

# طراحی یک پروب سوزنی برای اندازه گیری مشخصه های جریان های گاز - مایع

امیررضا زراتی  
استادیار  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

محمودرضا شاهرودی  
مریی  
واحد تفرش، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

آرش سمواتی  
دانشجوی کارشناسی ارشد  
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

## چکیده

در این مقاله طراحی یک پروب سوزنی برای اندازه گیری مشخصه های جریان در جریان های گاز - مایع که مایع آن دارای هدایت الکتریکی به مراتب بیشتر از قسمت گاز است، تشریح شده است. طراحی و کالیبراسیون دو نوع از این پروب برای جریان آب و هوا با سرعت زیاد انجام گردیده است. نوع اول یک پروب تک سوزنی است که غلظت هوا را اندازه می گیرد و نوع دوم، پروب دو سوزنی است که علاوه بر غلظت هوا، سرعت جباب ها و طیف آنها را نیز به دست می آورد. پروب ساخته شده نسبت به پروب های مشابه قبلی دارای سرعت برداشت اطلاعات بیشتر تا 100 KHz و زمان نامحدود نمونه برداری است. آزمایش های کالیبراسیون نشان دادند که پروب سوزنی از دقت خوبی برخوردار می باشد.

## *Design of a Needle Probe for Measurement of Local Parameters in Gas-Liquid Flows*

A.R. Zarrati  
Assistant Professor  
Dept. of Civil Engineering , Amir kabir  
University of Technology

M.R. Shaverdi  
Member of Academic Staff  
Amir kabir University of Technology  
(Tafresh Campus)

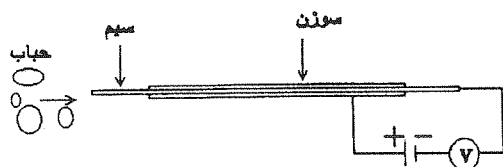
A.Samavati  
Graduate Student  
Department of Electrical Engineering ,  
Amirkabir University of Technology

## Abstract

*In this paper, design of a needle probe for measurement of local parameters in gas-liquid flows, where electrical conductivity of local liquid phase is much higher than the gas is explained. Two types of this probe was designed and calibrated for high velocity air-water flows. The first is a one-needle probe for measuring air condensation. The second type which is a double needle probe can measure bubble velocity and spectrum as well as air concentration. Comparing with similar probes, the probes designed here have the advantage of higher sampling frequency (up to 100 KHz) and unlimited time of data collection. Calibration tests showed that the accuracy of the needle probe is good.*

این پروب براساس اختلاف در هدایت الکتریکی بین مایع و گاز کار می‌کند. مثلاً در مورد آب و هوا، هدایت الکتریکی آب هزار بار از هوا بیشتر است. این پروب از دو هادی الکتریسیته تشکیل شده است که از هم ایزوله شده و به فاصله کمی از هم قرار گرفته‌اند. شکل‌های مختلفی برای ساخت این پروب پیشنهاد شده که در اینجا از یک سوزن فولادی که از داخل آن سیم نازکی عبور داده شده استفاده شده است (شکل ۱). سیم دارای پوشش عایق بوده و بنابراین از سوزن کاملاً ایزوله می‌باشد. سیم از سر سوزن کمی بیرون آمده و نوک سیم چیده شده است. به این ترتیب نوک سیم حکم یک سر مدار را دارد و سوزن نیز یک هادی دیگر پروب محسوب می‌شود. اگر سیم و سوزن به دو سر یک پیل الکتریکی وصل شده و ولت متری در مدار قرار گیرد، وقتی پروب مثلاً در آب گذاشته شود از آنجا که آب هادی الکتریسیته است، ارتباط را بین سیم و سوزن برقرار نموده عقربه ولت متر حرکت می‌کند و ولتاژی را نشان می‌دهد. اگر حبابی به سر سیم برخورد کند، سر سیم داخل حباب فرورفته اتصال الکتریکی آن با سوزن قطع می‌شود (زیرا هدایت الکتریکی هوا به مراتب کمتر از آب است). در نتیجه مدار قطع شده و ولت متر صفر را نشان می‌دهد. بلافاصله پس از عبور حباب، مدار دوباره وصل می‌شود. به این ترتیب برخورد حباب‌های موجود در جریان به سر پروب باعث قطع و وصل مدار و تغییرات ولتاژ بین صفر و یک مقدار مشخص می‌شود. اگر بتوان این تغییرات را ثبت کرد، می‌توان از تفسیر آنها به تغییر قسمت مایع به گاز و بالعکس در نقطه مورد نظر پی برد.

اصول کار و طراحی این پروب سوزنی برای مخلوط آب و هوا در شرایط خاص در این مقاله تشریح شده است. بدیهی است می‌توان مطالب گفته شده را در شرایط دیگر (با هندسه متفاوت و حتی در پرتوتیپ) و در مورد مخلوط‌های دیگری از جریان‌های گاز - مایع به شرطی که قسمت مایع دارای هدایت الکتریکی به مراتب بیشتر از قسمت گاز باشد، مورد استفاده قرار داد.



شکل (۱) طرز کار پروب سوزنی

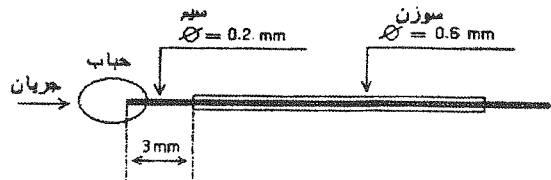
مطالعه بر روی مخلوط‌های گاز - مایع در رشته‌های مختلف مهندسی از جمله مهندسی عمران، مکانیک و شیمی انجام می‌گیرد. به طور مثال می‌توان مطالعه بر روی جت‌های پرتابی از روی هواده‌ها و یا باکت سرریزها در مهندسی عمران (شاخه هیدرولیک) را نام برد. جت پرتابی مقدار زیادی هوا از اطراف خود گرفته و پس از هواگیری یک جریان مخلوط آب و هوا محسوب می‌شود. به علت ماهیت پیچیده اینگونه جریان‌ها، مطالعه روی آنها اغلب با انجام آزمایش توأم است. انجام این آزمایش‌ها هم به منظور کنترل طرح‌های اجرایی و هم برای تحقیقات پایه به منظور بررسی رفتار جریان لازم می‌باشد. انجام آزمایش در جریان‌های گاز - مایع مثل آب و هوا و اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان مثل سرعت و یا درصد گاز موجود در هر نقطه (غلظت) نیاز به وسایل مخصوص به خود دارد و وسایل معمول در اندازه‌گیری سرعت مثل لوله پیتو و یا میکرومولینه را نمی‌توان در مخلوط‌های گاز - مایع با غلظت زیاد گاز به کار برد. روش‌های پیشرفته‌تر نیز مثل لیزرداپلر (Laser Doppler) و فیلم داغ (Hot Film) در عمل دارای محدودیت بوده و به تجهیزات پیچیده نیاز داشته و از دقت کافی نیز برخوردار نیستند.

استفاده از پروب سوزنی برای اندازه‌گیری در جریان‌های دو فاز بسیار موفقیت‌آمیز بوده است [۳، ۴، ۵]. این پروب در عین سادگی دارای دقت کافی نیز می‌باشد. اولین بار نیل و بنکوف (Neal and Benkoff) [۶] این پروب را در مخلوط جیوه و حباب‌های نیتروژن به کار بردند و محققان دیگری از این پروب برای مطالعه مخلوط بخار و آب [۷] و آب و هوا [۴، ۵، ۸، ۹] استفاده کرده‌اند. برای اطلاعات بیشتر از تاریخچه این پروب به مرجع ۱ مراجعه کنید.

