

## کاربرد پروب الکتریکی یک و دوسوزنی برای اندازه‌گیری در جریانهای مخلوط آب و هوا

محمد رضا جلیلی قاضی زاده

استادیار دانشکده مهندسی آب - دانشگاه صنعتی شهید عباسپور

Email: Jalili@pwit.ac.ir

امیررضا زرانی

دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Email: Zarrati@aut.ac.ir

(تاریخ دریافت ۸۱/۶/۲۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۲/۷/۲۲، تاریخ تصویب ۸۲/۹/۸)

### چکیده

مقاله حاضر به معرفی و بررسی عملکرد پروبهای الکتریکی یک سوزنی و دوسوزنی با قابلیت‌های جدید توسعه‌یافته، برای اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان مخلوط آب و هوا می‌پردازد. پروب الکتریکی یک سوزنی جدید، قابلیت اندازه‌گیری غلظت هوا و شمارش تعداد حبابها را با سرعت نمونه‌گیری بسیار بالا دارا می‌باشد. از دیگر مزایای این پروب، تحلیل و نمایش نتایج، همزمان با برداشت اطلاعات<sup>۱</sup> می‌باشد. به‌منظور کالیبراسیون مدار این پروب الکتریکی بیش از ۳۰ آزمایش در جریان آب و هوا انجام، و مقدار ولتاژ آستانه<sup>۲</sup> مدار تعیین شده است. برای اندازه‌گیری سرعت جریان، پروب دوسوزنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشخصات پروب الکتریکی دوسوزنی مشابه پروب یک‌سوزنی است با این تفاوت که برای امکان اندازه‌گیری سرعت جریان دارای یک سوزن اضافی می‌باشد. به منظور بررسی عملکرد این پروب، نتایج اندازه‌گیری سرعت جریان توسط پروب الکتریکی دوسوزنی با نتایج اندازه‌گیری توسط لوله پیتو مقایسه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر تفاوت در نتایج اندازه‌گیری کمتر از ۴٪ می‌باشد.

**واژه های کلیدی:** جریان آب و هوا، اندازه‌گیری در جریانهای دوفاز، پروب الکتریکی، پروب سوزنی

### مقدمه

جریان دوفاز آب و هوا تبدیل خواهد شد. هوادهی به عنوان یکی از بهترین روشهای عملی مقابله با کاویتاسیون شناخته شده است. نتیجه بررسی محققین نشان داده است که با تامین حدود ۸٪ هوا در داخل جریان آب و در مجاورت بستر، خطرات ناشی از کاویتاسیون کاملاً مرتفع می‌شود. مطالعه بر روی جریانهای آب و هوا با توجه به ماهیت پیچیده آنها معمولاً با بررسی و اندازه‌گیری آزمایشگاهی همراه است. اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی در جریان آب و هوا می‌تواند بمنظور کنترل طرحهای اجرایی، تحقیقات پایه و یا ارزیابی نتایج مدلهای ریاضی انجام گیرد. مشخصات جریان آب و هوا، تابعی از مقدار غلظت هوا و همچنین قطر و تعداد حبابهای موجود در جریان می‌باشد که برای مطالعه جریان، مقادیر این مشخصه‌ها می‌بایست اندازه‌گیری شود. برای انجام آزمایشها در جریان

جریانهای دو فاز مایع-گاز در بسیاری از رشته‌های علوم و مهندسی مورد مطالعه قرار می‌گیرند. بعنوان مثال در مهندسی مکانیک به منظور طراحی مبدلهای حرارتی، نیروگاهها و راکتورهای هسته‌ای، در مهندسی محیط زیست برای تصفیه پسابها و خودپالایی رودخانه ها، در مهندسی شیمی برای ترکیب مواد با یکدیگر و در صنایع نفت و گاز جهت بررسی شرایط جریان در لوله های انتقال، جریانهای دوفاز مایع-گاز مورد مطالعه قرار می‌گیرند. جریانهای دوفاز مایع-گاز مانند جریان مخلوط آب و هوا، در مهندسی عمران نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال برای پیشگیری از خطرات ناشی از کاویتاسیون در سازه‌های هیدرولیکی از روش هوادهی جریان استفاده می‌شود. در این حالت با افزودن هوا به جریان آب، عملاً جریان عبوری به یک

دستگاههای اندازه‌گیری که بر اساس مشخصه‌های الکتریکی کار می‌کنند می‌توان از پروبهای الکتریکی<sup>۳</sup> یا پروبهای خازنی نام برد. در پروبهای الکتریکی (سوزنی) برخورد حبابهای هوا به نوک سوزن پروب و در پروبهای خازنی عبور حبابهای هوا از میان صفحه‌های خازن، باعث تغییر در مقاومت مدار پروب شده و از تفسیر نتایج تغییرات مقاومت مدار، میزان غلظت هوا در جریان آب قابل برآورد خواهد بود. کاربرد پروبهای الکتریکی برای اندازه‌گیری مشخصه‌های جریانهای دوفاز مایع-گاز بسیار گسترده است [۱].

گروه دیگر از وسائل اندازه‌گیری پروبهای نوری می‌باشند. نوک پروبهای نوری که مستقیماً در مسیر جریان قرار می‌گیرند به صورت مخروطی شکل است. نور صانع شده از یک وجهه مخروطی شکل، متناسب با ضریب شکست محیط اطراف نوک پروب، منعکس شده و اشعه نوری بازتاب شده از مسیر وجهه دوم نوک مخروطی شکل، مجدداً به داخل پروب باز می‌گردد. انواع پروبهای نوری بر اساس شکل هندسی نوک آنها تقسیم بندی می‌شوند. پروبهای نوری به صورت گسترده‌ای برای اندازه‌گیری در جریانهای مخلوط آب و هوا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲].

در وسائل اندازه‌گیری که بر اساس انتقال حرارت کار می‌کنند، عبور جریان از مجاورت و برخورد حبابهای هوا به سنسور پروب باعث تغییر در ظرفیت انتقال حرارت شده و تغییرات در سیگنالهای خروجی دستگاه را باعث می‌شود. میزان غلظت هوا در محل سنسور از تفسیر نتایج سیگنالهای خروجی قابل برآورد است. از جمله وسائل اندازه‌گیری در جریانهای آب و هوا که بر اساس انتقال حرارت کار می‌کنند می‌توان فیلم داغ<sup>۴</sup> را نام برد. از مزیت‌های این دستگاه، ارائه اطلاعات اضافی از جمله سرعت جریان و شدت آشفتنگی<sup>۵</sup> سیال، همزمان با اندازه‌گیری غلظت هوا می‌باشد. از مشکلات این روش می‌توان به پیچیده بودن تفسیر نتایج خروجی و حساس بودن نتایج، به کثیف شدن سنسور پروب اشاره کرد. برای اطلاعات بیشتر می‌توان از مراجع [۲] استفاده نمود.

از دیگر سیستمهای اندازه‌گیری می‌توان به روشهای جذب اشعه<sup>۶</sup> اشاره کرد. در وسائل اندازه‌گیری که بر اساس این روش کار می‌کنند معمولاً یک منبع تولید اشعه در یک طرف جریان و دستگاه گیرنده در طرف دیگر قرار

مخلوط آب و هوا به دلیل پیچیدگیهای موجود، به وسائل خاص اندازه‌گیری از جمله وسیله تعیین غلظت هوا، اندازه‌گیری سرعت جریان و توزیع و اندازه حبابهای هوا نیاز می‌باشد. روشها و دستگاههای مختلفی برای اندازه‌گیری غلظت هوا پیشنهاد شده است که در این مقاله به آنها اشاره خواهد شد. در ادامه، مشخصات دستگاه پروب الکتریکی که در تحقیق حاضر توسعه داده شده است معرفی خواهد گردید.

