مجله مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1394، دوره 15، شماره 6، ص‌ص 365-375

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی عمق نفوذ و نحوه توزیع حباب‌های تشکیل شده ناشی از حرکت افقی یک جت سیال عمودی

محمدرضا توکلی[1*] ، پوریا بیات[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 84156-83111، mrtavak@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 04 اسفند 1393

پذیرش: 23 فروردین 1394

ارائه در سایت: 19 اردیبهشت 1394

کلید واژگان:

جت سیال

اندازه‌گیری حباب

عمق نفوذ

تصویر برداری سریع

آب دریا

چکیده

ورود هوا به داخل مایعات به وسیله یک جت سیال، پدیده پیچیده‌ای است که کاربردهای مهمی در صنایع و محیط زیست دارد. در مقاله حاضر فرایند برخورد یک جت آب عمودی آرام که در حال حرکت افقی بر روی یک استخر آب ساکن با سرعت ثابت است به صورت تجربی بررسی شده و به اندازه‌گیری عمق نفوذ و نحوه توزیع حباب‌های ایجاد شده توسط این جت سیال، برای دو نوع سیال آب معمولی و آب دریا با استفاده از دو روش اپتیکی پرداخته می‌شود. این آزمایش برای دبی‌های مختلف (متناظر با سرعت‌های عمودی متفاوت) انجام شده و در هر کدام از این حالت‌ها جت عمودی سیال با سرعت‌های افقی متفاوت بر روی استخر حرکت می‌نماید. با شروع حرکت افقی جت، هوا از زیر محل برخورد جت سیال وارد استخر می‌شود. جهت اندازه‌گیری عمق نفوذ حباب‌های ایجاد شده یک روش تصویربرداری سریع و برای اندازه‌گیری نحوه توزیع این حباب‌ها، روش سایه‌نگاری پالسی به‌کاربرده شده است. با افزایش سرعت عمودی و کاهش سرعت افقی جت سیال عمق نفوذ حباب‌های هوا به داخل سیال افزایش یافته و نتایج نسبتاً مشابهی برای آب معمولی و آب دریا بدست می‌آید. این در حالی است که تعداد و اندازه حباب‌های تشکیل شده در آب دریا به طور قابل ملاحظه‌ای با آب معمولی متفاوت است. در این مطالعه، عمق نفوذ و نحوه توزیع حباب‌ها برای جت‌های مختلف با قطرهای متفاوت، سرعت‌های عمودی مختلف و سرعت‌های افقی متفاوت اندازه‌گیری و گزارش شده‌اند.

A Laboratory Study of Penetration Depth and Distribution of Bubbles Formed by a Translating Vertical Fluid Jet

Mohammad Reza Tavakoli*, Pouriya Bayat

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
* P.O.B 84156-83111 Isfahan, Iran, mrtavak@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 23 February 2015
Accepted 12 April 2015
Available Online 09 May 2015

Keywords:
Fluid jet
Bubble measurement
Penetration depth
High- Speed imaging
Sea water

ABSTRACT

Air entrainment in liquids via a fluid jet, is a complex phenomenon that has important applications in industry and the environment. The impact of a vertical laminar water jet translating over the quiescent pool of water at constant velocity was studied empirically, and the penetration depth as well as distribution of the bubbles formed by this jet was measured for both fresh and sea water with two different optical methods. This experiment was conducted at different flow rates (corresponding to different vertical velocities). In each case, the jet was moved at different horizontal velocities relative to the pool surface. As the jet started its horizontal translation, air began entering the pool from the bottom of the point of impact. Bubbles penetration depth was measured through a high-speed imaging technique, and pulse shadowgraphy was used for measuring the bubbles distribution. Increasing the vertical velocity of the jet while simultaneously decreasing the horizontal velocity of the same led to increased bubble penetration depths, and similar results were obtained for fresh water and sea water. This result was obtained in spite of the fact that the number and size of the bubbles formed in sea water were dramatically different from those formed in fresh water. Moreover, the significant role of buoyant forces in the distribution of the bubbles was obvious. The penetration depth and distribution of the bubbles were measured and reported for various jets with different diameters at different vertical and horizontal velocities.

1- مقدمه

ورود هوا به داخل مایعات در بسیاری از پدیده‌های طبیعی و مهندسی اتفاقی متداول است. این پدیده عامل انتقال جرم در سطح آزاد اقیانوس‌ها، رودخانه‌ها و جریان‌ها بوده و امکان انتقال اکسیژن و دی‌اکسیدکربن (که برای بقای این اکوسیستم‌ها حیاتی بوده) را فراهم کرده و همچنین در تغییر اقلیم جهانی نقش اصلی را به عهده دارد. فرآیند ورود هوا به داخل مایعات با استفاده از یک جت سیال در برخی از شرایط عملی از قبیل هوادهی استخرها و تصفیه فاضلاب‌ها، اختلاط آب راکد، بازآرایی مخازن آب و نیز در صنایع هسته‌ای و

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. R. Tavakoli, P. Bayat, A Laboratory Study of Penetration Depth and Distribution of Bubbles Formed by a Translating Vertical Fluid Jet, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 6, pp. 365-375, 2015 (In Persian)

متالورژی، بارها رخ می‌دهد. بر اساس کاربرد مورد نظر و ویژگی‌های جریان، این پدیده می‌تواند نقش مثبت و مطلوب داشته و یا برعکس نقشی منفی و نامطلوب داشته باشد. به عنوان مثال از نقش مثبت این پدیده در مهندسی هیدرولیک جهت محافظت مجراهای بزرگ سر ریز در برابر کاویتاسیون و یا در رآکتورهای گاز- مایع برای افزایش سطح تماس می‌توان نام برد، درحالی‌که در قالب‌گیری پلیمرها یا ریخته‌گری شیشه‌ها ورود هوای ناشی از برخورد جت مذاب مضر بوده و باید از آن جلوگیری کرد.

کارهای آزمایشگاهی زیادی به مطالعه پدیده ورود هوا توسط جت سیال ساکن پرداخته‌اند. به عنوان مثال، به دلیل اهمیت مسئله هوادهی در اقیانوس‌ها به وسیله شکست امواج، چانسون و لی [1] به شبیه‌سازی مقدار هوای وارد شده در فرایند شکست امواج با استفاده از یک جت سیال ساکن در داخل یک استخر آب پرداختند و کاکس و همکاران [2] پدیده متلاشی شدن حباب‌های بزرگ گازی در جریان دو فازی در داخل لوله با استفاده از این فرآیند را مطالعه نموده‌اند. مطالعات تجربی انجام‌گرفته به وسیله مطالعات تحلیلی، همبستگی مناسبی را برای پیش‌بینی ویژگی‌های کلی جریان از قبیل زمان شروع ورود هوا، میزان هوای وارد شده، ویژگی‌های توده حبابی تشکیل شده، میزان انتقال جرم و سرعت متوسط جریان فراهم نموده‌اند که برای مطالعه بیشتر می‌توان به مقالات مروری جامع بین [3]، وود [4] و کایگر [5] مراجعه نمود. با انجام آزمایش‌های مختلف، چانسون [6] و چانسون و همکاران [7] موفق به ارائه روابط تجربی برای پیش‌بینی توزیع حجمی هوای وارد شده و حرکت جریان جت در داخل سیال شدند. ثابت شده است که این روابط در مقایسه با بسیاری از روابط تئوری که تاکنون منتشر شده‌اند، دقیق‌تر هستند. البته هنوز هم اعتبار این قوانین تجربی در پیش‌بینی نفوذ هوا و غلظت آن با چالش‌های زیادی برای جریان‌های مختلف با خواص و اشکال متفاوت مواجه است.