باتوجه به کاربرد مهم این پروب در مطالعه مخلوط‌های گاز - مایع در رشته‌های مختلف مهندسی و به خصوص در مهندسی عمران (هیدرولیک) برای مطالعه مخلوط آب و هوا در سازه‌های هیدرولیکی، این پروب توسعه داده شده و به نحوی طراحی گردید که عملکرد آن بهبود یافته، محدودیت‌های استفاده از آن برطرف شده و دقت آن نیز بالاتر رود. طرز کار و طراحی این پروب سوزنی توسعه یافته در این مقاله آمده است.

### ۳- طراحی بدنه پروب سوزنی

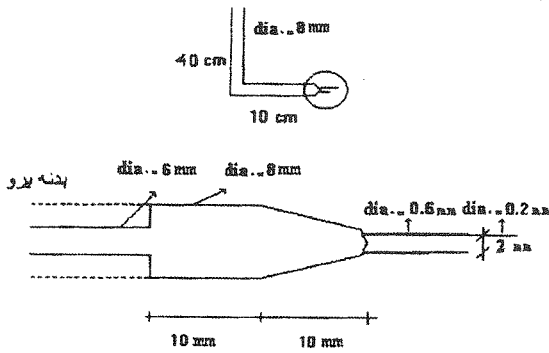
ابعاد پروب سوزنی بستگی به سرعت جریان مورد بررسی، اندازه حباب های داخل جریان و سیستم برداشت اطلاعات دارد. پروب موردنظر در مطالعات حاضر بیشتر به منظور آزمایش و تحقیق روی مدل سرریزهای سد، جت ها و حوضچه های آرامش طراحی شده است. سرعت جریان در این موارد حداکثر  $10 \text{ m/s}$  می باشد. از نظر ابعاد حباب های موجود، از آنجا که حجم هوای داخل حباب ها با توان سوم قطر آنها کم می شود، حباب های خیلی کوچک هوای کمی حمل کرده و اهمیت چندانی ندارند. در اینجا فرض شده است که پروب باید بتواند حباب های بزرگتر از یک میلیمتر را که به آن برخورد می کنند، تشخیص دهد. از طرفی فرض شده است برای اینکه سیم نوک پروب به داخل حبابی نفوذ کند باید حداقل دارای قطری برابر یک پنجم قطر حباب باشد. باتوجه به مطالب بالا سیم مسی پوشش دار لاکه به قطر  $0.2/2$  میلیمتر برای ساخت پروب مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲).



شکل (۲) ابعاد پروب سوزنی

سوزن دستگاه باید آنقدر نازک باشد تا جریان را منحرف نکند. در عین حال بتوان سیم را از داخل آن عبور داد. بدین منظور سوزنی با قطر  $0.6/2$  میلیمتر که دارای طولی مناسب بود، برای این کار انتخاب شد. سیم لاکه به اندازه ۳ تا ۵ میلیمتر از داخل سوزن بیرون گذاشته شد (شکل ۲). این فاصله به اندازه ای کم بود که استحکام سیم برقرار باشد و به اندازه ای نیز زیاد بود تا سوزن اختلالی در مسیر حباب های کوچک ایجاد نکند. حباب های کوچکتر از ۳ میلیمتر، قبل از رسیدن به سوزن از محل نوک سیم کاملاً عبور می کردند و حباب های بزرگتر از ۳ میلیمتر دارای قطری بیشتر از ۵ برابر قطر سوزن بودند و طبق فرض قبلی سوزن نیز می توانست به داخل آنها نفوذ کند. در نهایت سوزن به بدنه اصلی پروب متصل شد که از جنس برنج و کاملاً آئرودینامیک بود (شکل ۳ و عکس ۱). باید توجه داشت پس از مدتی استفاده از پروب لازم است

سر آن (نوک سیم) تمیز شود. محل اتصال سیم به سوزن و سوزن به بدنه اصلی پروب نیز باید با چسب مناسب کاملاً آب بندی شود تا آب به داخل بدنه پروب نفوذ نکند.



شکل (۳) ساختمان پروب دو سوزنه

### ۴- پروب تک سوزنی برای اندازه گیری غلظت هوا

دو نوع پروب در این مطالعات طراحی و ساخته شده است. یک پروب تک سوزنی برای اندازه گیری غلظت هوا که در این بخش توضیح داده می شود و یک پروب دو سوزنی که علاوه بر غلظت هوا، سرعت و طیف حباب ها را نیز اندازه می گیرد که در بخش بعدی به توضیح آن خواهیم پرداخت.

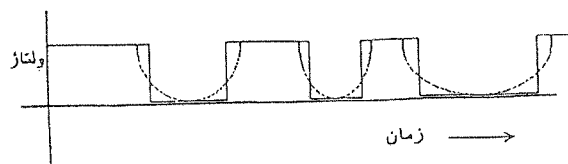
#### ۴-۱- اندازه گیری غلظت هوا

اگر حجم کوچکی از مخلوط آب و هوا را در نظر بگیریم، غلظت هوا به صورت حجم هوا به حجم مخلوط آب و هوا تعریف می گردد. از آنجا که در زمان اندازه گیری از هنگامی که یک حباب به سر سیم برخورد می کند تا زمانی که حباب عبور کند مدار قطع می شود، نسبت کل زمانی که مدار قطع می باشد به زمان اندازه گیری نشان دهنده نسبت هوای موجود در آن نقطه و یا به عبارتی غلظت هوا می باشد [۴، ۱۰]. مدار پروب سوزنی با ثبت کل زمان قطع مدار و باتوجه به زمان نمونه برداری، غلظت هوا را در نقطه مورد نظر حساب کرده به کامپیوتر می فرستد.

#### ۴-۲- مدار الکتریکی پروب سوزنی و سیستم برداشت اطلاعات

همچنان که ذکر شد در اثر عبور حباب های هوا ولتاژ مدار بین یک مقدار حداکثر (پروپ در آب) و صفر (پروپ در داخل حباب) تغییر می کند. در عمل به دلیل وجود کشش سطحی و انحراف و یا تقسیم شدن یک حباب به

حباب‌های کوچکتر در برخورد به سر پروب تغییرات ولتاژ بین صفر و یک مقدار حداکثر ناگهانی نبوده و شکل تغییرات ولتاژ مشابه خط چین در شکل ۴ می‌باشد. برای بازگرداندن شکل تغییرات ولتاژ به یک موج مربعی (square wave) می‌بایست از یک کلید اشتمیت (Schmidt trigger) استفاده شود. کلید اشتمیت موج گرفته شده از پروب را کنترل می‌کند و هرگاه مقدار ولتاژ از یک مقدار از پیش تنظیم شده کمتر شد، مدار را قطع کرده و ولتاژ را صفر می‌نماید که این نشانگر عبور یک حباب است و در غیر این صورت حداکثر ولتاژ در مدار برقرار خواهد بود.