علیرغم مطالعات انجام شده بر روی پروبهای الکتریکی، گزارش و اطلاعات مربوط به کالیبراسیون آنها به منظور تعیین مقدار ولتاژ آستانه مدار بسیار نادر است. در مطالعه حاضر بمنظور بررسی نحوه عملکرد پروب الکتریکی بیش از ۳۰ سری آزمایش (برای سرعت و دبی‌های مختلف آب و هوا) در یک فلوم آزمایشگاهی انجام و مقدار ولتاژ آستانه مدار پروب تعیین شده است. دستگاه طراحی شده دارای قابلیت فرکانس نمونه برداری تا ۲۵۰ کیلو هرتز می‌باشد بصورتیکه مثلاً در هنگام عبور جریان آب و هوا با سرعت ۲۵ متر بر ثانیه می‌تواند از ۱۰ نقطه یک حباب با قطر یک میلی‌متر برداشت اطلاعات کند. همچنین پروب الکتریکی حاضر می‌تواند همزمان با برداشت اطلاعات، تعداد حبابهای عبوری و مقادیر متوسط غلظت هوا را به شکل گراف زمانی بر روی صفحه مونیتر نمایش دهد. در ادامه، دقت و عملکرد پروب الکتریکی دوسوزنی برای اندازه‌گیری سرعت جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

## روشهای اندازه‌گیری در جریانهای مخلوط آب و هوا

برای اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان آب و هوا، روشها و وسائل اندازه‌گیری متعددی موجود است. وسائل اندازه‌گیری مذکور را می‌توان بر اساس اصول کارکرد آنها تقسیم بندی نمود. روشهای اصلی اندازه‌گیری در جریانهای مخلوط آب و هوا عبارتند از روشهای الکتریکی، روشهای نوری، روش اندازه‌گیری بر اساس انتقال حرارت، روشهای جذب اشعه و روشهای الکتروشیمیایی.

اساس کار دستگاههایی که بر اساس روشهای الکتریکی کار می‌کنند اختلاف مقادیر هدایت یا مقاومت الکتریکی دو فاز مایع و گاز می‌باشد (مثلاً برای جریان آب و هوا هدایت الکتریکی آب تقریباً هزار برابر هوا است). از

الکتریکی و پروبهای نوری مطمئن و مناسبتر می باشد. [۶، ۵، ۱]. پروبهای نوری در مقایسه با پروبهای الکتریکی معمولاً گرانقیمت و بسیار شکننده هستند [۷] ضمن اینکه محدوده کارکرد پروبهای الکتریکی بسیار گسترده تر است [۸]. برای اندازه گیری در جریانهای آب و هوا، پروبهای 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 اندازه گیری معرفی شده‌اند. [۹].

### پروب الکتریکی

پروب الکتریکی اولین بار در سال ۱۹۶۳ توسط نیل و بنکوف در مخلوط جیوه و نیتروژن بکار گرفته شد [۱۰]. سپس محققان دیگر از پروب الکتریکی برای مطالعه جریان آب و هوا استفاده کردند [۱۱]. پروب الکتریکی برای اندازه گیری غلظت و سرعت جریان در مخلوط مایع-گاز توسط هرینچ و دیویس در سال ۱۹۷۴ و سپس توسط کین و وود در سال ۱۹۸۱، به منظور اندازه گیری هواگیری سطحی در سرریز سدها توسعه داده شد [۱۲ و ۱۳]. نوعی از این پروب با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و زمان نمونه برداری یک تا ۵ ثانیه توسط شانسون و کامینگر در سال ۱۹۹۶ مورد استفاده قرار گرفت [۱۳]. زراتی و همکاران [۱۴]، پروب الکتریکی با فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز، سندولاه و همکاران [۷]، پروب الکتریکی با فرکانس ۲۵ کیلوهرتز و جلیلی و همکاران [۱۵]، ساخت پروب الکتریکی با فرکانس ۲۵۰ کیلوهرتز را به ترتیب در سالهای ۱۹۹۸، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ میلادی گزارش نموده‌اند. اساس کار پروب الکتریکی بر اختلاف مقادیر هدایت الکتریکی دو فاز مایع و گاز می‌باشد (مثلاً برای جریان آب و هوا، هدایت الکتریکی آب تقریباً هزار برابر هوا است). پروب الکتریکی از دو هادی الکتریسیته که از یکدیگر ایزوله و به فاصله کمی از هم قرار گرفته‌اند تشکیل شده است. شکل (۱) ابعاد و مشخصات پروب سوزنی طراحی شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، سیم نازکی با پوشش عایق از داخل سوزن فولادی پروب عبور داده شده و نوک آن چیده شده است بصورتیکه نوک سیم یک سرمدار و بدنه سوزن فولادی نیز هادی دیگر پروب را تشکیل می‌دهد. با اتصال سیم و بدنه سوزن به دو سر یک باطری، یک مدار الکتریکی تشکیل می‌شود که

می‌گیرد. اشعه صانع شده از منبع، پس از عبور از محیط اندازه‌گیری به تجهیزات گیرنده در طرف دیگر سیال می‌رسد. مشخصات اشعه، حین عبور از مسیر اندازه‌گیری به علت جذب توسط محیط اندازه‌گیری، تغییر کرده و اصطلاحاً رقیق می‌شود. مشخصات اشعه دریافتی در طرف دوم سیال، تحلیل و پردازش شده و بر اساس اطلاعات پردازش شده، غلظت متوسط گاز در طول مسیر اندازه‌گیری، برآورد می‌شود. معمولاً در روش جذب اشعه، پرتوهای گاما، اشعه بتا، اشعه ایکس و یا دیگر اشعه‌های نوترونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مزایای مهم این روش، عدم اغتشاش جریان به علت عدم قرارگرفتن وسایل اندازه‌گیری (مانند پروب) در محیط می‌باشد. از طرف دیگر در این روش، مقدار غلظت متوسط در طول مسیر اندازه‌گیری محاسبه می‌شود و برخلاف روشهای قبلی، نمی‌توان مقدار غلظت را در یک محدوده یا نقطه مورد نظر محاسبه کرد، همچنین تولید بعضی از انواع اشعه‌های مذکور مشکل بوده و ممکن است برای سلامتی مضر باشد. از جمله مراجعی که بر روی این روش اندازه‌گیری مطالعه کرده‌اند می‌توان مرجع [۳] را نام برد.

مبنای کار گروه دیگری از وسایل اندازه‌گیری، بر اساس روش الکتروشیمیایی است. در این روش معمولاً یک جفت الکتروود در محلول الکتروولیت قرار می‌گیرد و با توجه به عمل پخش یونها در محیط، اندازه‌گیری انجام می‌گیرد. هنگامی که اختلاف ولتاژی بین دو الکتروود برقرار شود عمل پولاریزاسیون اتفاق افتاده و این عمل باعث کاهش غلظت یون در سطح الکتروود فعال می‌شود و یک انتقال یون در در محیط سیال به طرف الکتروود کاتد صورت می‌گیرد. جریان برقرار شده در مدار، متناسب با سرعت و غلظت محلول در حد فاصل دو الکتروود می‌باشد. هنگامی که غلظت گاز در جریان حد فاصل دو الکتروود افزایش یابد، افت سیگنال متناسباً افزایش می‌یابد [۲].

