشترین پاشش در آنها وجود داشته باشد) (شکل ۸-ب) برای گزینه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ در شرایط بحرانی بازشدگی ۱۰۰٪ دریچه و هد مخزن حداکثر یعنی ۳/۵ متر نشان می‌دهد. توجه شود که در این شکل محل سطح آزاد آب را می‌توان درصد تعریف شده‌ای از آب در نظر گرفت. مثلاً می‌توان محل سطح آزاد

با توجه به نامطلوب بودن این گزینه، آزمایش دیگری بر روی آن انجام نشد. تصمیم گرفته شد که در گزینه‌های بعدی، انحنای کف و دیواره‌های هواده با ارتفاع ثابتی برای شیب، از انحنای کف و دیواره‌های تونل تبعیت کند. (شکل ۶-ب).

در گزینه دوم با حفظ زاویه شیب، شکل آن به صورت نعل اسبی طراحی شد و با توجه به پاشش شدید در گزینه ۱ ارتفاع آن نیز به حدود نصف کاهش یافت که البته این امر به معنی کاهش طول شیب نیز هست. با نصب و بررسی گزینه دوم دیده شد که جریان پس از عبور از روی شیب، بدون برخورد به سقف تونل به پایین دست منتقل می‌شود، اما پاشش قطره‌های زیاد هنوز در بالای سطح آب در مدل دیده می‌شد. متأسفانه امکان اندازه‌گیری هوای ورودی به هواده وجود نداشت اما وضعیت ظاهری جریان، نشان دهنده هواده‌ی مناسب جریان بعد از عبور از روی شیب بود. مقایسه وضعیت ظاهری جریان در این دو گزینه نشان داد که هر چه ارتفاع شیب بیشتر باشد، هواده‌ی به جریان مناسب‌تر خواهد بود، اما ارتفاع بالا نیز مشکل برخورد جریان به سقف تونل و پاشش شدید قطره‌ها را به همراه داشت. لذا باید زاویه و ارتفاع شیب را در حالتی بهینه انتخاب کرد. همچنین با مشاهده نتایج بهتر هواده دوم مشخص شد که تبعیت شکل هواده از مقطع تونل برای کاهش میزان پاشش بسیار مؤثر است. در حقیقت گزینه برتر دارای طول بلندتر جت و در عین حال پاشش کمتر است و باید مشخص شود که چه ترکیبی از ارتفاع و زاویه شیب می‌تواند بهترین گزینه باشد. نکته قابل ذکر این که تا کنون معیاری برای پاشش ارائه نشده است. سؤال این است که در مجرای بسته‌ای که لازم است هوا در فضای بالای جریان پر سرعت به منظور تهویه سیستم حرکت داشته باشد، تا چه مقداری قطره‌های در حال

محل سطح آب ایجاد نکرده و نتایج به هم نزدیک است اما در منطقه برخورد جت به دلیل پاشش زیاد قطره‌های آب این دو تعریف تفاوت زیادی را نشان می‌دهند. شکل ۸ نمایش‌دهنده خوبی برای وضعیت پاشش قطره‌ها در داخل تونل است.

را در  $C_d = 40\%$  (Zarrati, 1995) یا حتی  $C_d = 10\%$  (Toombes and Chanson, 2005) تعریف کرد. در جریان هواگیری طبیعی یا پایین‌دست منطقه برخورد جت هواده به بستر این دو فرض، تفاوت زیادی را در



شکل ۸ توزیع درصد آب (پاشش) در عمق بی‌بعد برای گزینه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵  
الف) نقطه برخورد جت به کف، ب) پایین‌دست نقطه برخورد جت به کف

جریان - یعنی حالت بینابینی از طول جت مورد نیاز و پاشش حداقل - برخوردار هستند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر سعی شده با استفاده از یک مدل فیزیکی، عملکرد هواده‌های حلقوی در مجاری بسته با مقاطع نعل اسبی مطالعه شود. با انجام آزمایش‌های مختلف سعی شد به‌ازای شرایط متفاوت هیدرولیکی و برای هواده‌هایی با هندسه متفاوت، اثر هندسه هواده‌ها بر طول جت تشکیل شده و در عین حال کمترین پاشش قطره‌های آب مطالعه شود.