شکل (۴) تغییر ولتاژ مغایره شده از پروب در مخلوط آب و هوا

در اثر عبور حباب‌ها از اطراف دستگاه نیز نوسانات در ولتاژ مدار بوجود می‌آید. برای حذف این نوسانات نیز از ولتاژ تنظیمی کلید اشتمیت استفاده می‌شود. به این ترتیب که هر افت ولتاژی به معنی عبور یک حباب نیست و فقط اگر افت ولتاژ از حد مشخصی (ولتاژ تنظیمی) بیشتر شود، مدار قطع شده عبور یک حباب مغایره می‌شود. هرینج و دیویس (Herringe and Davis) [۳] در شرایط مشابه با شرایط مطالعات حاضر به این نتیجه رسیدند که اگر ولتاژ تنظیمی دستگاه بین ۲۰ تا ۷۰ درصد ولتاژ حداکثر باشد، در جواب دستگاه تأثیر چندانی نمی‌گذارد. ولی بهترین جواب در ولتاژ تنظیمی ۲۸ درصد ولتاژ حداکثر به دست می‌آید. براساس این یافته یک کلید اشتمیت در مدار الکتریکی با ولتاژ ۲۸ درصد ولتاژ حداکثر طراحی گردید.

موج آنالوگ فرستاده شده از طرف پروب برای پردازش وارد مدار الکتریکی می‌شود. این مدار الکتریکی به نحوی طراحی شده است که به کمک یک زمان سنج (Timer) کل زمان قطع مدار و همچنین زمان نمونه برداری را ثبت می‌کند [۱]. از آنجا که موج فرستاده شده به مدار الکتریکی برای پردازش به صورت عدد در می‌آید (Digitize) در اینجا دو سؤال مطرح می‌باشد:

الف - چه فرکانسی برای برداشت اطلاعات مناسب است؟

ب - زمان نمونه برداری چقدر باشد؟  
در مطالعات حاضر حداکثر سرعت جریان  $10 \text{ m/s}$  و کوچکترین اندازه حباب ۱ میلیمتر فرض شده است. در نتیجه اگر کوچکترین حباب با حداکثر سرعت به سر پروب برخورد کند، موجی به طول  $1/10$  میلی ثانیه بوجود می‌آورد. برای تشخیص چنین موجی لازم است حداقل سه نقطه از آن برداشت شود و این به معنی فرکانس حداقل  $20 \text{ KHz}$  می‌باشد. برای به دست آوردن جواب قابل اطمینان لازم است زمان نمونه برداری نیز به اندازه کافی طولانی باشد. یکی از مشکلات عمده‌ای که محققان در کارکرد با این پروب داشته‌اند، نخیره حجم زیادی از اطلاعات در هر نمونه برداری و محدودیت حافظه کامپیوتر (RAM) بوده، که باعث اعمال محدودیت روی زمان برداشت اطلاعات و فرکانس نمونه برداری بوده است. در طراحی مدار پروب در مطالعات حاضر یک پردازشگر در مدار الکتریکی این اشکال را برطرف می‌نمود. پردازشگر مدار همزمان با برداشت اطلاعات کل زمان قطع مدار و نمونه برداری را ثبت کرده، نسبت این دو را که همان غلظت هوا در نقطه مورد آزمایش بود محاسبه و به کامپیوتر می‌فرستاد. این نحوه عمل هرگونه محدودیت در زمان نمونه برداری و فرکانس را برطرف می‌نمود [۱]. پردازشگر مدار الکتریکی به نحوی برنامه‌ریزی شد که با فرکانس  $100 \text{ KHz}$  در زمانی که استفاده کننده مشخص نماید، نمونه برداری کند. بدین ترتیب این دستگاه از دقتی به مراتب بیشتر از پروب‌های مشابه برخوردار می‌باشد.

از طرفی با استفاده از مدار موجود جواب‌ها بلافاصله پس از نمونه برداری (on line) روی صفحه کامپیوتر ظاهر می‌شود، در صورتی که در پروب‌های قبلی ساخته شده، اطلاعات نخیره شده روی کامپیوتر پس از نمونه برداری پردازش شده و سپس جواب به دست می‌آمد.

## ۵- پروب دو سوزنی

این پروب علاوه بر اندازه‌گیری غلظت قادر است با پردازش اطلاعات برداشت شده، سرعت حباب‌ها و اندازه آنها را نیز به دست آورد. نحوه کار این پروب به شرح زیر است:

### ۱-۵- نحوه اندازه‌گیری سرعت

حباب‌های عبوری از نقطه اندازه‌گیری باعث

۵). برای محاسبه همبستگی لازم بود علائم مخابره شده از دو سوزن پروب در دیسک سخت کامپیوتر ذخیره شده و پردازش توسط یک برنامه کامپیوتری روی آنها انجام بگیرد.

### ۵-۲- اندازه گیری غلظت هوا

غلظت هوا با منطقی مشابه پروب تک سوزنی انجام می گرفت. البته در اینجا اطلاعات ذخیره شده از سوزن جلویی در دیسک سخت کامپیوتر توسط یک برنامه کامپیوتری پردازش شده غلظت محاسبه می گردید.

### ۵-۳- اندازه گیری قطر حباب ها

وقتی یک حباب به نوک پروب می رسد، سیم پروب داخل حباب فرورفته و مدار قطع می شود. مادامیکه حباب در حال عبور است مدار قطع است و بنابراین هر زمان قطعی مدار نشان دهنده اندازه یک حباب می باشد. اگر سرعت حباب معلوم باشد، می توان با ضرب آن در زمان قطع مدار اندازه حباب را به دست آورد. البته از آنجا که سوزن پروب می تواند در هر کجای حباب به آن برخورد کند، قطر حباب را باتوجه به زمان قطع مدار باید از رابطه زیر به دست آورد [۶]:

$$d_b = \sqrt{2} \cdot t \cdot U \quad (2)$$

که  $t$  زمان هر قطع مدار و  $U$  سرعت حباب ها است. یک برنامه کار جستجو میان اطلاعات فرستاده شده از سوزن جلویی و محاسبه طیف حباب ها را براساس اندازه هایی که در برنامه مشخص شده بود انجام می داد.

### ۵-۴- مدار الکترونیکی و سیستم برداشت اطلاعات

مدار الکترونیکی این پروب مشابه پروب تک سوزنی است با این تفاوت که کلیه علائم فرستاده شده از هر دو سوزن باید به کامپیوتر فرستاده شده و در آنجا برای پردازش بعدی ذخیره گردد. در این صورت با محدودیت حافظه (RAM) کامپیوتر روبرو خواهیم بود. مثلاً اگر از هر سوزن با فرکانس ۵۰ KHz و به مدت ۳۰ ثانیه اطلاعات برداشت شود، در هر اندازه گیری ۳ میلیون عدد باید به کامپیوتر فرستاده شود که از حد حافظه آن خارج است. به همین دلیل شانسون (Chanson) [۸] در اندازه گیری خود با فرکانس ۱۰ KHz و به مدت ۱/۲ ثانیه اطلاعات برداشت می کرد. زراتی و هاردویک (Zar-

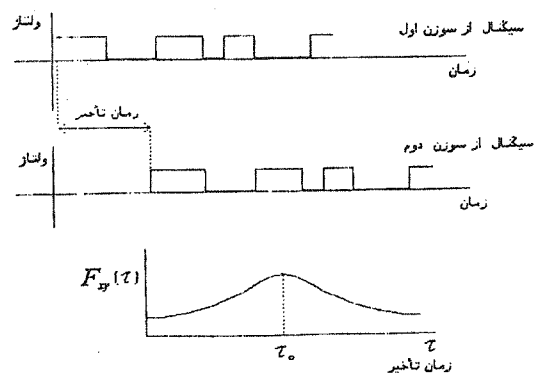
می شوند تا علائمی مشتمل بر قطع و وصل مکرر مدار از سوزن پروب فرستاده شود. حال اگر یک سوزن کاملاً مشابه با سوزن اولی (با دو قطب الکتریکی که یکی سیم وسط سوزن است و دیگری خود سوزن، مشابه آنچه قبلاً توضیح داده شد) در فاصله کمی پایین دست سوزن اولی قرار گیرد علائم فرستاده شده از آن باید مشابه سوزن اولی با یک ذخیره زمانی  $\tau_0$  باشد (شکل ۵). این بدان دلیل است که سری حباب هایی که به سوزن اولی برخورد کرده اند با همان ترتیب پس از زمان کوتاهی به سوزن ۲ برخورد می کنند. حال اگر فاصله دو سر سیم سوزن ها را  $\Delta s$  فرض کنیم:

$$U = \frac{\Delta s}{\tau_0} \quad (1)$$

که  $U$  سرعت حباب ها می باشد.