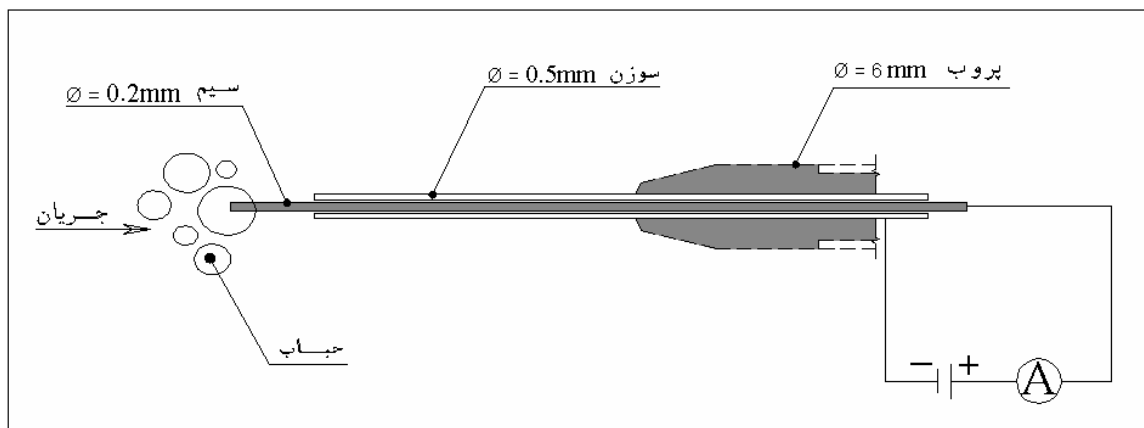
به منظور مقایسه و ارزیابی بین روشها و وسایل مختلف اندازه‌گیری، مطالعاتی صورت گرفته است. هرینچ و دیویس دقت و عملکرد پروب الکتریکی را با روش فیلم داغ مقایسه کرده و نتیجه‌گیری کرده‌اند که پروب الکتریکی بهترین وسیله برای اندازه‌گیری غلظت هوا در جریان مخلوط آب و هوا است [۴]. تعداد دیگری از محققین در مطالعات خود به این نتیجه رسیده‌اند که در بین وسایل مختلف اندازه‌گیری، استفاده از پروبهای

بصورتیکه ذکر شد در اثر عبور حبابهای هوا، ولتاژ مدار بین یک مقدار حداقل (نوک پروب در آب) و حداکثر (نوک پروب در داخل حباب) تغییر می‌کند. در عمل به دلیل وجود کشش سطحی، انحراف یا تقسیم شدن یک حباب به حبابهای کوچکتر در برخورد به سر پروب، تغییرات ولتاژ بین مقادیر حداقل و حداکثر، ناگهانی نبوده و شکل تغییرات ولتاژ مشابه خط چین در شکل (۲) می‌باشد. برای اصلاح شکل سیگنال ورودی و تبدیل آن به موج مربعی<sup>۷</sup>، می‌بایست از یک کلید اشمیت<sup>۸</sup> استفاده شود. از کلید اشمیت برای حذف نوساناتی که در اثر عبور حبابهای هوا از اطراف سوزن پروب، در ولتاژ مدار بوجود می‌آید نیز استفاده می‌شود. به این ترتیب که هر افزایش ولتاژی لزوماً به معنی عبور یک حباب نیست و فقط هنگامی که افزایش ولتاژ از حد مشخص ولتاژ آستانه بیشتر گردد، مدار قطع شده و عبور حباب مخابره می‌شود

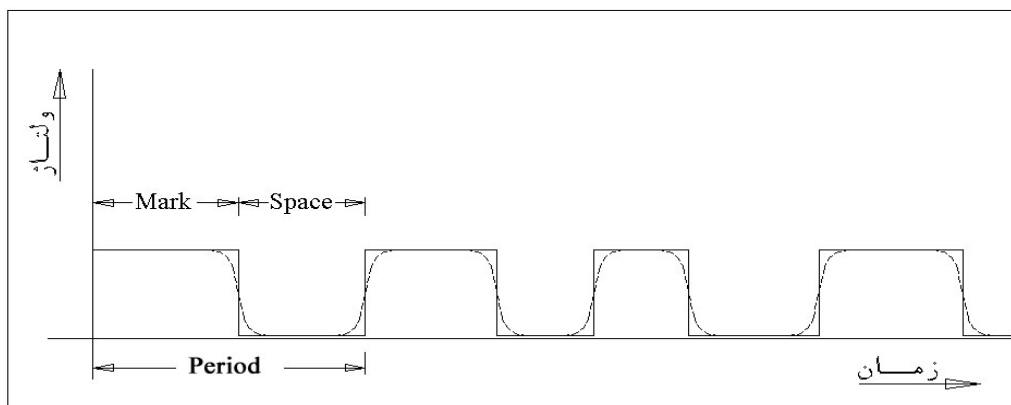
هنگام قرارگیری پروب در آب، مدار بسته شده و جریان سنج موجود در مدار، عبور جریان را نمایش می‌دهد. اگر حبابی به سر پروب برخورد کند سر سیم به داخل حباب هوا فرو رفته و اتصال الکتریکی سر سیم با سوزن قطع و در نتیجه جریان عبوری از مدار صفر خواهد شد. بدین ترتیب با ثبت تغییرات ولتاژ مدار (که متناسب با زمانهای قطع و وصل مدار می‌باشد) می‌توان مقدار غلظت هوا را از رابطه زیر بدست آورد.

$$C = \frac{t_a}{t_t} \quad (1)$$

در این رابطه  $t_a$  مجموع زمانهای قطع مدار (نوک پروب در هوا) و  $t_t$  مدت زمان نمونه‌گیری است. تعداد حبابهای عبوری نیز با ثبت تعداد دفعات قطع و وصل مدار شمرده می‌شود. در صورتیکه سرعت جریان مشخص و زمانهای قطع و وصل مدار در کامپیوتر ذخیره شود می‌توان قطر حبابهای ورودی و توزیع اندازه آنها را نیز مشخص نمود.



شکل ۱: مشخصات پروب الکتریکی.



شکل ۲: سیگنال خروجی از پروب الکتریکی.

می تواند برای جریانهای با سرعت بسیار بالا (مثلاً جریان در پروتوتیپ) مورد استفاده قرار گیرد. در فرکانس حداکثر نمونه برداری مدار (۲۵۰ کیلو هرتز)، در هر ۴ میکروثانیه یک نمونه برداشت شده و با توجه به ظرفیت شمارنده مدار الکترونیکی، زمان نمونه برداری در این فرکانس حدود ۷۲ ثانیه خواهد بود. سرعت نمونه برداری برای اندازه گیری در جریانهای مختلف، قابل تنظیم بوده و برای فرکانسهای تنظیمی کمتر، زمان نمونه برداری متناسباً افزایش می یابد.

مدت زمان کافی برای نمونه برداری، تابعی از توزیع اندازه حبابهای عبوری و همچنین نوسانات مقادیر مشخصه های جریان می باشد. در اندازه گیریهای انجام شده در آزمایشهای حاضر مشاهده شد که مدت زمان ۴۵ ثانیه، زمان کافی برای نمونه برداری بوده و افزایش زمان نمونه برداری تاثیر قابل توجهی در جوابها نمی گذارد. این نتیجه برای آزمایشهای انجام شده بر روی مدل فیزیکی هوا (در محدوده سرعتهای ۳ تا ۶ متر در ثانیه) نیز مورد تایید قرار گرفته است [۱۷]. بر این اساس، و در جهت افزایش دقت، طراحی مدار بصورتی انجام شد که در فرکانس حداکثر، زمان نمونه برداری تا ۷۲ ثانیه قابل تنظیم باشد. به عنوان مثال چنانکه سرعت جریان ۳ متر در ثانیه در نظر گرفته شود و فرض گردد که محیط ثابت و پروب با این سرعت در جهت خلاف حرکت جریان در حال حرکت است، ۴۵ ثانیه نمونه برداری معادل برداشت اطلاعات از یک خط جریان به طول ۱۳۵ متر (۳\*۴۵) در محل نقطه اندازه گیری می باشد.