یکی از نتایج کمی مهم گزارش شده در مطالعات گذشته کمترین سرعت موثر جت سیال ساکن (V_c) برای شروع ورود هوا به داخل سیال است. در حالتی که جت عمودی ساکن با سرعت کم به سطح سیال برخورد کند سطح سیال اطراف جت آرام بوده و هیچ‌گونه حبابی در داخل استخر به علت برخورد جت تشکیل نمی‌شود. با افزایش سرعت جت سیال یک فرورفتگی[1] در زیر سطح سیال داخل استخر در زیر جت پدید می‌آید که با افزایش سرعت عمودی جت، عمق و طول این فرورفتگی بیشتر شده و مکش ایجاد شده توسط جت تولید شده در زیر سطح آزاد بر نیروهای مویینگی غلبه کرده و در نهایت از انتهای تورفتگی شروع به ورود حباب به داخل استخر می‌کند. در مطالعات لین و دانلی [8] کمترین سرعت موثر (V_c) برای جت‌های مدور عمودی دائم جهت شروع ورود هوا به داخل سیال اندازه‌گیری شده است. در این بررسی مجموعه‌ای متفاوت از سیالات، قطر نازل‌ها، فاصله بین نازل و سطح استخر مطالعه شد. برای اکثر شرایط آزمایش، جریان جت آرام بود، اما تعدادی جریان متلاطم نیز مورد بررسی قرار گرفت. دراین مطالعه اشاره می‌شود که مکانیزم ورود هوا در داخل سیال در جت آرام و مغشوش به صورت محسوسی متفاوت است. در جریان آرام صفحه‌ای از هوا در ناحیه اولیه برخورد جت در زیر آن تشکیل می‌شود و حباب‌ها از انتهای این صفحه به داخل استخر تزریق می‌شوند درحالی‌که در جریان مغشوش ورود هوا به داخل استخر بر اثر پستی و بلندی‌های موجود در سطح جت است که هوا را از سطح آزاد به داخل سیال وارد می‌کند.

1- Depression

شرایدین [9] به ارائه یک تئوری برای شکل سطح آزاد سیال در اطراف جت آرام عمودی ساکن پرداخته و بر اساس آن برای جت با قطر 0/2 تا 0/4 سانتی‌متر، سرعت عمودی جت جهت شروع ورود هوا به داخل آب را حدود V_j=6 m/s تخمین می‌زند. مطالعات جزئی‌تر در این زمینه توسط بین [10] و اروین و همکاران [11] و ال هومی و همکاران [12] انجام شده که در آن‌ها به محاسبه سرعت اولیه جت با مقطع دایره‌ای بر اساس قطر جت و شدت توربولانس می‌پردازند. در مطالعه مک کوگ و همکاران [13] سرعت اولیه جت با مقطع دایره‌ای برای ورود هوا به داخل سیال حدود 6/6 m/s است که در این حالت شدت توربولانس آن $v'/v \le 0/3\%$، و در این رابطه v' نوسانات سرعت[2] است، این در حالی است که هنگامی که شدت توربولانس افزایش می‌یابد، یا به عبارت دیگر $v'/v \le 0/5\%$، سرعت اولیه لازم جهت ورود هوا در حدود V_j=2/8 m/s است که این سرعت آنچنان به قطر نازل جت حساس نیست و تقریباً برای همه موارد ثابت است. با وجود اینکه اکثر مطالعات انجام شده بین جت‌های آرام و متلاطم تمایز قائل شدند، اما تنها مراجع [13،11] نوسانات سرعت جت سیال را اندازه‌گیری کردند. بنابراین چنین به نظر می‌رسد که نویسندگان از روی شکل ظاهری جت سیال (نرم یا زبر بودن سطح جت‌ها)، آن‌ها را آرام یا متلاطم فرض کرده‌اند.

کارهای بنیادی صورت گرفته در مطالعه جت‌های سیال همراه با حرکت انتقالی توسط چیریچلا و همکاران [14] گزارش شده است، که در آن مرزهای شروع ورود هوا به داخل سیال توسط جت آرام متقارن برخورد کننده به استخر ساکن مشخص شده است. آن‌ها دریافتند که ورود هوا به داخل سیال در عدد فرود[3] در حدود یک شروع می‌شود که در آن عدد فرود به صورت

$$\mathrm{Fr} = V_t / \sqrt{gD_j} \qquad (1)$$

تعریف می‌شود و در آن V_t سرعت انتقال جت (سرعت افقی)، D قطر جت در محل برخورد، و g ثابت شتاب مربوط به گرانش است و مکانیسم ورود هوا از ناحیه فرورفتگی ایجاد ناپایداری در زیر سطح آزاد در پشت ناحیه برخورد جت بوده که ناشی از ساختارهای به هم پیوسته تولید شده توسط ناپایداری کلوین هلمهولتز[4] جت تولید شده در زیر سطح سیال است(شکل1). مطالعات انجام شده توسط کرستن و همکاران [15] بر روی جت‌های باریک‌تر نشان داد که اثرات کشش سطحی و عدد رینولدز باعث تغییر عمق فرورفتگی شده و می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر نتایج داشته باشد. بررسی انجام شده توسط سُو و همکاران [16]، یک تحلیل انتگرالی از محل برخورد جت سیال ارائه داده که پیش‌بینی می‌کند که بیشینه عمق فرورفتگی در زیر سطح سیال با عدد فرود به توان یک سوم تغییر می‌کند. ورود هوا در برخورد انتقالی یک جت

شکل1 تصویر از بالا (سمت چپ) و تصویر از پایین (سمت راست) برخورد یک جت عمودی متحرک با سطح سیال و ورود هوا به داخل سیال به صورت پیوسته (عکس از مرجع [14])

2- rms Velocity
3- Froud Number
4- Kelvin-Helmholtz

مسطح توسط گومز-لدسما و همکاران [17] مطالعه شد. آن‌ها زمان و عمق فرورفتگی‌های ناپایدار تشکیل شده از برخورد جت سیال با ضخامت‌ها، سرعت‌های انتقالی، زاویه و سرعت‌های برخورد مختلف را اندازه‌گیری کردند و از یک مدل جریان ساده گاوسی پایا مشابه کار اوگز و همکاران [18] برای پیش‌بینی تشکیل و تخریب فرورفتگی استفاده کردند.

بررسی آزمایشگاهی تفاوت بین تعداد حباب‌های تشکیل شده و نحوه توزیع این حباب‌ها در آب معمولی و آب دریا در مطالعات بلنکین سوپ و همکاران [19] و روی و همکاران [20] انجام شده است . بر اساس تحقیقات صورت گرفته تعداد و اندازه حباب‌ها به طور محسوسی در آب دریا نسبت به آب معمولی متفاوت است به گونه‌ای که در آب دریا تعداد حباب‌ها به شدت افزایش یافته و اندازه آن‌ها کوچک شده است. در حالتی که از آب معمولی استفاده می‌شود، در مرحله اول به خاطر اینرسی موجود در جت سیال حباب های هوا به سمت پایین حرکت کرده و در حین حرکت این حباب‌ها به هم متصل شده و حباب‌های بزرگتر را تشکیل می‌دهند. درصورتی که هنگامی که از آب دریا استفاده می‌شود، این به هم چسبیدگی حباب‌ها در مرحله اول به خوبی صورت نگرفته و باعث عدم تشکیل حباب‌های بزرگ و ایجاد حباب‌های ریز با تعداد قابل توجه در داخل سیال می‌شود.