در مجموع با استفاده از نتایج آورده شده برای مقادیر طول جت و پاشش می‌توان دریافت که به‌منظور تنظیم هواده‌ی جریان در تونل‌های حلقوی موارد زیر تأثیر گذار است:

- در طراحی هواده‌ها، گزینه‌هایی که انحنای کف و دیوارهای آن‌ها از انحنای کف و دیواره‌های تونل تبعیت نمایند، کارایی بهتری دارند.

- هواده با ارتفاع و زاویه زیاد شیب، سبب به‌وجود آمدن شرایط جریان نامناسب می‌شود، به‌گونه‌ای که ممکن است کل مقطع تونل را در پایین‌دست هواده مسدود کند. بنابراین برای جلوگیری از این مشکل باید در طراحی هندسه هواده دقت لازم مبذول شود. در مطالعات انجام شده مشخص شد که در محدوده عدد فرود آزمایش‌ها، بهتر است زاویه شیب در محدوده کمتر از ۵ درجه باشد و برای افزایش طول جت ارتفاع شیب افزایش یابد.

#### ۵- قدردانی

تمامی آزمایش‌ها در مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام شده است. لذا مؤلفان بر خود لازم می‌دانند، تشکر و قدردانی خود را از همکاری‌های این مؤسسه ابراز نمایند.

همان‌گونه که در شکل ۸ مشخص است درصد قطره‌های آب در گزینه ۲ زیاد است و از این رو می‌توان گفت که در محدوده عدد فرود آزمایش شده، زاویه ۵/۷ درجه را نمی‌توان برای هواده حلقوی توصیه کرد. در ادامه برای بررسی اثر تغییر ارتفاع شیب در حالی که زاویه آن ثابت و برابر ۴ درجه است، گزینه‌های ۴ و ۵ به‌ترتیب با افزایش ارتفاع ۱۵ و ۴۳ درصدی ارتفاع شیب نسبت به گزینه ۳ مورد آزمایش قرار گرفت و مشخص شد که طول جت در این گزینه‌ها به‌ترتیب به اندازه ۷٪ و ۲۲٪ درصد نسبت به گزینه ۳ افزایش می‌یابد. از طرف دیگر مشاهده شد که در گزینه‌های چهارم و پنجم در مقایسه با گزینه سوم، با افزایش ارتفاع شیب، بر میزان پاشش نیز افزوده می‌شود (شکل ۸).

نکته جالب این است که همان‌طور که دیده می‌شود، گزینه‌های ۲ و ۴ طول جت یکسانی دارند، اما پاشش در گزینه ۴ از گزینه ۲ کمتر است. در نتیجه می‌توان گفت که کم کردن زاویه شیب تا ۴ درجه و افزایش ارتفاع که به معنای افزایش طول شیب نیز هست، ترکیب مناسبتری برای هواده بوده و ضمن بالا نگاه داشتن طول جت، میزان پاشش را هم افزایش نمی‌دهد. در گزینه ۵ زاویه شیب مشابه گزینه ۴ بود، اما ارتفاع شیب ۲۵٪ باز هم افزایش داده شد تا تأثیر آن بر پاشش بررسی شود. در این گزینه طول جت عبوری از روی هواده ۱۳٪ افزایش یافت اما میزان پاشش در ترازهای بالاتر از ۳۵٪ قطر تونل در محل برخورد جت به کف افزایش نشان داد؛ هر چند در مقطع پایین‌دست‌تر اختلاف زیادی در میزان پاشش دیده نشد (شکل ۸). با توجه به اینکه هنوز معیار مشخصی برای کمترین میزان قابل قبول  $C_d$  مشخص نشده، انتخاب وضعیت مناسب باید با احتیاط انجام شود. در مجموع و با توجه به این موارد می‌توان گفت که دو گزینه آخر یعنی هواده‌های چهارم و پنجم از شرایط بهتری در هواده‌ی

Modelling Hydraulic Structures, H. Kobus, ed., 4(10), pp. 1-10, Technische Akademie, Esslingen.

Kramer K. and Hager W.H. (2005), Air transport in chute flows, International Journal of Multiphase Flow, 31, pp. 1181-1197.