از دیگر مزیت های پروب الکتریکی جدید، محاسبه و ارائه نتایج اندازه گیری، همزمان با انجام نمونه برداری است. بصورتیکه نتایج شمارش حبابها و منحنی تغییرات زمانی غلظت هوا در حین نمونه برداری بر روی صفحه مونیتر نمایش داده می شود.

یکی از مشکلات پروبهای سوزنی، امکان وجود جریانهای نشتی (مثلاً بعلت نفوذ آب به داخل اتصالات الکتریکی) و یا تماس آب با پوشش ضعیف سیم مسی در داخل پروب می باشد که می تواند دقت نتایج را تحت تاثیر قرار دهد. پروب جدید مجهز به جریان سنجهای حساس<sup>۱۰</sup> بوده که بر روی جعبه کنترل پروب نصب شده است و در صورت وجود هرگونه جریان نشتی، کاربر را سریعاً از وجود مشکل

هریچ و دیویس در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که اگر ولتاژ آستانه مدار بین ۲۰ تا ۷۰ درصد ولتاژ حداکثر باشد در جواب دستگاه تاثیر چندانی نمی گذارد ولی بهترین نتایج در ولتاژ آستانه تنظیمی ۲۸ درصد بدست می آید [۴].

سرعت نمونه برداری در پروب سوزنی می بایست به اندازه کافی زیاد باشد تا موج نمونه برداری شده، موج آنالوگ ارسالی از نوک پروب را بخوبی نشان دهد. برای اینکه بتوان نتایج صحیحی از نمونه برداری یک سیگنال تصادفی بدست آورد، می بایست حداقل از سه نقطه یک موج عبوری، نمونه برداری انجام شود. بعبارت دیگر فرکانس نمونه برداری می بایست حداقل دو برابر فرکانس سیگنال ورودی باشد [۱۶]. بنابر این اگر یک حباب به قطر یک میلی متر در یک جریان با سرعت ۱۰ متر در ثانیه در حرکت باشد، حداقل فرکانس لازم برای نمونه برداری ۲۰ کیلوهرتز خواهد بود. اما بدیهی است برای بدست آوردن نتایج دقیقتر، فرکانس نمونه برداری می بایست متناسباً افزایش یابد زیرا با افزایش سرعت نمونه برداری، موقعیت لبه های موج عبوری در محل تغییر فاز (از آب به هوا و برعکس) با دقت بهتری مشخص می شود. بر این اساس معمولاً پیشنهاد می شود از ۱۰ نقطه یک سیگنال عبوری نمونه برداری انجام شود [۱۶]. افزایش فرکانس نمونه برداری می تواند به شناخت بهتر مکانیزم اندرکنش نوک سوزن و حباب هوا<sup>۹</sup> کمک نماید. در ادامه دو نوع پروب الکتریکی یک سوزنی و دوسوزنی که در تحقیق حاضر توسعه داده شده اند معرفی خواهند شد.

## پروب الکتریکی یک سوزنی

مدار پروب یک سوزنی به صورت یک کارت الکترونیکی در داخل کامپیوتر قرار می گیرد. در این مدار الکترونیکی از ۲ شمارنده ۲۴ بیتی استفاده شده است که به ترتیب زمان قطع بودن مدار (سوزن پروب در هوا) و زمان کل نمونه گیری را اندازه گیری می کنند. همچنین از یک شمارنده ۲۰ بیتی برای شمردن تعداد حبابهای عبوری استفاده می شود.

سرعت نمونه برداری در پروب الکتریکی یک سوزنی حاضر تا ۲۵۰ کیلوهرتز افزایش داده شده است به صورتی که

یک‌سوزنی می‌باشد با این تفاوت که به جای یک سوزن، دو سوزن با فاصله مشخص از یکدیگر در محل سر پروب قرار می‌گیرند (شکل ۳). در ادامه نحوه اندازه‌گیری مشخصات جریان توسط پروب دوسوزنی تشریح خواهد شد.

### اندازه‌گیری سرعت جریان

عبور حبابها از نقطه اندازه‌گیری باعث می‌گردد تا علائمی مشتمل بر تعداد زیادی عدد صفر (سر سوزن در آب) و یا عدد یک (سر سوزن در هوا) توسط مدار پروب ارسال شود. حال اگر یک سوزن دیگر که کاملاً مشابه با سوزن اول است در فاصله کمی پایین‌تر از این سوزن قرار گیرد، علائم فرستاده‌شده از آن باید مشابه سوزن اول، اما با یک تاخیر زمانی باشد. این بدان دلیل است که فرض می‌شود سری حبابهای مشابهی که به سوزن جلو برخورد کرده‌اند با همان ترتیب، پس از زمان کوتاهی به سوزن دوم برخورد خواهند کرد. اگر فاصله دو سر نوک سیم سوزنها را  $\Delta S$  فرض کنیم سرعت حرکت حبابها برابر خواهد بود با:

$$u = \frac{\Delta S}{\tau_0} \quad (2)$$

در عمل، علائم مخابره شده از دو سوزن کاملاً مشابه نخواهند بود اما با برقراری همبستگی<sup>۱۲</sup> بین علائم دریافتی، از نظر آماری می‌توان محتمل‌ترین زمان تأخیر

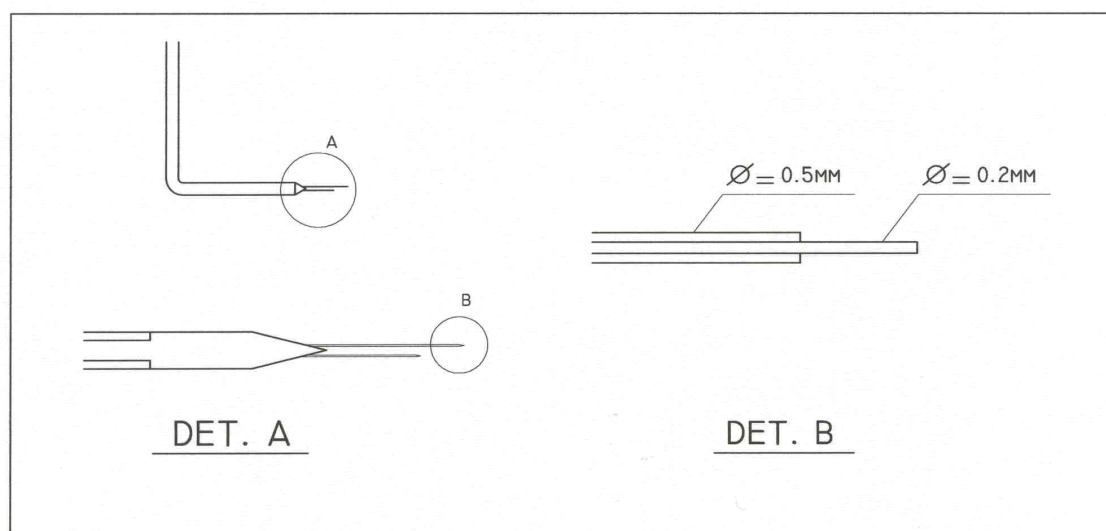
پروپ مطلع می‌سازد. همچنین بر روی جعبه کنترل پروپ، نمایشگر LED<sup>۱۱</sup> نصب شده است که متناسب با مقدار غلظت هوای موجود در محل اندازه‌گیری، شدت نور آن تغییر می‌کند. این تجهیزات به امکان کار مدام با پروپ در آزمایشگاه کمک می‌کنند.