در سال‌های اخیر از برخی روش‌های عکس‌برداری جهت بررسی پدیده ورود هوا و تشکیل حباب در داخل سیال استفاده شده است. وادلین و همکاران [21] به اندازه‌گیری غلظت حباب‌های وارد شده به داخل سیال و اثرات جریان توربولان در برخورد با این حباب‌ها با استفاده از یک دوربین دیجیتال به صورت کیفی پرداختند. در مطالعه صورت گرفته توسط کو و همکاران [22] مسیر و اندازه متوسط حباب‌های ناشی از برخورد یک جت سیال عمودی ساکن با سطح آزاد سیال به صورت تجربی و عددی بررسی شده است و پژوهش انجام شده توسط روی و همکاران [20] به نحوه تشکیل حباب‌ها پس از برخورد جت سیال به سطح آزاد و نحوه حرکت جت سیال در داخل استخر سیال می‌پردازد. همانطور که مشاهده می‌شود در بیشتر مطالعات تجربی صورت گرفته به بررسی و مطالعه حباب‌های ناشی از برخورد یک جت سیال عمودی ساکن بدون حرکت افقی به سطح آزاد بررسی شده و همچنین به خاطر مشکلات موجود در زمینه مشاهده و اندازه‌گیری تعداد و عمق نفوذ حباب‌ها کمتر از روش‌های اپتیکی جهت بررسی این پدیده و اندازه‌گیری حباب‌ها به صورت منفرد استفاده شده است.

در پژوهش حاضر فرایند برخورد یک جت آب عمودی آرام که در حال حرکت افقی بر روی یک استخر آب ساکن با سرعت ثابت است به صورت تجربی بررسی شده و به اندازه‌گیری عمق نفوذ و نحوه توزیع حباب‌های ایجاد شده توسط این جت سیال، برای دو نوع سیال آب معمولی و آب دریا (جهت شبیه‌سازی آب دریا از نمک آکواریوم با غلظت مشابه استفاده شده است) با استفاده از دو روش اپتیکی در حالتی که ورود هوا به صورت پیوسته است پرداخته می‌شود. در هیچ‌کدام از حالت‌های مورد بررسی در این تحقیق در حالتی که جت سیال ساکن است هوایی وارد نمی‌شود. هنگامی که جت شروع به حرکت افقی می‌کند، همان‌گونه که در مطالعه چرچیلا و همکاران [14] به آن اشاره شده است چهار رژیم اختلاط (بدون ورود هوا، ورود هوای اولیه، ورود هوای میانی و ورود هوای پیوسته) مشاهده می‌شود. جهت مشاهده پدیده نفوذ هوا به داخل سیال و اندازه‌گیری عمق نفوذ حباب‌ها از تکنیک‌های عکس‌برداری سرعت بالا استفاده‌شده و جهت اندازه‌گیری تعداد و اندازه حباب‌های وارد شده در سیال، روش سایه‌نگاری پالسی که در بخش‌های بعدی به آن اشاره خواهد شد به کار گرفته شده است. در ادامه این مقاله به معرفی روش انجام آزمایش و تکنیک‌های مورد استفاده جهت اندازه‌گیری و پس از آن به ارائه نتایج حاصل از آزمایش و در نهایت به نتیجه‌گیری و بحث در مورد نتایج پرداخته خواهد شد.

2- جزئیات آزمایش

جهت انجام این آزمایش از یک استخر به طول 7/3 m، عرض 0/8 m و ارتفاع 0/9 m استفاده می‌شود. دیوارهای استخر از جنس شیشه معمولی با ضخامت 1 cm انتخاب‌شده تا امکان مشاهده و اندازه‌گیری با استفاده از روش‌های اپتیکی را فراهم نماید (شکل 2). در این آزمایش از یک نازل ساکن در راستای عمودی با قطر 4 mm جهت ایجاد جت عمودی سیال استفاده می‌شود و سرعت‌های مختلف عمودی با تغییر دبی سیال ورودی به داخل این نازل حاصل می‌شود. این نازل همچنین با سرعت‌های مختلف افقی در طول استخر سیال حرکت کرده و مؤلفه افقی سرعت جت سیال را ایجاد می‌کند.

جهت ایجاد حرکت افقی در طول استخر، در بالای استخر یک ارابه حمل تجهیزات که جت سیال در روی آن قرارگرفته قراردارد که قابلیت حرکت افقی در طول استخر را دارد. این ارابه توسط یک سرو موتور، که به وسیله یک کامپیوتر شتاب و سرعت آن کنترل می‌شود، در راستای طولی استخر به حرکت در می‌آید. لازم به ذکر است به علت وجود حرکت شتاب‌دار در شروع (شتاب مثبت) و توقف حرکت (شتاب منفی) این مجموعه، اندازه‌گیری‌ها صرفاً در فاصله‌ای که در آن سرعت افقی جت ثابت است، مسافتی حدود 3 m در مرکز استخر، انجام می‌شود. برای نازل با قطر 4 mm، جهت ایجاد یک رژیم پیوسته ورود هوا به داخل استخر برای سرعت‌های افقی در نظر گرفته‌شده در این پژوهش، بر اساس یافته‌های تجربی چرچیلا و همکاران [14] فاصله نازل جت از سطح آزاد استخر 0/2 m در نظر گرفته شده و سیال توسط یک پمپ سانتریفیوژ که در کنار استخر قرار دارد به داخل نازل پمپ شده و بدین وسیله جت عمودی سیال برای دبی‌های مختلف ورودی به نازل تشکیل می‌شود. جهت اندازه‌گیری دبی سیال خروجی از نازل از یک روتامتر با توانایی اندازه‌گیری حداکثر دبی $200\ cm^3/s$ که در خروجی پمپ قرار دارد استفاده شده است. این روتامتر با اندازه‌گیری حجم آب پمپاژ شده در یک فاصله زمانی 60 ثانیه‌ای، کالیبره شده و دارای دقتی در حدود $\pm 3\%$ است. همچنین به منظور حفظ کیفیت آب درون استخر، از یک سیستم فیلتراسیون استفاده شده است. در این سیستم، آب از روی سطح به وسیله دو سرریز برداشته و به فیلترها منتقل شده سپس آب مجدداً در طرف مقابل سرریز به داخل استخر برگردانده می‌شود. در این آزمایش قطر نازل D_j=4 mm است که منجر به تشکیل جت سیالی با قطرهایی برابر با D_j=3/77 mm، D_j=3/85 mm و D_j=3/95 mm در برخورد با سطح آزاد سیال برای دبی‌های مختلف جت می‌شود و سرعت عمودی جت در برخورد

شکل2 تصویر از کنار استخر انجام آزمایش و جت سیال

با سطح آزاد سیال متناظر با این قطرها V_j= 6/33 m/s ، V_j= 5 m/s و همچنین V_j= 3/47 m/s است. باید توجه داشت که پدیده‌های زیادی می‌توانند در میزان نوسان سرعت اندازه‌گیری شده دخیل باشند. این پدیده‌ها شامل تلاطم ناشی از حرکت نازل، نوسانات ناشی از ناپایداری مویینگی، نوسانات ناپایدار جت ناشی از فاکتورهای مکانیکی مختلف، و انحراف لحظه‌ای از سرعت متوسط جت طی دوره زمانی اندازه‌گیری است. در این مطالعه، محدوده کلی نوسانات در همه حالت‌های اندازه‌گیری از 0/20% تا 0/35 % بوده است که با توجه به میزان نوسان کم و این حقیقت که حداقل بخشی از نوسانات هر اندازه‌گیری ناشی از فاکتورهایی غیر از تلاطم جت بوده، در این مطالعه جت سیال آرام فرض شده است.

جهت مشاهده جت سیال و فرایند ورود هوا به داخل استخر سیال و اندازه‌گیری عمق نفوذ حباب‌ها در داخل سیال از یک دوربین دیجیتال سرعت بالا مدل فانتوم 4[1] با سرعت 500 تصویر در ثانیه به همراه یک عدد لنز نیکون 35 میلیمتری استفاده شده، که در کنار استخر قرار داده شده‌اند. همانطور که در شکل 3 ملاحظه می‌شود یک منبع نور پیوسته در مقابل دوربین بر روی زمین نصب شده است، که وظیفه نوردهی را بر عهده دارد و جهت یکنواخت‌تر شدن آن از یک صفحه پخش کننده نور در مقابل منبع نوری استفاده شده است.