در عمل علائم مخابره شده از دو پروب کاملاً مشابه نخواهند بود. زیرا وجود سوزن جلویی باعث ایجاد اختلال در جریان و تا حدودی بهم خوردن وضعیت اولیه حباب ها می شود. ولی می توان با برقراری همبستگی بین علائم (Cross - Correlation) محتمل ترین زمان تأخیر بین علائم را به دست آورد. همبستگی بین علائم به صورت زیر تعریف می شود:

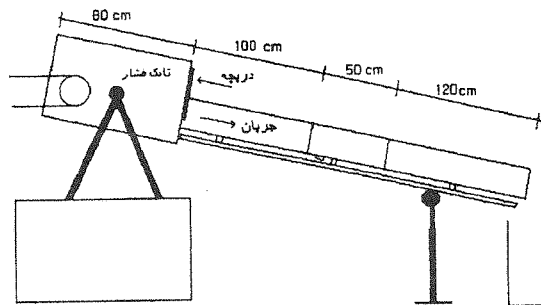
$$F_{xy}(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t x(t - \tau) y(t) dt \quad (2)$$



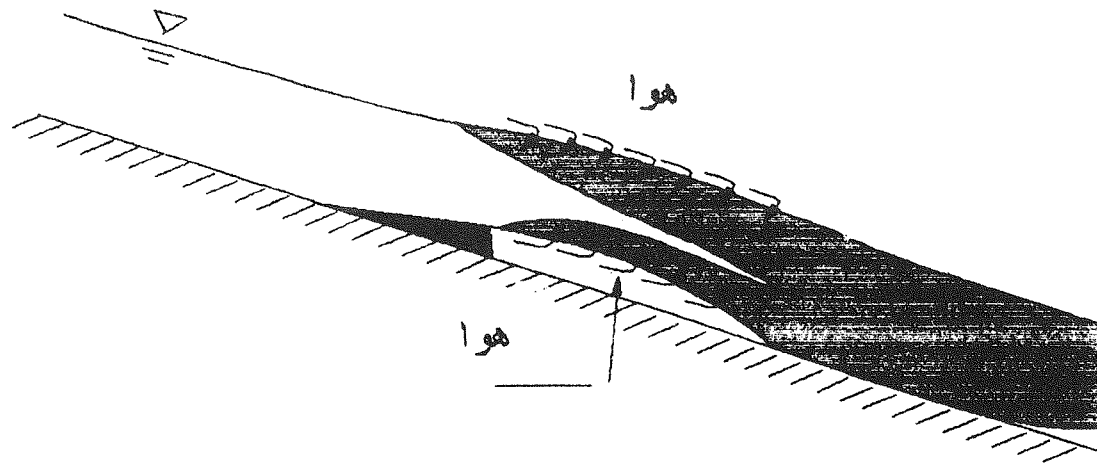
شکل (۵) همبستگی بین علائم مخابره شده از دو سوزن پروب

که در این روابط  $x(t)$  و  $y(t)$  علائم مخابره شده از دو سوزن پروب می باشند. حال اگر مقدار این همبستگی را در زمان های مختلف تأخیر  $t$  حساب کرده منحنی تغییرات آن را در مقابل  $t$  رسم کنیم، محتمل ترین زمان تأخیر مربوط به حداکثر مقدار همبستگی می باشد (شکل

طریق آن به داخل فلوم تزریق می‌گردید. یک قطعه سنگ آکواریوم در زیر شیار کار گذاشته شده بود تا هوای تزریق شده به حباب‌های ریز تبدیل گردد. پس از شیار هوادهی هوای تزریق شده با آب مخلوط شده یک جریان آب و هوا بوجود می‌آورد. هوا توسط یک کمپرسور باد که دارای شیر کنترل فشار بود با دبی ثابت به داخل جریان فرستاده می‌شد. قطعه نیم متری دیگری نیز ساخته شده بود که به تناسب آزمایش به جای قطعه بالا قرار می‌گرفت. این قطعه یک هواده بود که جریان روی آن به صورت جت در آمده از طریق لوله‌هایی هواده از زیر و همچنین از سطح رویی هوا جذب می‌کرد و به این ترتیب یک جت هوادهی شده ایجاد می‌گردید (شکل ۷). قطع سوم فلوم، ۱/۲ متر بود و فضای کافی برای مطالعه جریان آب و هوای ایجاد شده را فراهم می‌کرد.



شکل (۶) فلوم و تانک فشار



شکل (۷) اصول کار یک هواده

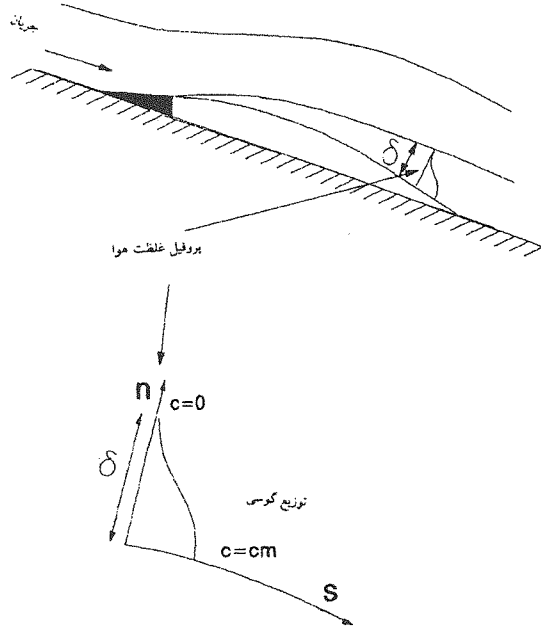
(rati and Hardwick) [۵] پروب دو سوزنی را توسعه داده توانستند با فرکانس ۲۶KHz و به مدت ۲۰ ثانیه از هر سوزن نمونه برداری کنند. در مطالعات حاضر با ایجاد تکنیکی که همزمان اطلاعات فرستاده شده به کامپیوتر را روی دیسک سخت می‌فرستاد، این محدودیت برداشته شد و عملاً تا جایی که در یک سخت گنجایش داشت، برداشت اطلاعات مسیر گردید. (برای اطلاعات بیشتر به مرجع ۲ مراجعه کنید). به این ترتیب با رفع این محدودیت پروب طراحی شده می‌تواند در سرعت‌های بالاتر از ۱۰ متر در ثانیه نیز به کار رود و با رفع محدودیت فرکانس و زمان این پروب دارای حساسیتی به مراتب بیشتر از پروب‌های مشابه قبلی می‌باشد.