هنگامی که پروپ‌سوزنی با استفاده از جریان مستقیم الکتریکی کار کند امکان رسوب یونها بر نوک سیم پروپ (پولاریزاسیون) در اثر پدیده الکترولیز وجود دارد. وقوع پولاریزاسیون می‌تواند نتایج اندازه‌گیری را تحت‌تاثیر قرار دهد. بر روی پروپ الکتریکی حاضر، آزمایشهای پولاریزاسیون انجام گرفته و مدار بصورتی طراحی شده است که پولاریزاسیون در نوک پروپ اتفاق نیفتد. شرح آزمایشهای انجام شده در مرجع شماره [۱۸] ارائه شده است.

در مدار پروپ یک‌سوزنی حاضر با توجه به افزایش فرکانس نمونه برداری (۲۵۰ کیلوهرتز)، مقدار ولتاژ آستانه توسط انجام آزمایشهای کالیبراسیون تعیین شده است که نتایج آن در بخش مربوطه ارائه خواهد شد.

### پروپ الکتریکی دوسوزنی

پروپ یک‌سوزنی برای اندازه‌گیری غلظت و شمارش تعداد حبابها مورد استفاده قرار می‌گیرد در صورتیکه پروپ دو سوزنی می‌تواند علاوه بر غلظت هوا، سرعت جریان و همچنین قطر حبابهای عبوری را نیز اندازه‌گیری کند. بدنه پروپ دوسوزنی مشابه پروپ



شکل ۳: جزییات پروپ دو سوزنی.

می‌توان جستجو کرد و زمان قطع مدار در دفعات مختلف را محاسبه نمود و بدین ترتیب طیف حبایهای عبوری را تعیین کرد. در این پروب تعداد حبایهای عبوری با ثبات تعداد دفعات قطع یا وصل مدار شمرده می‌شوند.

لازم به توضیح است که چنانچه حبایهای هوا به صورت کروی فرض شوند احتمال آنکه هر قسمتی از حباب به سر سوزن برخورد کند وجود دارد. از نظر آماری رابطه بین قطر متوسط برخورد و قطر حباب کروی به شکل زیر است [۱۰]:

$$\bar{d} = \frac{d_b}{\sqrt{2}} \quad (۴)$$

که در این رابطه  $\bar{d}$  قطر متوسط حباب است که توسط پروب اندازه‌گیری می‌شود و  $d_b$  قطر واقعی حباب می‌باشد. بدین ترتیب چنانچه زمان قطع مدارهای عبور یک حباب  $t$  و سرعت جریان  $u$  باشد قطر حباب از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$d_b = \sqrt{2.t.u} \quad (۵)$$

توسط نرم افزار طراحی شده کار جستجو میان داده‌ها و محاسبه طیف حبایها بر اساس اندازه حبایهای موجود و همچنین شمارش تعداد حبایها انجام می‌گیرد.

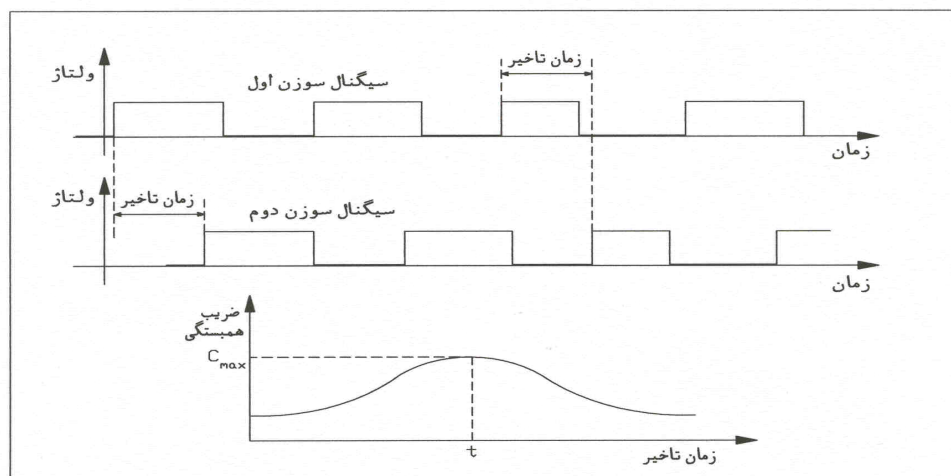
بین علائم را بدست آورد. همبستگی بین علائم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_{xy}(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t x(t-\tau).y(t)dt \quad (۳)$$

در این رابطه  $x(t)$  و  $y(t)$  علائم مخابره شده از ۲ سوزن پروب می‌باشند. حال اگر مقدار ضریب همبستگی را در زمان‌های مختلف تأخیر ( $\tau$ ) محاسبه کرده و منحنی تغییرات آن را با زمان ترسیم کنیم محتمل‌ترین زمان تأخیر بین علائم مربوط به مقدار حداکثر ضریب همبستگی می‌باشد (شکل ۴). برای اندازه‌گیری سرعت جریان، برداشت اطلاعات از هر کدام از سوزنهای پروب الکتریکی دوسوزنی با فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز انجام شده است.

#### شمارش و اندازه‌گیری قطر حبایها

شمارش تعداد حبایها و همچنین تعیین قطر حبایها توسط پروب دوسوزنی قابل انجام است. وقتی که یک حباب هوا به نوک پروب می‌رسد سیم سر پروب داخل حباب فرو رفته و مادامیکه حباب در حال عبور از پروب است مدار قطع می‌باشد. به طوریکه قبلاً ذکر شد با ثبت مدت زمان قطع هر بار مدار و معلوم بودن سرعت جریان، اندازه حبایهای عبوری قابل محاسبه خواهد بود. بدین ترتیب در سلسله اعداد مخابره شده توسط پروب



شکل ۴: امواج خروجی از پروب دو سوزنی.

جریان، دبی هوای عبوری در مقطع مورد نظر از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$Q_{air} = \int_0^h b.c.u.dy \quad (۶)$$

در رابطه فوق،  $c$  غلظت هوای اندازه‌گیری شده توسط پروب سوزنی،  $b$  عرض کانال،  $u$  سرعت جریان،  $h$  عمق جریان و  $Q_{air}$  دبی اندازه‌گیری شده هوا براساس نتایج پروب سوزنی می‌باشد.

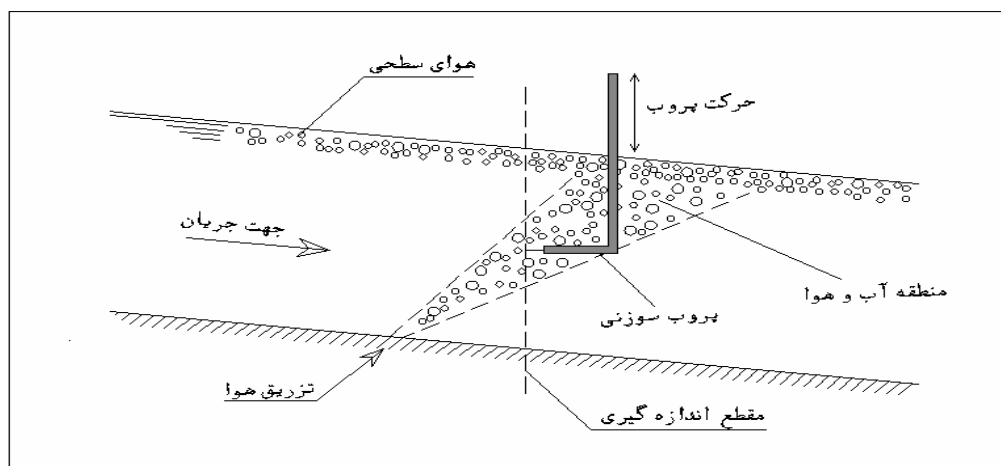
در شکل شماره (۶) نمونه‌ای از توزیع غلظت هوا، اندازه‌گیری شده توسط پروب الکتریکی، در مقاطع پایین دست محل تزریق هوا، به ترتیب در فواصل ۸۰، ۱۶۰ و ۳۴۷ میلی‌متر از محل شیار تزریق هوا نشان داده شده است. مشخصه  $X$  نشان‌دهنده فاصله از محل شیار تزریق هوا می‌باشد. همچنین پروفیل توزیع سرعت که توسط لوله پیتو اندازه‌گیری شده است در این شکل ملاحظه می‌گردد.