جهت اندازه‌گیری نحوه توزیع حباب‌های وارد شده در سیال از یک دوربین پی آی وی[2] مدل کداک مگا پلاس 2020[3] با قدرت تفکیک 1632 در 1200 پیکسل و یک لنز نیکون 200mm با نسبت بزرگنمایی یک به یک استفاده شده، همچنین جهت ایجاد پالس نوری، یک دستگاه لیزر یون آرگون با قدرت 0/8 وات به همراه یک منحرف‌کننده صوتی اپتیکی[4] مورد استفاده قرار گرفته است.

جهت افزایش قطر نور لیزر و کاهش شدت آن از دو لنز همگرا با فاصله کانونی 100 mm و 150 mm و یک لنز واگرا با فاصله کانونی 50 mm درمقابل دهانه خروجی لیزر در فواصل مناسب استفاده شده است. دوربین و لیزر مذکور در میانه استخر انجام آزمایش بر روی زمین در حالت ثابت قرار دارند. لازم به ذکر است که پالس‌های ایجاد شده توسط لیزر و زمان ثبت تصاویر در دوربین با یکدیگر هماهنگ شده و فاصله زمانی تصاویر گرفته شده از یکدیگر 0/067 ثانیه است (شکل4). در هر دو مورد ذکر شده دوربین‌ها بر روی خط مرکزی جت سیال متمرکز شده‌اند و اندازه‌گیری را در روی آن سطح انجام می‌دهند.

شکل3 تصویر از جلو استخر آزمایش و نحوه قرار گرفتن تجهیزات اپتیکی مورد استفاده در آزمایش

1- Phantom 4
2- PIV
3- Kodak Megaplus ES 2020
4- Acousto-optic Modulator

2-1- روش انجام آزمایش

جهت اندازه‌گیری سرعت جت سیال در برخورد با سطح آزاد سیال ابتدا از تصاویر گرفته شده به وسیله دوربین سرعت بالا به همراه لنز 200 میلیمتری از جت ساکن در بر خورد با سطح سیال (شکل 5) استفاده شده و به اندازه‌گیری قطر جت در برخورد با سطح سیال پرداخته می‌شود و از روی مقدار دبی جریان سرعت جت سیال در برخورد با سطح آزاد محاسبه می‌شود. جهت اندازه‌گیری عمق نفوذ حباب‌ها در داخل استخر سیال در هر حالت نیز از تصاویر گرفته شده با دوربین سرعت بالا با استفاده از لنز 35 میلیمتری از جت سیال در حال حرکت افقی به داخل سیال استفاده می‌شود (شکل 6). به دلیل استفاده از لنزهای متفاوت در اندازه‌گیری قطر جت و عمق نفوذ حباب‌ها به داخل سیال جهت مشخص نمودن اندازه هر پیکسل در تصاویر گرفته شده و مشخص نمودن قطر واقعی جت در برخورد با سیال و یا عمق حقیقی نفوذ حباب‌ها در این تصاویر به کالیبراسیون روش اندازه‌گیری نیاز است. در این راستا در هر دو مرحله یک خط‌کش در فاصله‌ی کانونی لنز در داخل سیال قرار داده و به وسیله آن مشخص می‌شود که سطح قابل مشاهده هر تصویر برای اندازه‌گیری قطر جت 95 mm در 70mm است که متناظر با 58 میکرون برای هر پیکسل بوده و سطح قابل مشاهده هر تصویر برای اندازه‌گیری عمق نفوذ جت 300 mm در 220 mm است که متناظر با 184 میکرون برای هر پیکسل است و دقت اندازه‌گیری در هر مورد به اندازه یک پیکسل است.

در این آزمایش از روش سایه نگاری پالسی[5] جهت اندازه‌گیری تعداد و اندازه حباب‌های ایجاد شده در داخل سیال استفاده شده است. در این روش دوربین در یک طرف مقطع آزمایش و منبع نوری در طرف دیگر قرار گرفته و با عکس برداری از سطح مقطع موجود می‌توان تعداد و اندازه حباب‌های موجود را اندازه‌گیری نمود. نکته مهم در استفاده از روش سایه نگاری پالسی این است که در این روش از یک منبع نوری با پرتوهای نور موازی استفاده می‌شود. این پرتوها توسط دو لنز همگرا و یک لنز واگرا ایجاد می‌شوند که در فواصل مشخصی در مقابل دهانه خروجی لیزر قرار گرفته‌اند و باعث افزایش قطر لیزر و کاهش شدت نور ورودی به داخل دوربین می‌شوند.

اساس روش سایه نگاری پالسی استفاده از یک منبع نوری با پرتوهای موازی است. در صورتی که پرتوهای نوری موازی جهت عکس برداری استفاده شود آنگاه اندازه سایه ایجاد شده در تصویر بدون در نظر گرفتن موقعیت جسم نسبت به منبع نور از اندازه یکسان و ثابت و مساوی اندازه واقعی جسم برخوردار خواهد بود. در اینجا همانطور که در شکل 4 مشاهده می‌شود از لیزر که خود به عنوان منبع نور موازی شناخته می‌شود به همراه تعدادی لنز همگرا و واگرا جهت افزایش قطر پرتوهای موازی لیزر جهت ایجاد این مهم استفاده شده است.

شکل4 تصویر از جلو استخر آزمایش و نحوه قرار گرفتن تجهیزات اپتیکی

5- Pulse Shadowgraph

شکل5 تصویر از بالای جت سیال در برخورد با سطح آزاد سیال در حالت ساکن
V_j=3/47 m/s و D_j=3/77 mm و V_t=0/0 m/s

شکل6 تصویر جت سیال متحرک در برخورد با سطح آزاد سیال و ورود حباب‌های هوا به داخل سیال V_t=0/89 m/s و D_j=3/95 mm و V_j=6/33 m/s

در روش سایه نگاری پالسی یک فرآیند دو مرحله‌ای جهت کالیبراسیون دراندازه‌گیری حباب‌ها مورد نیاز است. در مرحله اول، هدف مشخص‌کردن اندازه واقعی هر پیکسل در تصاویر گرفته شده است تا بتوان اندازه حباب‌ها را مشخص نمود، به این منظورمجددا یک خط‌کش در فاصله‌ی کانونی لنز در داخل سیال قرار داده و به وسیله آن مشخص می‌شود که سطح قابل مشاهده هر تصویر دارای ابعاد 24/5 mm در 18 mmاست که متناظر با 15 میکرون برای هر پیکسل بوده و دقت اندازه‌گیری به اندازه یک پیکسل است. در اینجا جهت اندازه‌گیری قطر حباب‌ها حداقل از سه پیکسل استفاده شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد، و به دلیل اینکه دقت اندازه‌گیری در عکس‌های گرفته شده یک پیکسل است، لذا برای کاهش عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌های انجام شده برای معرفی یک حباب از حداقل سه پیکسل استفاده شده که با افزایش قطر حباب‌ها دقت اندازه‌گیری نیز بالاتر می‌رود. این در حالی است که در حالت کلی می‌توان به اندازه‌گیری حباب‌هایی با اندازه حداقل یک پیکسل هم پرداخت که باعث ایجاد عدم قطعیت و خطای قابل‌توجهی در اندازه‌گیری حباب‌های کوچک خواهد شد، لذا در صورتی که حداقل تعداد پیکسل مورد نیاز برای معرفی یک حباب سه عدد باشد، سیستم موجود قابلیت اندازه‌گیری حباب‌هایی با قطر حداقل 45 میکرون را خواهد داشت. در مرحله دوم هدف مشخص کردن اندازه واقعی حباب‌هایی است که در تصویر دیده می‌شوند. حباب‌هایی که در فاصله کانونی لنز دوربین قرار گرفته‌اند کاملاً شفاف بوده و دارای بیشترین شدت نور بوده و به علت استفاده از لنز با نسبت بزرگ‌نمایی یک به یک دارای اندازه حقیقی می‌باشند. در مورد حباب‌هایی که در خارج از فاصله کانونی قرار گرفته‌اند، این حباب‌ها کاملاً شفاف نبوده و اندازه واقعی آنها با آنچه مشاهده می‌شود متفاوت است. به منظور محاسبه اندازه واقعی این حبابها از روش ارائه‌شده توسط جان و گیبلر [23] استفاده می‌شود. در این روش از یک سنجه استاندارد دایره‌ای به نام سنجه پاترسون[1]که دارای دوایر تو پر سیاه رنگ با اندازه های مشخص از 45 میکرون تا 470 میکرون است استفاده می‌شود. ابتدا این صفحه در فاصله کانونی لنز دوربین قرار داده می‌شود. در این حالت این دوایر کاملاً شفاف بوده و شدت نور[2] آنها در حداکثر مقدار خود (I=255) است. با دور و نزدیک کردن این صفحه از فاصله کانونی لنز مقدار شدت نور و اندازه این دایره‌های توپر عوض می‌شود و پیرامون آنها کنگره‌های فرنل[3] مشاهده می‌شود. شعاع و شدت نور این دایره‌ها به وسیله یک تابع دو بعدی متقارن که بر روی مقدار شدت نور برازش شده محاسبه می‌شود.