## ۶- شرح آزمایش‌ها بر روی پروب سوزنی

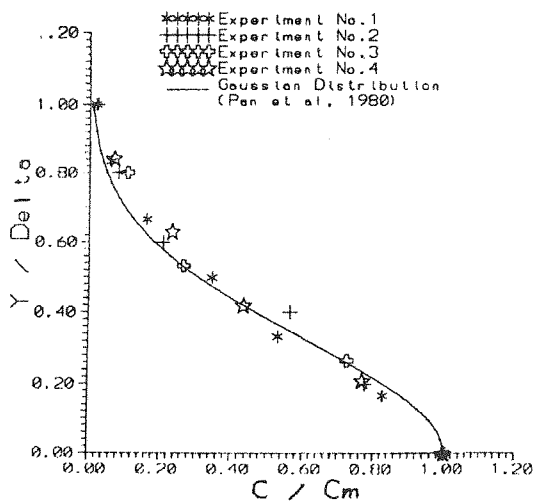
به منظور اطمینان از عملکرد و تعیین دقت پروب سوزنی آزمایش‌هایی روی آن انجام گردید. آزمایش‌ها در فلومی به عرض ۲۰ سانتی متر و طول ۲/۷ متر با شیب حدود ۱۴° انجام شد. در ابتدای این فلوم تانک فشاری قرار داشت و جریان از طریق دیوارهای هدایت از زیر یک دریچه قابل تنظیم وارد فلوم می‌شد. فلوم از سه قسمت تشکیل شده بود (شکل ۶): در قسمت اول به طول یک متر آب آرام می‌شد. قسمت دوم به طول نیم متر دارای شیار در کف به عرض ۵mm بود که هوا از

## ۶-۱- وسایل اندازه گیری

مقدار دبی جریان به کمک یک سرریز لبه تیز مثلثی در پایین دست فلوم به دست می آید و سرعت در نقاط مختلف عمق وقتی هوا در آب وجود نداشت، توسط لوله پیتو اندازه گیری می شد. برای اندازه گیری دبی هوای تزریق شده از یک روماتر که در مسیر لوله های هوا از کمپرسور به شیار کف فلوم قرار داده شده بود استفاده می شد.



شکل (۸) توزیع غلظت هوا در داخل جت آب



شکل (۹) مقایسه توزیع گوسی با اطلاعات به دست آمده از

پروپ سوزنی در آزمایش های کالیبراسیون

## ۶-۲-۲- اندازه گیری دبی هوای موجود در آب و مقایسه آن با هوای تزریق شده

در این آزمایش ها قطعه ۰/۵ متری با شیار کف و سنگ آکواریوم در داخل فلوم نصب گردید. در هر دبی، ابتدا به کمک یک لوله پیتو سرعت در نقاط مختلف عمق در مقطعی پایین دست شیار هوادهی به دست می آید. سپس هوا به داخل آب تزریق شده در نقاط مختلف عمق

## ۶-۲- آزمایش بر روی پروپ تک سوزنی

برای اطمینان از عملکرد درست پروپ تک سوزنی دو روش انتخاب شد.

الف - اندازه گیری پروفیل غلظت هوا بر روی جت هواده. ب - اندازه گیری دبی هوای موجود در آب و مقایسه آن با هوای تزریق شده.

در تمام آزمایش ها فرکانس نمونه برداری دستگاه روی ۱۰۰ KHz تنظیم شده بود. برای به دست آوردن زمان لازم نمونه برداری، در یک نقطه اقدام به برداشت اطلاعات با زمان های مختلف شد و این آزمایش در نقاط مختلف دیگر نیز تکرار گردید. مشاهده شد که مدت ۴۵ ثانیه برای گرفتن جوابی مستقل از زمان نمونه برداری کافی است. توجه شود که هیچیک از پروپ های قبلی نمی توانند با چنین فرکانس و زمانی نمونه برداری کنند.

## ۶-۲-۱- اندازه گیری پروفیل غلظت هوا بر روی جت هواده

مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف نشان داده است که توزیع غلظت هوا در لایه پایین و بالای یک جت وقتی این دو لایه به یکدیگر نرسیده باشند یک تابع گوسی است [۸، ۱۱، ۱۲] (شکل ۸). پن (PAN) و همکارانش [۱۱] براساس آزمایش هایی که انجام دادند، فرمول زیر را برای توزیع غلظت هوا داخل جت آب روی هواده پیشنهاد کردند.

$$C = C_{me}^{-4/7} \left(\frac{Y}{\delta}\right)^2 \quad (4)$$

که در این رابطه  $C_m$  حداکثر غلظت هوا و  $\delta$  ضخامت لایه آب و هوا می باشد. به کمک قطعه هواده، جت مورد نظر ایجاد و در دبی های مختلف پروفیل غلظت هوا در لایه پایینی جت در مقطع های مختلف آن اندازه گیری شد و بر روی توزیع غلظت که براساس فرمول بالا محاسبه شده بود رسم گردید (شکل ۹). توافق به دست آمده نشان دهنده صحت کار پروپ تک سوزنی است.

در آن مقطع غلظت هوا با پروب سوزنی اندازه‌گیری می‌شود. دبی هوای موجود در آب را به این ترتیب می‌توان از رابطه زیر حساب کرد:

$$Q_{\text{air}} = \int_0^h bCUdy \quad (5)$$

که در این رابطه  $C$  غلظت هوا،  $U$  سرعت جریان،  $b$  عرض کانال و  $h$  عمق است. این آزمایش‌ها در چند دبی آب و هوا انجام شد و نتایج به دست آمده با دبی هوای تزریق شده که با روتامتر اندازه‌گیری شده، مقایسه گردید. نتایج نشان دادند که خطای دستگاه بین ۵ تا ۱۰ درصد می‌باشد علت خطا در اندازه‌گیری را به جز خود دستگاه می‌توان مربوط به عوامل زیر دانست:

- ۱- قرار نگرفتن سر پروب در نقطه دلخواه. عمق آب در این آزمایش‌ها بین ۲ تا ۳ سانتی متر بود و برداشت اطلاعات در فاصله‌های یک میلیمتری انجام می‌شد. تنظیم نوک پروب در نقطه مورد نظر توأم با خطا بود که این خطا به معنی اندازه‌گیری غلظت در اندکی بالاتر و یا پایین تر از نقطه مورد نظر می‌باشد.
- ۲- نوسانات سطح آب. این نوسانات از بالا دست ایجاد می‌شد و باتوجه به عمق کم آب با وجود زمان زیاد نمونه برداری خطایی در اندازه‌گیری‌ها بوجود می‌آورد. کم کردن این نوسانات به تانک فشار بزرگتری نیاز داشت.
- ۳- به علت قطر ۸ میلیمتری بدنه، سر پروب را نمی‌توان از ۴ میلیمتر به کف نزدیکتر کرد و در نزدیکی سطح آب نیز مقداری هوا از اتمسفر داخل آب می‌شد و غلظت‌های بالای هوا را بوجود می‌آورد. در این دو منطقه میزان هوا را می‌بایست باتوجه به غلظت‌های اندازه‌گیری شده در نقاط نزدیک با قبول مقداری خطا تخمین زد.