از مقایسه دبی هوای محاسبه شده از رابطه (۶) و مقدار دبی هوای ورودی اندازه‌گیری شده توسط روتامتر، می‌توان مقدار خطای پروب سوزنی را در اندازه‌گیری غلظت هوا (با توجه به دیگر خطاهای موجود در آزمایش) تحلیل و ارزیابی نمود. لازم به ذکر است که مقدار متوسط خطای اندازه‌گیری دبی هوا توسط روتامتر در آزمایشهای حاضر حدود ۳٪ برآورد می‌شود.

## کالیبراسیون پروب سوزنی برای تعیین ولتاژ آستانه مدار

برای اطمینان از صحت و عملکرد پروب سوزنی لازم است دقت نتایج آن مورد بررسی قرار گیرد. آزمایشهای کالیبراسیون پروب سوزنی برای تعیین ولتاژ آستانه مدار در یک فلوم آزمایشگاهی به عرض ۲۰ سانتی‌متر انجام شده است. در قسمت میانی فلوم، شیاری در کف ایجاد شده و هوای تولید شده توسط پمپ هوا بعد از عبور از یک روتامتر از طریق این شیار که توسط سنگ متخلخل پر شده است بصورت یکنواخت وارد جریان آب می‌شود. با توجه به مولفه‌های سرعت جریان و سرعت صعود حبابهای هوا، جریان هوای تزریق شده از کف، جریان آب و هوا را در پایین دست شیار هواده، مطابق شکل (۵) تشکیل می‌دهد. دبی هوای ورودی به فلوم توسط دستگاه روتامتر اندازه‌گیری می‌شود. مطابق شکل (۵) در مقطع میانی جریان مخروطی جریان حبابها، مقادیر غلظت هوا از کف کانال تا سطح آب توسط پروب الکتریکی برداشت می‌شود. همچنین در این مقطع، پروفیل سرعت جریان در عمق (در حالت بدون هوا) توسط پیتو اندازه‌گیری می‌گردد. مشخصات آزمایشهای حاضر در جدول شماره (۱) ارائه شده است.

با داشتن اطلاعات اندازه‌گیری شده و با توجه به یکسان بودن سرعت جریان و سرعت حرکت حبابها در جهت

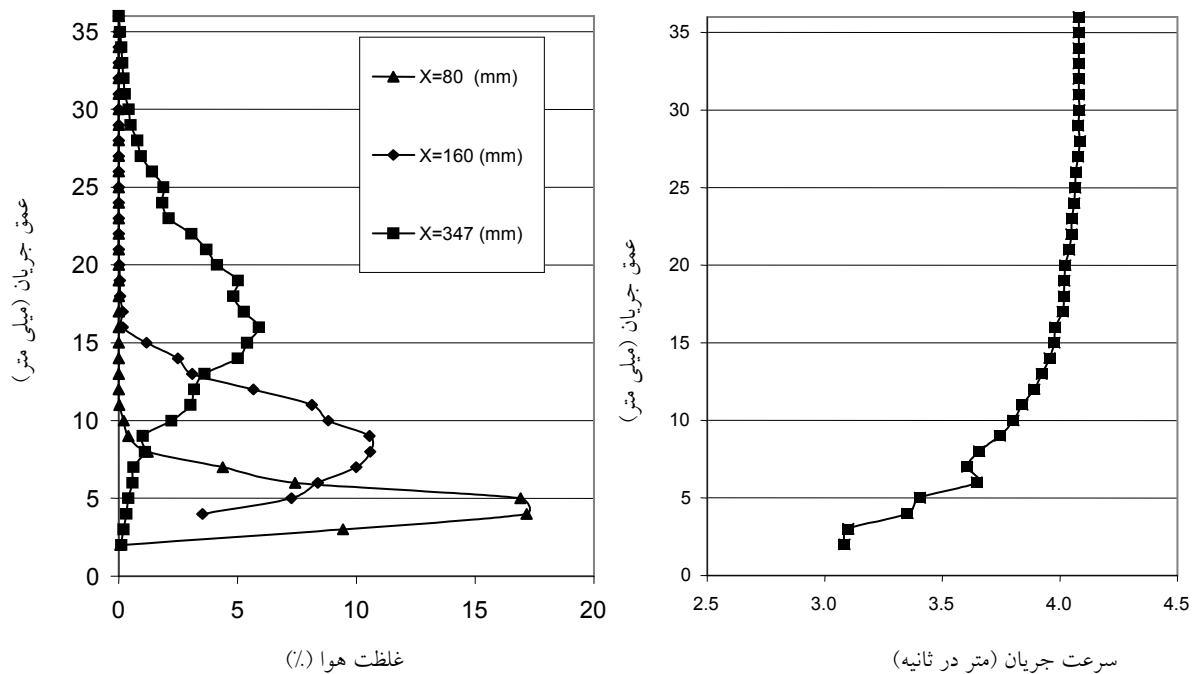


شکل ۵: کالیبراسیون پروب الکتریکی در مخلوط آب و هوا.



جدول ۱: مشخصات آزمایشها.

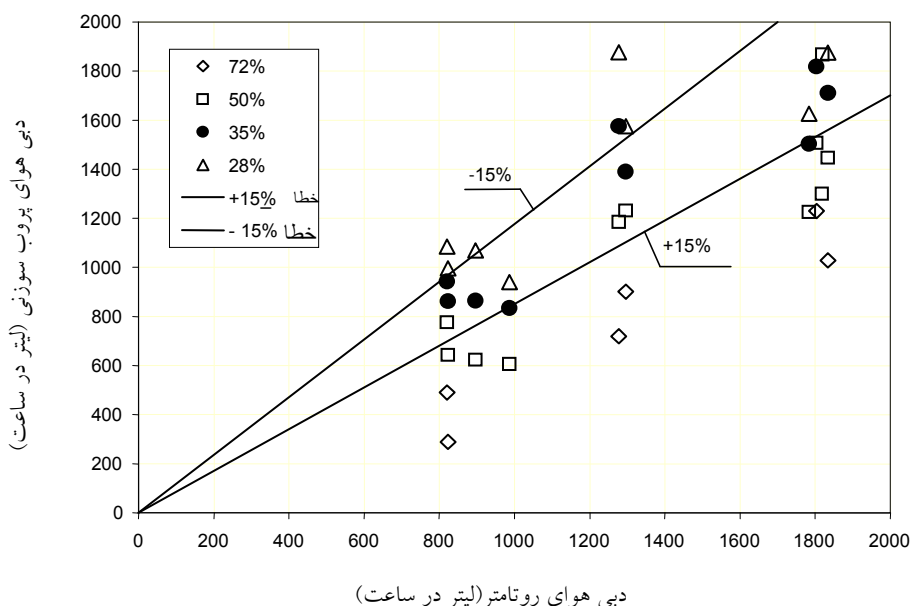
عمق جریان (میلی متر)	محدوده غلظت هوا (%)	سرعت جریان (متر در ثانیه)	دبی هوا (لیتر در ثانیه)
۲۵-۴۵	۰-۱.۱۵	۲-۵	۰.۲-۰.۵



شکل ۶: توزیع سرعت و غلظت هوا در مقاطع مختلف.