$$F = A_0(1-\tanh(A_1(\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}-A_2))) \qquad (2)$$

در این رابطه پارامترهای A_n و پارامترهای مکانی x_0 و y_0 به وسیله یک روش غیرخطی حداقل مربعات از تابع فوق بر روی تصاویر گرفته شده محاسبه می‌شود. پارامترهای A_n عبارت‌اند از شدت نور A_0، وضوح A_1 و شعاع دوایر $A_2 = d/2$ که در آن d قطر دوایر است. با خارج شدن صفحه از صفحه کانونی به هر کدام از جهات، شدت نور همه دایره‌ها کاهش می‌یابد. این اتفاق برای دایره‌های کوچکتر نسبت به دایره‌های بزرگ‌تر، سریع‌تر و با شدت بیشتری رخ می‌دهد. اگر x فاصله سنجه از صفحه کانونی (x=0) باشد با رسم تغییرات شدت نور و قطر دوایر بر حسب فاصله از سطح کانونی و مشخص کردن یک حد پایینی، که در این آزمایش I=180 برای شدت نور و تغییرات 8% ± برای قطر در نظر گرفته شده است، محدوده مقادیر x متناظر با هر قطر بدست می‌آید و این مقدار با افزایش قطر دایره‌ها افزایش می‌یابد. این محدوده از مقادیر x عمق میدان نامیده می‌شود. نمودار عمق میدان بر حسب قطر دایره (حباب) برای شدت نور I=180 در شکل 7 نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، عمق میدان برای حباب‌های بزرگ‌تر از 400 میکرون مقدار ثابت و برابر کل دامنه اندازه‌گیری بوده درحالی‌که برای حباب‌های کوچک، متناسب با اندازه حباب کم می‌شود. همچنین بیشترین خطا در اندازه‌گیری عمق میدان 6/3% است. با مقایسه شدت نور و قطر حباب‌های اندازه‌گیری شده در این آزمایش با مقدار محاسبه‌شده در کالیبراسیون می‌توان اندازه واقعی حباب‌ها را مشخص نمود.

در شکل 8 تصویر نمونه‌ای از سنجه پاترسون مورد استفاده جهت کالیبره کردن در حالتی که در فاصله کانونی لنز قرار دارد و در حالتی که 20 mm دورتر از آن باشد مشاهده می‌شود. همچنین در شکل 9 یک نمونه از تصاویر

شکل 7 عمق میدان نسبت به قطر حباب (خطوط عمودی معرف مقدار خطا در محاسبه میدان دید می‌باشند).

1- Patterson Globe Reticle
2- Intensity
3- Ferrenel Pattern

(الف)

(ب)

شکل 8 دو تصویر نمونه از سنجه پاترسون جهت کالیبراسیون، الف) صفحه در فاصله کانونی (کاملاً شفاف) ب) صفحه 20 mm خارج از فاصله کانونی (غیر شفاف)

گرفته شده توسط روش سایه نگاری پالسی از حباب‌های ایجاد شده در داخل استخر است که دایره‌های سیاه موجود در تصویرحباب‌های ایجاد شده در داخل سیال می‌باشند.

2-2- شرایط انجام آزمایش

این آزمایش برای یک نازل با قطر 4 میلیمتر، دو سیال آب و آب دریا (از نمک آکواریوم با غلظت مشابه جهت شبیه‌سازی آب دریا استفاده شده)، سه دبی مختلف سیال (متناظر با سه سرعت عمودی جت) و پنج سرعت افقی متفاوت جت سیال انجام شده است. و در مجموع 30 حالت متنوع را برای هر سیال پدید می‌آورد که همگی در جدول 1 قابل مشاهده است همچنین تعداد و اندازه حباب‌ها در شش عمق مختلف از سطح آزاد سیال اندازه‌گیری شده است. برای تمامی این حالت‌ها عمق ابتدایی نفوذ حباب‌ها در زیر محل برخورد جت سیال و تعداد حباب‌ها در پشت محل برخورد جت سیال اندازه‌گیری شده است. در زیر نقطه برخورد جت به سطح آزاد سیال مقدار قابل ملاحظه‌ای هوا از انتهای فرورفتگی ایجاد شده بر اثر حرکت افقی جت در داخل استخر وارد می‌شود. در پایین‌دست این قسمت ناحیه‌ای به نام دنباله وجود دارد که به علت تمرکز بسیار بالای حباب‌ها در زیر جت سیال و

شکل 9 نمونه تصویر گرفته شده در روش سایه نگاری پالسی، در این تصویر دایره‌های سیاه معرف حباب‌های ایجاد شده در داخل سیال می‌باشند

جدول 1 شرایط انجام آزمایش در حالت‌های مختلف

انحراف معیار ± مقادیر متوسط

زاویه برخورد جت نسبت به سطح آزاد (درجه)	سرعت افقی جت V_t (m/s)	سرعت عمودی برخورد جت V_j(m/s)	قطر جت در برخورد با سطح D_j(mm)	دبی جریان (ml/s)
83/7 ± 1/6	0/38 ± 0/02	3/47 ± 0/07	3/77 ± 0/03	38/8 ± 1/15
85/6 ± 1/7	0/38 ± 0/02	5/00 ± 0/09	3/85 ± 0/05	58/2 ± 1/75
86/6 ± 1/8	0/38 ± 0/02	6/33 ± 0/11	3/95 ± 0/07	77/6 ± 2/33
81/6 ± 1/6	0/51 ± 0/04	3/47 ± 0/07	3/77 ± 0/03	38/8 ± 1/15
84/1 ± 1/7	0/51 ± 0/04	5/00 ± 0/09	3/85 ± 0/05	58/2 ± 1/75
85/4 ± 1/7	0/51 ± 0/04	6/33 ± 0/11	3/95 ± 0/07	77/6 ± 2/33
79/7 ± 1/5	0/63 ± 0/03	3/47 ± 0/07	3/77 ± 0/03	38/8 ± 1/15
82/8 ± 1/6	0/63 ± 0/03	5/00 ± 0/09	3/85 ± 0/05	58/2 ± 1/75
84/3 ± 1/7	0/63 ± 0/03	6/33 ± 0/11	3/95 ± 0/07	77/6 ± 2/33
77/6 ± 1/4	0/76 ± 0/03	3/47 ± 0/07	3/77 ± 0/03	38/8 ± 1/15
81/4 ± 1/6	0/76 ± 0/03	5/00 ± 0/09	3/85 ± 0/05	58/2 ± 1/75
83/1 ± 1/6	0/76 ± 0/03	6/33 ± 0/11	3/95 ± 0/07	77/6 ± 2/33
75/6 ± 1/3	0/89 ± 0/04	3/47 ± 0/07	3/77 ± 0/03	38/8 ± 1/15
79/9 ± 1/5	0/89 ± 0/04	5/00 ± 0/09	3/85 ± 0/05	58/2 ± 1/75
82/0 ± 1/6	0/89 ± 0/03	6/33 ± 0/11	3/95 ± 0/07	38/8 ± 1/15