### ۳-۶- آزمایش بر روی پروب دو سوزنی

آزمایش‌ها روی فلوم شرح داده شده در بخش قبل انجام گردید. پس از تنظیم دبی جریان، در هر آزمایش سرعت در مقطعی در پایین دست شیار هوادهی، توسط لوله پیتو در عمق‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شد. سپس کمپرسور هوا روشن شده و هوا به داخل جریان تزریق می‌گردید آنگاه پروب دو سوزنی روی مقطع اندازه‌گیری شده توسط لوله پیتو نصب و در فواصل یک میلیمتری از نزدیک کف تا سطح آب اطلاعات برداشت می‌شد. اطلاعات در دو فایل جداگانه یکی مربوط به سوزن جلویی و یکی مربوط

به سوزن عقبی ذخیره می‌گردید. فرکانس نمونه برداری در کلیه آزمایش‌ها روی ۵۰ KHz تنظیم شده و زمان نمونه برداری ۴۵ ثانیه در نظر گرفته شد. پس از انجام آزمایش‌ها پردازش اطلاعات جمع‌آوری شده صورت می‌گرفت که حاصل آن سرعت در نقاط مختلف و همچنین غلظت هوا و طیف حباب‌های عبوری بود. نمونه‌هایی از خروجی حاصل از پردازش اطلاعات در جدول شماره ۱ آمده است. تجزیه و تحلیل نتایج هر مورد به طور جداگانه در بخش‌های زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳-۶-۱- نتایج اندازه‌گیری سرعت

نمونه‌ای از نتایج اندازه‌گیری سرعت توسط لوله پیتو و پروب دو سوزنی در جدول ۲ و شکل ۱۰ منعکس است. در هر دبی آب، اندازه‌گیری با پروب دو سوزنی در چند دبی هوا انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که پروب سوزنی روند افزایش سرعت از کف به طرف سطح آب را به درستی نشان داده و سرعت‌های اندازه‌گیری شده توسط آن به سرعت‌های اندازه‌گیری شده توسط لوله پیتو نزدیک می‌باشد.

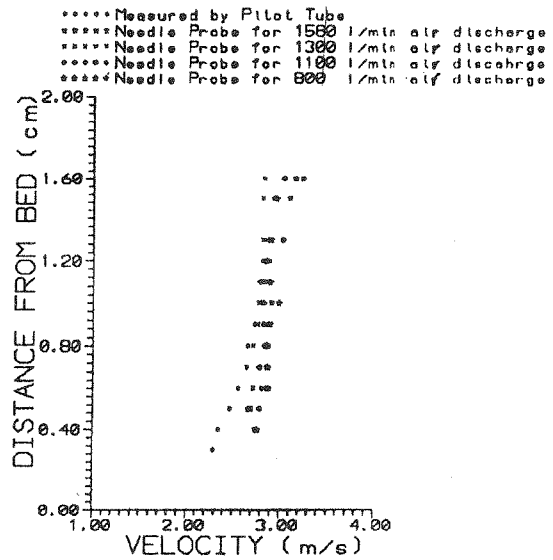
در نقاط نزدیک کف فلوم، سرعت‌های اندازه‌گیری شده توسط پروب سوزنی کمی بالا می‌باشد. دلیل بالاتر بودن سرعت در این نقاط می‌تواند ایجاد یک مجرای تنگ بین بدنه پروب و کف فلوم وقتی پروب به کف نزدیک است و در نتیجه بالاتر رفتن سرعت حرکت حباب‌ها باشد. در هر صورت خطای اندازه‌گیری در بسیاری از نقاط کمتر از ۵ درصد است.

### ۳-۶-۲- نتایج اندازه‌گیری غلظت هوا

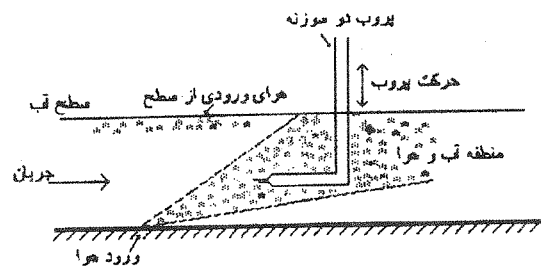
کنترل صحت نتایج به دست آمده از پروب دو سوزنی در مورد غلظت هوا به روشی مشابه با پروب تک سوزنی انجام شد. این آزمایش‌ها، در ۲ دبی مختلف آب و در هر دبی با تزریق مقادیر مختلف هوا انجام شد. نمونه‌ای از اندازه‌گیری‌های غلظت هوا در عمق‌های مختلف و در دبی‌های مختلف هوا در جدول ۳ آمده است و مقایسه نتایج هوای اندازه‌گیری شده با کمک رابطه ۵ و اندازه‌گیری روتامتر در جدول ۴ منعکس است. همانگونه که از این نتایج مشخص است، پروب روند منطقی تغییرات غلظت هوا از کف به طرف سطح آزاد در حین عبور از مسیر حباب‌های تزریق شده را به خوبی نشان می‌دهد (شکل ۱۱). خطای به دست آمده در دبی هوا نیز در ۴ مورد از ۶ مورد آزمایش کمتر از ۶ درصد بوده



است. در مورد علل وجود خطا در بخش ۵-۲-۲ بحث شده است.



شکل (۱۰) مقایسه نتایج اندازه گیری سرعت توسط لوله پیتو و پروب دو سوزنی.



شکل (۱۱) نحوه انجام آزمایش در مخلوط آب و هوا.

برای اندازه گیری مشخصه های جریان جریان های گاز - مایع تشریح شده است. این پروب مثل یک سوئیچ الکتریکی عمل کرده و وجود مایع (مثلاً آب) با هدایت الکتریکی زیادتیر از گاز (مثلاً هوا) را تشخیص می دهد. طراحی و کالیبراسیون دو نوع از این پروب با مشخصات زیر برای جریان آب و هوا با سرعت زیاد در اینجا انجام شده است: الف) یک پروب تک سوزنی که فقط غلظت هوا را اندازه گیری می کند و نتیجه را بلافاصله پس از آزمایش به کامپیوتر می فرستد. ب) یک پروب دو سوزنی که علاوه بر غلظت هوا، سرعت حباب ها و طیف آنها را نیز اندازه گیری می کند ولی لازم است پس از انجام آزمایش روی اعداد فرستاده شده به کامپیوتر برای به دست آوردن نتیجه پردازش صورت بگیرد. امتیاز پروب سوزنی ساخته شده، نسبت به پروب های مشابه قبلی عبارت است از:

۱ - سرعت بالای برداشت اطلاعات (۱۰۰ KHz).

۲ - نداشتن محدودیت در زمان برداشت اطلاعات

۳ - ابعاد بسیار کوچک که آن را قادر می سازد تا حباب های تا حد یک میلیمتری را نیز ثبت کند. که در نتیجه دقت و حساسیت این پروب را نسبت به پروب های قبلی به مقدار زیادی افزایش می دهد.

نتایج آزمایش های کالیبراسیون نشان داد که پروب سوزنی توانسته است با دقت خوبی غلظت هوا و سرعت و طیف حباب ها را اندازه بگیرد. برای تعیین دقیق درصد خطا و عملکرد این پروب لازم است کالیبراسیون آن با تجهیزات کامل تری در رنج وسیعتری از سرعت جریان و غلظت هوا انجام گیرد.