در آزمایشهای حاضر با توجه به اینکه ولتاژ حداکثر مدار ۵ ولت بود، در هر نقطه اندازه‌گیری، پتانسیومتر برای ولتاژهای ۱/۴، ۱/۷۵، ۲/۵ و ۳/۶ ولت که به ترتیب معرف مقادیر ۰.۲۸٪، ۰.۳۵٪، ۰.۵۰٪ و ۰.۷۲٪ ولتاژ حداکثر می‌باشند، تنظیم و پس از انجام چهار قرائت برای چهار ولتاژ مذکور، محل سوزن به اندازه یک میلی‌متر در عمق تغییر یافت و برای نقطه جدید، اندازه‌گیریها تکرار شد. بر این اساس پس از تحلیل نتایج، چهار دبی هوای مختلف برای یک مقطع بدست آمد. حد تنظیمی صحیح و مورد نظر مربوط به حالتی است که مقدار دبی هوای محاسبه شده به مقدار دبی هوای اندازه‌گیری شده (توسط روتامتر) نزدیکتر باشد. در شکل (۷) نتایج آزمایشهای کالیبراسیون ارائه شده است. در محور افقی مقادیر دبی هوای اندازه‌گیری شده توسط روتامتر و در محور عمودی مقادیر دبی محاسبه شده که با استفاده از نتایج پروب سوزنی بدست آمده، نشان داده شده است.

بصورتیکه توضیح داده شد جهت اندازه‌گیری مقدار هوای ورودی به جریان، پروفیل غلظت هوا از کف کانال تا سطح آب توسط پروب سوزنی برداشت می‌شود. برای تعیین ولتاژ آستانه مدار، مقادیر غلظت و سپس مقدار هوای موجود در جریان براساس مقادیر مختلف ولتاژهای آستانه، اندازه‌گیری و محاسبه شده و با مقدار دبی هوای ورودی به کانال (که توسط روتامتر اندازه‌گیری شده است) مقایسه می‌گردد. نحوه انجام آزمایشها بدین ترتیب است که پس از اینکه پروب سوزنی در یک نقطه مستقر گردید و غلظت هوا قرائت شد، با استفاده از یک پتانسیومتر دقیق که در داخل جعبه پروب کار گذاشته شده است، ولتاژ آستانه مدار را تغییر داده و مجدداً غلظت هوا (بدون تغییر شرایط جریان) اندازه‌گیری می‌شود. این عمل برای مقادیر مختلف ولتاژهای آستانه مورد نظر تکرار شده و سپس محل سوزن پروب تغییر و اندازه‌گیریها برای نقطه جدید انجام می‌شود. این اندازه‌گیریها برای تمام نقاط اندازه‌گیری، در عمق جریان تکرار می‌گردد.



شکل ۷: مقایسه دبی هوای اندازه گیری شده توسط پروب الکتریکی و روتامتر.

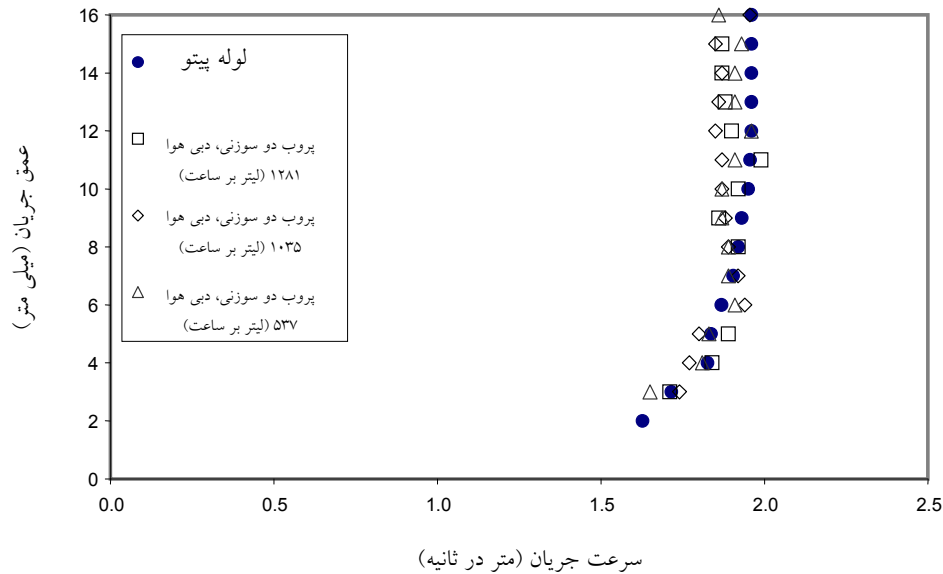
مقدار ولتاژ آستانه، در شرایط و محدوده متغیرهای آزمایشهای حاضر بوده است (جدول ۱). برای تعیین مقدار ولتاژ آستانه مدار در شرایط دیگر، آزمایشهای بیشتری مورد نیاز می باشد.

لازم به توضیح است که علاوه بر آزمایشهای کالیبراسیون مذکور، عملکرد مدار پروب الکتریکی یک سوزنی به روش الکترونیکی نیز مورد آزمایش قرار گرفته است که نتایج آن در مراجع [۱۵ و ۱۸] ارائه شده است.

### بررسی عملکرد پروب دوسوزنی در اندازه گیری سرعت جریان

برای بررسی عملکرد پروب دوسوزنی، نتایج اندازه گیری سرعت جریان توسط پروب الکتریکی با نتایج اندازه گیری سرعت توسط لوله پیتو مقایسه گردید. بدین منظور در فلوم جریان آب و هوا (شکل ۵) با قراردادن پروب الکتریکی و لوله پیتو در یک مقطع ثابت، نتایج اندازه گیری برای مقادیر مختلف نسبت هوا به آب ثبت و با یکدیگر مقایسه گردید. باید توجه داشت که در زمان اندازه گیری توسط لوله پیتو جریان هوا قطع می باشد. نمونه ای از نتایج اندازه گیری سرعت توسط پروب دوسوزنی و لوله پیتو در شکل (۸) نشان داده شده است. بصورتیکه مقایسه نتایج نشان می دهد پروب الکتریکی دوسوزنی توانسته است با دقت خوبی، سرعت

بصورتیکه مشاهده می شود با کاهش ولتاژ آستانه، مقدار هوای اندازه گیری شده توسط پروب سوزنی افزایش می یابد. چنانچه مطابق شکل، محدوده اختلاف  $\pm 15\%$ ، با نتایج روتامتر مشخص شود مشاهده می گردد که اکثر نقاط آزمایش مربوط به مقدار ولتاژ آستانه  $35\%$  در داخل محدوده اختلاف کمتر از  $15\%$  قرار می گیرند. بدین ترتیب بر اساس نتایج آزمایشهای انجام شده، بهترین مقدار برای ولتاژ آستانه مدار، مقدار  $35\%$  ولتاژ حداکثر مدار معرفی می شود. براین اساس، پروب سوزنی، تغییرات ولتاژ در حد کمتر از  $35\%$  درصد را بعنوان پارازیت (عبور حبابها از اطراف سوزن و...) تلقی کرده و چنانچه ولتاژ دستگاه بیشتر از  $35\%$  مقدار حداکثر تغییر نماید، تغییر فاز از مایع (آب) به گاز (هوا) را گزارش می کند. باید توجه داشت که عوامل دیگری مثل نوسانهای سرعت جریان و موقعیت سطح آب، خطای اندازه گیری پیتو و روتامتر و همچنین خطای تنظیم محل سوزن پروب نیز در اختلاف بدست آمده بین دبی هوای اندازه گیری شده توسط پروب و روتامتر تاثیر می گذارند. بصورتیکه در شکل (۷) مشاهده می شود در ولتاژ آستانه  $35\%$  نتایج در حدود  $\pm 15\%$  در نوسان می باشند. با توجه به عملکرد خوب پروب الکتریکی در تست الکترونیکی می توان گفت که مقدار قابل توجه ای از خطاهای موجود به دلیل نوسانات مشخصه های جریان و نه به علت خطاهای پروب می باشد. لازم به ذکر است که نتیجه به دست آمده برای



شکل ۸: مقایسه سرعت جریان اندازه‌گیری شده توسط پروب الکتریکی و لوله پیتو.