در ابتدای دنباله، روش‌های اپتیکی اندازه‌گیری تعداد حباب‌ها قابل‌استفاده نیست و پس از آن ناحیه اندازه‌گیری قرار دارد که از حدود 0/28 متر پشت محل برخورد جت با سیال آغاز می‌شود که در شکل 10 تصویر مربوط به آن قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که در این تصویر سیال مورد استفاده آب معمولی بوده و سرعت افقی جت سیال V_t=0/51 m/s به سمت چپ و همچنین سرعت عمودی جت سیال V_j=6/33 m/s است.

3- نتایج

3-1- مشاهدات عمومی

در شکل 5 تصویری از جت سیال در حالتی که جت عمودی ساکن بوده و حرکت افقی نداشته باشد (V_t=0) که در نتیجه‌ی آن سطح سیال اطراف جت آرام بوده را نشان می‌دهد. در این شکل سرعت برخورد جت سیال برابر با

شکل10 محل برخورد جت سیال و ناحیه دنباله تشکیل شده در پشت جت سیال بر اثر حرکت افقی آن

V_j= 3/47m/s و قطر جت در برخورد با سطح آزاد D_j= 3/77mm است. همانطور که از تصویر می‌توان دید، سطح جت بسیار نرم به نظر رسیده و یک ناحیه باریک از سطح آب اطراف محل برخورد جت به آرامی در طرفین جت بلند شده است. وجود این سطح هلالی شکل توسط تعدادی از نویسندگان از جمله شرایدین [9] اشاره‌شده و توسط بین [10] در مورد آن بحث شده است. هنگامی که سرعت عمودی جت پایین است موج‌های باریک ساکنی نیز بر سطح جت بالای سطح هلالی دیده می‌شوند. برای جت‌های ساکن در این مطالعه با هر سرعت و قطری هیچ هوایی وارد استخر نشده و هیچ موج ثابت باریک قابل اندازه‌گیری‌ای پدیدار نمی‌شود. این حقیقت که در این آزمایش‌ها برای سرعت‌های عمودی جت کمتر از 6/33 m/s که بیشینه نوسانات سرعت جت کمتر از 0/35% است هیچ هوایی به دام نمی‌افتد با مراجع [13،11] که اختلاط اولیه در سرعت جت 6/6 m/s با نوسانات سرعت 0/3% شروع می‌شود مطابقت خوبی دارد. همانطور که در شکل 1 مشاهده می‌شود با شروع حرکت افقی این جت سیال با سرعت V_t>0 یک فرورفتگی در زیر سطح سیال داخل استخر در پشت جت پدید می‌آید و از انتهای تورفتگی حباب‌های هوا وارد استخر می‌شوند.

3-2- اندازه‌گیری عمق نفوذ

در مشاهدات عمومی جریان هوای وارد شده به وسیله جت سیال به داخل سیال که به وسیله تصویربرداری سریع از این پدیده صورت گرفت مشاهده شد که بر اثر برخورد جت سیال به سطح آزاد سیال مقدار قابل‌توجهی هوا به صورت حباب به داخل استخر وارد می‌شود. عمق نفوذ این حباب‌ها در ناحیه زیر محل برخورد جت سیال ناشی از اینرسی جت سیال بوده که این پژوهش به اندازه‌گیری آن پرداخته است. این حباب‌ها سپس بر اثر نیروی شناوری شروع به حرکت به طرف بالا می‌نمایند این در حالی است که همان‌گونه که در شکل 6 مشاهده می‌شود بر اثر ایجاد جریان اغتشاشی در پشت محل برخورد جت سیال ناشی از حرکت افقی عمق نفوذ حباب‌ها حتی از عمق نفوذ اولیه آن‌ها هم بیشتر می‌شود. به دلیل این که شکل توده هوای وارد شده کاملاً پایدار نیست، عمق نفوذ در میانگین زمان، مورد محاسبه قرار گرفته است. شکل 11 مقدار عمق نفوذ را برای یک جت سیال در سرعت‌های متفاوت به صورت کیفی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود عمق نفوذ با افزایش سرعت افقی جت سیال کاهش می‌یابد. نمودار نشان داده‌شده در شکل 12 به مقایسه عمق نفوذ سیال در داخل استخر برای سرعت‌های متفاوت افقی می‌پردازد همانطور که مشاهده می‌شود هنگامی که سرعت‌های عمودی جت سیال کم است، عمق نفوذ حباب‌ها با افزایش سرعت افقی به

شکل11 عمق نفوذ حباب‌ها برای جت سیال (V_j=6/33 m/s) با سرعت افقی متفاوت: الف) V_t=0/89 m/s ب) V_t=0/63 m/s ج) V_t=0/38 m/s

شکل12 عمق نفوذ حباب‌ها برای جت سیال با سرعت افقی متفاوت

شدت کاهش می‌یابد در صورتی که این روند نزولی در سرعت‌های عمودی بیشتر به مراتب کمتر دیده می‌شود این در حالی است که همان‌گونه که در شکل 13 مشاهده می‌شود برای سرعت‌های افقی متفاوت با افزایش سرعت عمودی جت سیال عمق نفوذ حباب‌ها بیشتر می‌شود.

جهت بررسی اثر همزمان سرعت افقی و عمودی جت سیال به مطالعه اثر زاویه برخورد جت به سطح آزاد سیال پرداخته شده است. اگر تتا زاویه برخورد جت سیال با سطح آزاد باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود [14]:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{V_t}{V_j}\right) \qquad (3)$$

همانطور که در جدول 1 قابل ملاحظه است برای تمامی حالت‌های مختلف زاویه برخورد جت سیال بین 76 تا 87 درجه تغییر می‌کند که با نتایج تجربی ارائه‌شده توسط چیریچلا و همکاران [14] مطابقت خوبی دارد. با توجه به شکل 14 از مقایسه نتایج بدست آمده برای عمق نفوذ نسبت به زاویه برخورد تتا می‌توان نتیجه گرفت که عمق نفوذ حباب‌ها تابعی از نسبت سرعت افقی به سرعت عمودی جت سیال و یا به عبارتی زاویه تتا است.

همانطور که از شکل 14 مشاهده می‌شود تغییرات عمق نفوذ اولیه هوا نسبت به زاویه برخورد جت تقریباً به صورت خطی عوض می‌شود که با برازش یک تابع خطی بر روی مقادیر تجربی بدست آمده می‌توان رابطه عمق نفوذ با نسبت سرعت افقی به سرعت عمودی جت سیال را به صورت زیر بیان کرد.

$$d_p = 159.2 - 5.88\tan^{-1}\left(\frac{V_t}{V_j}\right) \qquad (4)$$

همان طور که در شکل 15 مشاهده می‌شود عمق نفوذ اولیه هوا برای زاویه برخوردهای یکسان تقریباً مساوی است که این به این معنا است که صرف‌نظر

از سرعت عمودی و یا افقی جت در صورتی که زاویه برخورد جت و یا به عبارتی نسبت سرعت افقی به سرعت عمودی جت سیال یکسان باشد عمق نفوذ هوا نیز در داخل استخر یکسان است.