## قدردانی

در اینجا لازم است از آقای دکتر محمد موحدی و آقای دکتر احمد کاردان به دلیل کمک های فنی زیادی که در زمینه طرح مدار و برنامه های کامپیوتری نمودند، صمیمانه سپاسگزار می کنیم. همچنین از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبیر که با حمایت های همه جانبه انجام این پروژه تحقیقاتی را ممکن ساخت، قدردانی می کنیم.

انجام آزمایش های این پروژه بدون همکاری های فراوان مرکز تحقیقات آب و زارت نیرو چه از نظر ساخت وسایل مختلف و چه از لحاظ در اختیار قرار دادن فضای آزمایشگاهی ممکن نبود که بدینوسیله از آن قدردانی و تشکر می شود.

## ۶-۳-۳- اندازه گیری طیف حباب های عبوری

طیف حباب های عبوری در این آزمایش ها در سه غلظت کم، متوسط، زیاد در جدول ۱ ارائه شده است. همانگونه که از این داده ها مشخص است تعداد حباب ها و تنوع اندازه آنها تطابق خوبی با غلظت هوای اندازه گیری شده دارد.

از آنجا که غلظت هوا و سرعت جریان توسط پروب با دقت خوبی اندازه گیری شده می توان اظهار داشت که نتایج اندازه گیری طیف حباب ها نیز قابل اطمینان می باشد.

## ۷- خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله طرز کار و طراحی یک پروب سوزنی

جدول (۱) نمونه هایی از خروجی حاصل از پردازش اطلاعات در سه غلظت متفاوت هوا

1-  
 SAMPLING FREQUENCY = 50.000000 IN KHz  
 TIME OF SAMPLING = 45.000000 IN SECONDS  
 DISTANCE BETWEEN PROBES = 12.000000 IN mm  
 HERE ARE THE CLUSTERS FOR BUBLES DIAMETER IN mm  
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10;  
 %0.479667 AIR WAS MIXED IN WATER  
 SPEED IS 2.912621 m/s

TOTAL NUMBER OF BUBLES IS 157

diameter range in mm	number of bubbles	percent from total
0.00 - 1.00	7	4.45860
1.00 - 2.00	11	7.00637
2.00 - 3.00	14	8.91720
3.00 - 4.00	24	15.28662
4.00 - 5.00	12	7.64331
5.00 - 6.00	18	11.46497
6.00 - 7.00	16	10.19108
7.00 - 8.00	25	15.92357
8.00 - 9.00	9	5.73248
9.00 - 10.00	9	5.73248
10.00 or more	12	7.64331

2-  
 SAMPLING FREQUENCY = 50.000000 IN KHz  
 TIME OF SAMPLING = 45.000000 IN SECONDS  
 DISTANCE BETWEEN PROBES = 12.000000 IN mm  
 HERE ARE THE CLUSTERS FOR BUBLES DIAMETER IN mm  
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10;  
 %8.203244 AIR WAS MIXED IN WATER  
 SPEED IS 2.955665 m/s

TOTAL NUMBER OF BUBLES IS 2511

diameter range in mm	number of bubbles	percent from total
0.00 - 1.00	156	6.21266
1.00 - 2.00	197	7.84548
2.00 - 3.00	222	8.84110
3.00 - 4.00	259	10.31462
4.00 - 5.00	246	9.79689
5.00 - 6.00	255	10.15532
6.00 - 7.00	200	7.96495
7.00 - 8.00	205	8.16408
8.00 - 9.00	205	8.16408
9.00 - 10.00	155	6.17284
10.00 or more	411	16.36798

3-  
 SAMPLING FREQUENCY = 50.000000 IN KHz  
 TIME OF SAMPLING = 45.000000 IN SECONDS  
 DISTANCE BETWEEN PROBES = 12.000000 IN mm  
 HERE ARE THE CLUSTERS FOR BUBLES DIAMETER IN mm  
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10;  
 %13.569333 AIR WAS MIXED IN WATER  
 SPEED IS 2.870813 m/s

TOTAL NUMBER OF BUBLES IS 3423

diameter range in mm	number of bubbles	percent from total
0.00 - 1.00	139	4.06077
1.00 - 2.00	186	5.43383
2.00 - 3.00	233	6.80689
3.00 - 4.00	258	7.53725
4.00 - 5.00	303	8.85188
5.00 - 6.00	292	8.53053
6.00 - 7.00	339	9.90359
7.00 - 8.00	307	8.96874
8.00 - 9.00	294	8.58896
9.00 - 10.00	262	7.65410
10.00 or more	810	23.66345

جدول (۴) اندازه گیری سرعت در دبی اول آب - عمق تقریباً ۲ cm

		نتایج اندازه گیری سرعت توسط پروب سوزنی m/s			
فاصله از کف به cm	نتایج پیتو m/s	Q <sub>air</sub> ۱۵۸۰ l/min	Q <sub>air</sub> ۱۳۰۰ l/min	Q <sub>air</sub> ۱۱۰۰ l/min	Q <sub>air</sub> ۸۰۰ l/min
۰/۱	-	-	-	-	-
۰/۲	۲/۲۷	-	-	-	-
۰/۳	۲/۲۹	-	-	-	-
۰/۴	۲/۳۵	۲/۷۴	۲/۷۵	۲/۷۶	۲/۷۶
۰/۵	۲/۴۷	۲/۶۹	۲/۶۹	۲/۷۹	۲/۶۷
۰/۶	۲/۵۶	۲/۸۷	۲/۷۲	۲/۸۱	۲/۸۸
۰/۷	۲/۶۵	۲/۸۷	۲/۸۷	۲/۷۹	۲/۸۷
۰/۸	۲/۶۶	۲/۸۷	۲/۷۲	۲/۸۴	۲/۸۶
۰/۹	۲/۷۳	۲/۹	۲/۷۶	۲/۸۳	۲/۸۸
۱	۲/۸	۲/۹۱	۲/۷۸	۲/۸۳	۲/۹۹
۱/۱	۲/۸۳	۲/۸۷	۲/۸	۲/۷۹	۲/۹
۱/۲	۲/۸۴	۲/۸۸	۲/۸۳	۲/۸۲	۲/۸۶
۱/۳	۲/۸۷	۲/۹۱	۲/۸۲	۳/۰۳	۲/۹
۱/۴	۲/۸۷	۲/۹۱	۲/۸۳	۲/۹۴	۲/۸۸
۱/۵	-	۳/۱	۲/۸۲	۲/۹۴	۲/۹۶
۱/۶	-	۳/۲۴	۲/۸۳	۳/۰۴	۳/۱۶

جدول (۳) غلظت هوای اندازه گیری شده در دبی اول آب (درصد)