Lamb O.P. and Kilen J.M. (1950), An Electrical Method for Measuring Air Concentration Flowing Air-Water Mixtures, Technical Paper, Project Report No. 2, series B, University of Minnesota, st. Anthony Falls Hydraulic Laboratory.

Ostadirza M.J. (2010), Air Concentration Variation Downstream of Aerators in Horseshoe Tunnels, M.Sc. Thesis, Amirkabir Univ. of Technology, Tehran, Iran (Full Text in Persian and Abstract in English)

Ostadirza M.J., Zarrati A.R. Roshan R. and Safavi Kh. (2011) Application of annular aerators in tunnels, 34<sup>th</sup> IAHR biennial Conference, Brisbane.

Peterka A. J. (1953), The Effect of entrained air on cavitations pitting, Proceedings of Minnesota International Hydraulic Convection, USA.

Pfister M. (2008), Schussrinnenbelüfter: Lufttransport ausgelöst durch interne Abflussstruktur Chute aerators: Air transport due to internal flow structure, Mitteilung, 203, H.-E. Minor, ed., Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH, Zurich (in German).

Pfister M. and Hager W.H. (2010), Chute aerators:

I. Air transport characteristics, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol 136, No.6, pp. 352-359.

Pfister M. and Hager W.H. (2010), Chute Aerators: II. Hydraulic Design, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 136, No. 6, pp. 360-367.

Rutschmann P. (1988), Belüftungseinbauten in Schussrinnen (Chute additions for air entrainment, Mitteilung, 97, D. Vischer, ed., Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH, Zurich (in German).

Skripalle J. (1994), Zwangsbelüftung von Hochgeschwindigkeitsströmungen an zurückspringenden Stufen im Wasserbau ( Forced aeration of high-speed flows at chute aerators), Mitteilung, 124, Technische Universität, Berlin (in German).

## ۶- فهرست علائم

$P$	فشار مرجع مطلق
$P_v$	فشار بخار آب
$V$	سرعت جریان
$L_j$	طول جت پس از هواده
$R_c^{Ae}$	شعاع هواده در مرکز
$R_w^{Ae}$	شعاع هواده در دیواره
$C$	درصد هوای موجود در حجم کنترل
$C_d$	درصد آب موجود در حجم کنترل
$Y$	عمق آب
$D$	قطر تونل
$\rho$	جرم حجمی آب
$\sigma$	شاخص کاونتاسون
$\sigma_c$	شاخص کاونتاسیون بحرانی
$Fr$	عدد فرود جریان قبل از شیب
$Re$	عدد رینولدز جریان
$We$	عدد وبر جریان

## ۷- منابع

Boes R. M. (2000), Scale effects in modeling two-phase stepped spillway flow, Hydraulics of stepped spillways, H. E. Minor and W. H. Hager, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 53-60.

Chanson H. (1996), Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flows, Academic Press.

Chanson H. (2009), Turbulent air-water flows in hydraulic structures: Dynamic similarity and scale effects, Environ. Fluid Mech., 9: pp. 125-142.

Colgate D. (1971), Hydraulic Model Studies of Aeration Devices for Yellowtail Dam Spillway Tunnel, Pick-Sloan Missouri Basin Program, Montana, Bureau of Reclamation Report No. REC-ERC-71-47, 13.

Falvey H.T. (1990), Cavitations in Chutes and Spillways, A Water Resources Technical Publication, Engineering Monograph No. 42.

Kobus H. (1984), Local air entrainment and detrainment, Proc., Symp. on Scale Effects in

Zarrati A.R. (1993), Mechanism of air entrainment in spillway aerators, National Conf. on Hydraulics, ASCE, Sanfrancisco, USA.

Zarrati A.R. and Ostadmirza M.J. (2010), Digital air concentration resistivity probe. IR Patent 66766.

Zhang R. (1991), Cavitation control by aeration and its compressible characteristics, Journal of Technology, SUN DC.

Toombes L. and Chanson H. (2005), Air entrainment and velocity redistribution in a bottom outlet jet flow, 31<sup>st</sup> IAHR congress, September 11~16, Seoul, Korea.

USBR (1997), Water measurement manual, A Water Resources Technical Publication, Third Edition.

Zarrati A.R and Hardwick J.D. (1995), Mathematical modeling of deaeration zone downstream of aerators, Hydra 2000 (vol. 2). Thomas Telford, London.