تأثیر اثر نوع سیال بر عمق نفوذ حباب‌ها در شکل 16 برای سیال آب معمولی و آب دریا قابل مشاهده است. مقایسه نتایج بدست آمده برای عمق نفوذ حباب‌ها نسبت به زاویه برخورد سیال به سطح آزاد تفاوت چندانی بین آب معمولی و آب دریا از خود نشان نمی‌دهند و در هر دو مورد با تقریب خوبی عمق نفوذ اولیه هوا یکسان است.

شکل13 عمق نفوذ حباب‌ها برای جت سیال با سرعت عمودی متفاوت

شکل14 تغییر عمق نفوذ حباب‌ها برای جت سیال با تغییر زاویه‌ی برخورد جت سیال

شکل15 عمق نفوذ حباب‌ها برای جت سیال با زاویه‌های برخورد متفاوت

شکل16 عمق نفوذ حباب‌ها برای جت سیال با سیال‌های متفاوت مورد استفاده در آزمایش

3-3- اندازه‌گیری توزیع اندازه حباب‌ها

از مقایسه کیفی بین تعداد و اندازه حباب‌های تشکیل شده ناشی از حرکت جت سیال در آب معمولی و آب دریا (شکل 17) می‌توان نتیجه گرفت که اگر چه عمق نفوذ حباب‌ها در هر دو حالت تقریباً یکسان است ولی تعداد و اندازه حباب‌های تشکیل شده به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت می‌باشند.

شکل 18 تعداد حباب‌های تشکیل شده ناشی از حرکت افقی جت سیال را برای سیال آب معمولی و در حالتی که سرعت افقی جت V_t=0/51m/s و سرعت عمودی آن V_j=3/47 m/s است را برای حباب‌هایی با قطرهای مختلف

(الف)

(ب)

شکل17 عمق نفوذ حباب‌ها برای جت سیال با سیال‌های متفاوت
الف) آب معمولی ب) آب دریا

در عمق‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود اندازه حباب‌ها با نزدیک شدن به سطح آزاد آب به طور محسوسی بزرگ می‌شود. دلیل این پدیده اثر نیروی شناوری بر حباب‌های بزرگ بوده که باعث می‌شود حباب‌های بزرگ به سرعت به سمت سطح آزاد سیال حرکت نمایند و لذا تمرکز حباب‌های بزرگ در نزدیکی سطح آزاد سیال بیشتر است.

در شکل 19 تعداد کل حباب‌های تشکیل شده در عمق‌های مختلف از سطح سیال برای آب معمولی در حالتی که جت با سرعت‌های متفاوت در حال حرکت افقی است و سرعت عمودی جت سیال V_j=3/47m/s است مشاهده می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت افقی جت سیال عمق نفوذ حباب‌ها کمتر شده و حباب‌ها بیشتر به سطح آزاد سیال نزدیک می‌شوند که این مسئله را می‌توان با توجه به کاهش عمق نفوذ حباب‌ها که در بخش قبلی به آن اشاره شد توجیه نمود.

شکل 20 نشان‌دهنده حباب‌های ایجاد شده در سیال آب معمولی در حالتی است که سرعت عمودی جت V_j=6/33 m/s است که در مقایسه با شکل‌های 18 و 19 می‌توان نتیجه گرفت که هر چه دبی جت سیال بیشتر شود و یا به عبارتی سرعت عمودی جت سیال افزایش یابد اولاً اندازه حباب‌های تشکیل شده کوچکتر شده و ثانیاً به تعداد آنها افزوده می‌شود. همچنین به دلیل افزایش عمق نفوذ حباب‌ها بر اثر افزایش سرعت عمودی جت سیال، بیشترین تعداد حباب‌ها در عمق نسبتاً قابل‌توجهی از سطح آزاد سیال قرار گرفته‌اند.

شکل18 حباب‌های تشکیل شده از حرکت افقی جت، سمت راست تصاویر گرفته شده در عمق‌های مختلف و در سمت چپ تعداد حباب‌ها بر حسب اندازه آنها، V_j=3/47 m/s و V_t=0/51m/s

شکل19 تعداد کل حباب‌های تشکیل شده در عمق‌های مختلف از سطح آزاد برای سرعت‌های افقی متفاوت و V_j=3/47m/s

از تکرار آزمایش برای آب دریا نتایج کیفی مشابهی حاصل می‌شود با این تفاوت که همانطور که در شکل21 ملاحظه می‌شود، تعداد و اندازه حباب‌های تشکیل شده در آب دریا نسبت به آب معمولی به صورت بسیار محسوسی متفاوت است. به گونه‌ای که با افزایش غلظت نمک در آب و ایجاد سیالی با غلظت مشابه آب دریا تعداد حباب‌ها به شدت افزایش یافته (از مرتبه 15 برابر) و اندازه آن‌ها کوچک شده است. شکل 22 نشان‌دهنده تعداد و اندازه‌ی حباب‌ها در عمق 65 mm در زیر سطح آزاد سیال برای حالتی که از آب دریا استفاده شده و سرعت عمودی جت سیال V_j= 6/3 m/s بوده و جت با سرعت افقی V_t=0/51m/s در حال حرکت است، می‌باشد. با مقایسه تعداد حباب‌های موجود در فواصل مختلف از محل برخورد جت سیال با سطح آزاد و یا به عبارتی در زمان‌های مختلف در شکل 22، (شرایط مشابه شکل 21) می‌توان دریافت که با گذشت زمان روند کاهش تعداد حباب‌های کوچک بسیار آهسته‌تر از حباب‌های بزرگ است، به عبارت دیگر حباب‌های بزرگ با سرعت بیشتری محیط را ترک می‌کنند که این مسئله به علت اثر قابل ملاحظه نیروی شناوری بر حباب‌های بزرگ نسبت به حباب‌های کوچک است. همانطور که ملاحظه می‌شود با دور شدن از محل برخورد جت سیال تعداد حباب‌های بزرگ (بزرگ‌تر از 0/2 mm) حدود 90 درصد کاهش می‌یابد درحالی‌که تعداد حباب‌های کوچک (کوچک‌تر از 0/1 mm) فقط حدود 50 درصد کاهش یافته‌اند.

شکل20 حباب‌های تشکیل شده ناشی از حرکت افقی جت سیال در حالت V_j=6/3 m/s و V_t=0/51m/s

شکل21 تعداد حباب‌های تشکیل شده در آب دریا بر حسب اندازه آنها در فواصل مختلف از پشت محل برخورد جت سیال با سطح آزاد V_j=6/3 m/s و V_t=0/51m/s

شکل 22 روند کاهشی تعداد حباب‌ها بر حسب زمان برای اندازه های مختلف آنها در حالت V_j= 6/3 m/s و V_t=0/51m/s

4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله به ارائه روش و نتایج حاصل از اندازه‌گیری عمق نفوذ و نحوه توزیع حباب‌های هوای وارد شده به داخل سیال، در اثر برخورد یک جت سیال با مقطع دایره‌ای که با سرعت‌های مختلف افقی در حال حرکت بر روی یک استخر سیال ساکن است برای دو سیال آب معمولی و آب دریا با استفاده از روش‌های اپتیکی پرداخته شده است. پیش از این بررسی‌هایی در زمینه تشکیل حباب در اثر برخورد جت سیال ساکن با سطح آب انجام شده اما در اینجا تأثیر حرکت افقی جت سیال و در نتیجه زاویه برخورد جت سیال با سطح توسط روش‌های اپتیکی مورد بررسی قرار گرفته است. در اندازه‌گیری‌ها مشخص شد که عمق نفوذ حباب‌ها در داخل سیال با افزایش سرعت عمودی جت سیال افزایش یافته درحالی‌که با افزایش سرعت افقی جت سیال عمق نفوذ حباب‌ها کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه در این رابطه عمق نفوذ حباب‌های هوا برای نسبت‌های مختلف سرعت افقی به سرعت عمودی جت سیال و یا به عبارتی زاویه برخورد جت سیال است. اگرچه با افزایش زاویه برخورد جت سیال عمق نفوذ حباب‌ها بیشتر می‌شود ولی مادامی که نسبت سرعت افقی به سرعت عمودی جت سیال یکسان باشد، عمق نفوذ حباب‌ها نیز یکسان خواهد بود.