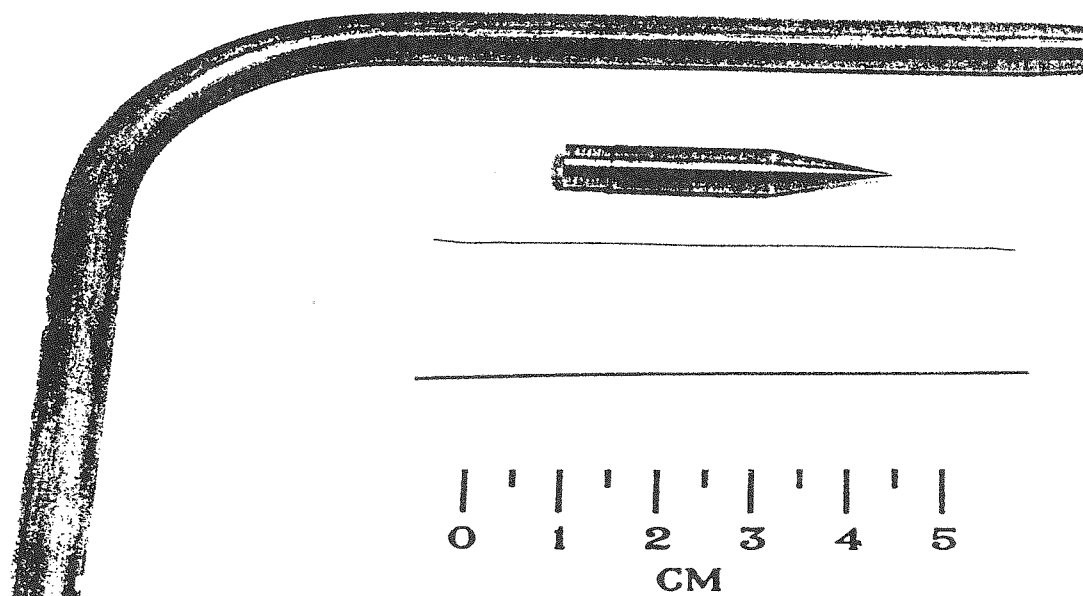
فاصله از کف به cm	دبی هوا به لیتر در ساعت			
	۱۶۰۰	۱۳۲۰	۱۱۰۰	۸۰۰
۰/۱	-	-	-	-
۰/۲	(۳)	(۰/۴)	(۱)	(۱)
۰/۳	(۴)	(۰/۸)	(۱/۵)	(۲)
۰/۴	۵/۰۸	۴/۹۹	۳/۷۹	۳/۱
۰/۵	۸/۲	۵/۶۲	۸/۴۵	۱/۳۲
۰/۶	۸/۷۶	۵/۰۹	۹/۷۲	۵/۶۴
۰/۷	۱۳/۵۷	۹/۷۳	۱۰/۱۵	۷/۲۸
۰/۸	۱۲/۵۳	۵/۱۱	۷/۳	۷/۲۹
۰/۹	۱۰/۲۸	۱۲/۸۱	۲/۶۵	۳/۸۸
۱	۸/۷	۱۲/۳	۰/۸۶	۴/۰۷
۱/۱	۳/۵۲	۱۰/۸۲	۱/۳۶	۱/۹۹
۱/۲	۱/۹۸	۸/۴	۱/۹۲	۱/۰۸
۱/۳	۰/۵۸	۵/۷۱	۰/۱۸	۰/۴۶
۱/۴	۰/۳	۰/۸۸	۰/۱۱	۰/۱۹
۱/۵	۳/۵۲(۰/۲)	۰/۴۱	۰/۲۲(۰/۱)	۰/۲۷(۰/۱)
۱/۶	۲/۵۹(۰/۲)	۰/۶۸(۰/۳)	۲/۹(۰/۱)	۱/۳۱(۰/۱)
۱/۷	۱۱/۲۱(۰/۱)	۲/۲۸(۰/۳)	۱۶/۶(۰/۱)	۹/۶۲(۰/۱)
۱/۸	۵۴/۹۴(۰/۱)	۱/۱۲(۰/۲)	۴۸/۲(۰/۱)	۲۴/۵۹(۰/۱)
۱/۹	۷۷/۵۸(۰/۱)	۱۰/۵۳(۰/۲)	۷۷/۵۳(۰/۱)	۵۵/۱۹(۰/۱)
۲	۹۳/۶۹	۲۶/۲۵(۰/۱)	۹۰/۶۶	۷۹/۹(۰/۱)
۲/۱	-	۶۸/۴۵(۰/۱)	-	-

جدول (۴)  
مقایسه نتایج اندازه گیری دبی هوا در دبی اول آب

شماره آزمایش	هوای اندازه گیری شده روتامتر lit/h	هوای حساب شده توسط رابطه ۸ lit/h	درصد خطا
۱	۱۶۰۰ ± ۱۰	۱۵۳۰	-۴
۲	۱۳۲۰ ± ۱۰	۱۵۲۰	+۱۵
۳	۱۱۰۰ ± ۱۰	۹۲۰	-۱۶
۴	۸۰۰ ± ۱۰	۷۵۴/۵	-۵/۶

مقایسه نتایج اندازه گیری دبی هوا در دبی دوم آب

شماره آزمایش	هوای اندازه گیری شده روتامتر lit/h	هوای اندازه گیری شده توسط رابطه lit/h	درصد خطا
۵	۱۳۰۰ ± ۱۰	۱۳۰۶/۵	+۰/۵
۶	۱۱۰۰ ± ۱۰	۱۱۳۳/۵	+۳



عکس (۱) ساختمان پروب سوزنی

- [6] Neal, A. and Benkoff, S.A., (1963), "A High Resolution Resistivity Probe for Determination of Local Void Properties in Gas Liquid Flow", J. of A.I.Ch.E., pp. 490-494.
- [7] Nassos, G.P., and Benkoff, S.G., (1967), "Local Sensitivity Probe for Study Point Properties of Gas-Liquid Flows", Cand. Jour. of chem. Eng., Vol 45, Oct., pp 271-274.
- [8] Chanson, H., (1988), A Model Study of Aerator Performance, Ph.D. Thesis Submitted to the University of Canterbury, New Zealand.
- [9] Cain, P. and Wood, I.R., (1981), "Instrumentation for Aerated flow on Spillways", ASCE, Vol. 107, HY11, pp. 1407-1424.
- [10] Iida, Y., (1972), "Study of Local Void Fraction", J Atm. Energy, Japan, 14, pp 337-339.
- [11] Pan, S.B., Y.Y. Shi, Q.S. and Dong, S.L., (1980), "The Self-Aeration Capacity of the Water Jet over the Aeration Ramp", J of Hydr. Eng., Beijing, No. 5, pp. 13-232, (in Chinese).
- [12] Ervine, D.A. and Falvey, H.T., (1987), "Behaviour of Turbulent Water Jets in the Atmosphere and in the Plunge Pool", Proc. ICE, Part 2, 83, pp. 295-314.
- [1] امیررضا زراتی، محمودرضا شاهرودی و آرش سمواتی، طراحی یک پروب سوزنی برای اندازه گیری مشخصه های جریان در جریان های دوفاز؛ گزارش نهایی پروژه مستقل تحقیقاتی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، معاونت پژوهشی، آبان ۱۳۷۴.
- [۲] امیررضا زراتی، محمودرضا شاهرودی و آرش سمواتی، طراحی و ساخت یک پروب دو سوزنی برای اندازه گیری سرعت جریان در جریان های دو فاز؛ گزارش نهایی پروژه مستقل تحقیقاتی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، معاونت پژوهشی، مهر ۱۳۷۵.
- [3] 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.
- [4] Serizawa, A., Kataoka, I. and Michiyoshi, I., (1975), "Turbulence Structure of Air-Water Bubbly Flow - I Measuring Techniques", Int. J. of Multiphase Flow, Vol. 2, pp. 221-233.
- [5] Zarrati, A. R., and Hardwick, J. D., (1994), "Application of a Needle Probe for Measurement of Local Parameters in Air-water Flows", ASCE Symp. on Advan. in Measurement Tech. and Instrumentation.