غلظت هوا را به شکل گراف زمانی بر روی صفحه مونیاتور نمایش دهد.

- مدار پروب الکتریکی جدید به صورتی طراحی شد که مشکل پولاریزاسیون که در مطالعات قبلی گزارش شده بود مرتفع گردید.

- با انجام آزمایشهای کالیبراسیون مقدار ولتاژ آستانه مدار پروب الکتریکی برای محدوده مشخصات جریان آب و هوا در آزمایشهای حاضر برابر ۳۵٪ ولتاژ حداکثر تعیین شد.

\_ عملکرد و دقت پروب دوسوزنی در اندازه‌گیری سرعت جریان مورد بررسی قرار گرفت. حداکثر تفاوت نتایج پروب الکتریکی با نتایج لوله پیتو در آزمایشهای مختلف ۴ درصد بدست آمد.

### قدردانی

در اینجا لازم است از مرکز تحقیقات آب (وابسته به وزارت نیرو) بخاطر در اختیار گذاشتن فضا و تجهیزات آزمایشگاهی و مساعدت برای انجام این پروژه تشکر و قدردانی شود. همچنین از آقای مهندس امیر رحبی بخاطر ساخت مدار الکترونیکی و تجهیزات پروب الکتریکی سپاسگزاری می‌گردد.

جریان را اندازه‌گیری کند. لازم به ذکر است که برای شرایط مختلف جریان (مقادیر مختلف دبی آب و هوا) و در فواصل متفاوت از محل تزریق هوا (X) عملکرد پروب الکتریکی در اندازه‌گیری سرعت جریان مورد بررسی قرار گرفت. مقدار حداکثر متوسط تفاوت بین نتایج پروب و نتایج لوله پیتو کمتر از ۴ درصد بود که نشاندهنده عملکرد خوب پروب الکتریکی در اندازه‌گیری سرعت در جریان مخلوط آب و هوا می‌باشد. لازم به توضیح است که پروب الکتریکی و همچنین دستگاه پیتو به علت ضخامت بدنه قادر به اندازه‌گیری در فواصل بسیار نزدیک به کف نیستند. به صورتیکه در شکل (۸) مشاهده می‌شود حداکثر تفاوت نتایج در نزدیکی سطح آب بوجود آمده است. علت این تفاوت را می‌توان به وجود نوسانات سطح آزاد آب و تاثیر آن بر نتایج نسبت داد.

### نتیجه‌گیری

- یک پروب الکتریکی با قابلیت‌های جدید از جمله افزایش ظرفیت نمونه برداری تا ۲۵۰ کیلوهرتز و نمایش نتایج همزمان با انجام نمونه برداری توسعه داده شد.

- پروب الکتریکی حاضر می‌تواند همزمان با برداشت اطلاعات، نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده را به صورت همزمان تحلیل و تعداد حبابهای عبوری و مقادیر متوسط

### مراجع

- 1 - Chanson, H. (2002). "Air-Water Flow Measurement with Intrusive, Phase-Detection Probes: Can We Improve Their Interpretation." *J. Hyd. Engrg. ASCE*, Vol. 128, No. 3, PP. 252-255.

- 2 - Cartellier, A., and Achard, J. L., (1991). "Local phase detection probe in fluid two-phase flows." *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 62, No 2. PP. 279-303.
- 3 - Teyssedout, A., Aube, F. and Champagne, P., (1991). "Void fraction measurement system for high temperature flows." *Measurement Science & Technology*, Vol. 2, PP. 69-74.
- 4 - Herringe, R. A. and Davis, M. R. (1974). "Detection of instantaneous phase change in gas-liquid mixtures." *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 7, PP. 807- 812.
- 5 - Jones, O. C. and Delhaye, J. M. (1976). "Transient and statistical measurement techniques for two-phase flows: a critical review." *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 3, PP. 89-116.
- 6 - Bachalo, W. D. (1994). "Experimental methods in multiphase flows." *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 20, Suppl., PP. 261-295.
- 7 - Sandullah, K., Zaidi, S. H. and Hills, J. H. (2001). "A study of bubbly flow using resistivity probes in a novel configuration". *J. Chem. Engng.*, PP. 83. 45-53.
- 8 - Chanson, H. (1997). *Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flows*. Academic Press, London, UK.
- 9 - de Moura, L. F. and Marvilet, C. (1997). "Local measurement in two-phase flows using a resistivity double probe technique." *J. Braz. Soc. Mechanical Sciences*, Vol. 19, Issue 4, PP. 458-473.
- 10 - Neal, A. and Benkoff, S. A. "A high resolution resistivity probe for determination of local void properties in gas-liquid flow." *J. of A.I. Ch. E.*, PP. 490-494, (1963)
- 11 - Nassos, G. P. and Bankoff, S. G., (1967). "Local Sensitivity Probe for Study Point Properties of Gas-Liquid Flows", *Can. J. Chem. Engng.* Vol. 45, pp. 271-274.
- 12 - Cain, P. and Wood, I. R. (1981). "Measurements of self-aerated flow on spillways." *J. of Hyd. Div., ASCE*, Vol. 107, HY11, PP. 1425-1444.
- 13 - Chanson, H. and Cummings, P. D. (1996). *Air-water interface area in supercritical flows down small-slope chutes*. Research Report No. CE 151, Department of Civil Engineering, University of Queensland, Australia. Feb., 67 PP.
- 14 - Zarrati, A. R., Shahverdi. M. R. and Samavati. A. (1998). "Development of a needle probe for measurement in air-water flow." *Int. Conf. on Water Res. Eng. ASCE*, USA.
- 15 - Jalili, M. R., Zarrati, A. R. and Radjabi, A. (2002). "Development of a one-needle resistivity probe for measurement of local void fraction and bubble count in air water mixture." *International Conference on Hydraulic Measurements and Experimental Methods. ASCE, IAHR, Colorado, USA.*
- 16 - Oppenheim, A. V., Willsky, A. S. and Navab, S. H. (1997). *Signals and system* Prentice Hall. Second Edition.

۱۷ - زراتی، ا. ر. و جلیلی، م. ر. "مطالعه بر روی مکانیزم هواگیری و هوازدایی در اثر هواده بر روی تندآب سرریزها به کمک مدل فیزیکی." گزارش نهایی پروژه مصوب سازمان مدیریت منابع آب، معاونت پژوهشی، طرح تحقیقات کاربردی، وزارت نیرو (۱۳۸۳).

۱۸ - جلیلی قاضی‌زاده، م. ر. "بررسی آزمایشگاهی و ارائه یک مدل ریاضی برای تحلیل جریان آب و هوا بر روی تندآب سرریزها." پایان‌نامه دکترا، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۸۲).

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- |                         |                           |                                      |
|-------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| 1 – On Line             | 2 – Treshold Level        | 3 – Resistivity (impedance) Probes   |
| 4 – Hot Film            | 5 – Turbulence Intensity  | 6 – Radiation Attenuation Techniques |
| 7 – Square Wave         | 8 – Schmidt Trigger       | 9 – Piercing Mechanism               |
| 10 – Micro Ampere Meter | 11 – Light Emitting Diode | 12 - Correlation                     |