از دیگر نتایج قابل‌ذکر در این مطالعه می‌توان به اثر نوع سیال (آب معمولی و آب دریا) بر نتایج بدست آمده اشاره نمود، با وجود اینکه عمق نفوذ هوا در دو نوع سیال متفاوت ذکر شده تفاوت چندانی از خود نشان نمی‌دهد ولی تعداد و اندازه حباب‌ها به طور محسوسی در آب دریا نسبت به آب معمولی متفاوت است به گونه‌ای که در آب دریا تعداد حباب‌ها به شدت افزایش یافته و اندازه آن‌ها کوچک شده است. همانطور که در مراجع[20،19] اشاره شده است، این پدیده به دلیل عدم اتصال حباب های ورودی به یکدیگر در آب دریا در اولین مرحله ورود هوا به داخل سیال است. این در حالی است که در حالتی که از آب معمولی استفاده می‌شود، در مرحله اول به خاطر اینرسی موجود در جت سیال حباب‌های هوا به سمت پایین حرکت کرده و در این مسیر حباب‌ها به هم متصل شده و حباب‌های بزرگتر را تشکیل می‌دهند. درصورتی که هنگامی که از آب دریا استفاده می‌شود این به هم چسبیدگی حباب‌ها در مرحله اول به خوبی صورت نگرفته و باعث عدم تشکیل حباب‌های بزرگ و ایجاد حباب‌های ریز با تعداد قابل توجه در داخل

سیال می‌شود. همچنین در مطالعه حاضر مشخص شد که برای هر کدام از سیالات به‌کاررفته در این پژوهش (آب معمولی یا آب دریا) نسبت تعداد حباب‌های کوچک به حباب‌های بزرگ با افزایش عمق به صورت محسوسی افزایش یافته و این به معنی حضور حباب‌هایی با اندازه بزرگ در نزدیک سطح آزاد سیال است. طبق نتایج این پژوهش تعداد حباب‌های بزرگ پس از مرور زمان و یا با دور شدن از محل برخورد جت با سطح آزاد سیال به صورت محسوسی کاهش‌یافته و عملاً این حباب‌های بزرگ هستند که با سرعت زیاد در حال ترک محیط هستند که این نشان‌دهنده رابطه نیروی شناوری با اندازه حباب‌های ایجاد شده درون سیال است که در آن هر چه اندازه حباب‌ها بزرگ‌تر باشد، نیروی شناوری اثر خود را بیشتر نشان داده و باعث خروج هر چه سریع‌تر آن‌ها از محیط می‌شود.

5- فهرست علائم

A_0	شدت نور
A_1	وضوح
A_2	شعاع دوایر
d_p	عمق نفوذ (mm)
d	قطر حباب (mm)
D_i	قطر نازل (mm)
D_j	قطر جت (mm)
I	شدت نور
V_t	سرعت افقی جت عمودی (ms^{-1})
V_j	سرعت عمودی جت (ms^{-1})
x	فاصله از صفحه کانونی (mm)
θ	زاویه برخورد جت سیال (درجه)

6- مراجع

[1] H. Chanson, L. Jaw-Fang, Plunging jet characteristics of plunging breakers, *Coastal Engineering,* Vol. 31, pp. 125-141, 1997.
[2] J. P. Kockx, F. T. M. Nieuwstadt, R. V. A. Oliemans, R. Delfos, Gas entrainment by a liquid film falling around a stationary Taylor bubble in a vertical tube, *International Journal of Multiphase Flow,* Vol. 31, No. 1, pp. 1-24, 2005.
[3] A. K. Bin, Gas entrainment by plunging liquid jets, *Chemical Engineering Science,* Vol. 48, No. 21, pp. 3585-3630, 1993.
[4] I. R. Wood, *Air Entrainment in Free-surface Flow: IAHR Hydraulic Structures Design Manuals 4,* Rotterdam: Balkema, 1991.
[5] K. T. Kiger, J. H. Duncan, Air Entrainment Mechanisms in Plunging Jets and Breaking Waves, *Annual Review of Fluid Mechcanics,* Vol. 44, pp. 563-596, 2011.
[6] H. Chanson, S. Aoki, A. Hoque, *Similitude of Air Entrainment at Vertical Circular Plunging Jet,* Procceding of ASME FEDSM'02, Fluid Engineering Division Summer Meeting, Montreal, Quebec, Canada, July 14-18, Paper 2002-31024, pp. 1-6, 2002.
[7] H. Chanson, S. Aoki, A. Hoque, Physical modelling and similitude of air bubble entrainment at vertical circular plunging jets, *Chemical Engineering Science,* Vol. 59, No. 4, pp. 747-758, 2004.
[8] T. J. Lin, H. G. Donnelly, Gas bubble entrainment by plunging laminar liquid jets, *AIChEJ,* Vol. 12, No. 3, pp. 563-571, 1966.
[9] A. T. Sheridan, Surface entrainment of air by a water jet, *Nature,* Vol. 209, pp. 799-800, 1966.
[10] A. K. Bin, Minimum air entrainment velocity for vertical plunging liquid jets, *Chem. Eng. Sci,* Vol. 43, No. 2, pp. 379-389, 1988.
[11] D. A. Ervine, E. McKeogh, E. M. Elsawy, Effect of turbulence intensity on the rate of air entrainment by plunging water jets, *Proc. Inst. Civ. Eng., Struct. Build,* Vol. 69, No. 2, pp. 425-445, 1980.
[12] M. EL Hummuumi, J. L. Achard, L. Davous, , Measurement of air entrainment by vertical plunging liquid jets, *Experiments in Fluids,* Vol. 32, pp. 624-638, 2002.
[13] E. J. McKeogh, E. M. Elsawy, Air entrainment rate and diffusion pattern of plunging liquid jets, *Chem. Eng. Sci*., Vol. 36, No. 7, pp. 1161-1172, 1981.
[14] D. Chirichella, R. Gomez-Ledesma, K. T. Kiger, J. H. Duncan, Incipient air entrainment in a translating axisymmetric plunging laminar jet, *Physics of Fluids,* Vol. 14, No. 2, pp. 781-790, 2002.
[15] B. Kersten, C. Ohl, A. Prosperetti, Transient impact of a liquid column on a miscible liquid surface, *Physics of Fluids,* Vol. 15, No. 3, pp. 821-824, 2003.
[16] W. Soh, B. Khoo, W. Yuen, The entrainment of air by water jet impinging on a free surface, *Exp. Fluids,* Vol. 39, pp. 496-504, 2005.
[17] R. Gomez-Ledesma, K. T. Kiger, J. H. Duncan, The impact of a translating plunging jet on a pool of the same liquid, *J. Fluid Mech,* Vol. 680, pp. 5-30, 2011.
[18] H. N. Oguz, A. Prosperetti, A. Kolaini, Air entrapment by a falling water mass, *J. Fluid Mech,* Vol. 294, pp. 181-207, 1995.
[19] C. E. Blenkinsopp, J.R. Chaplin, Validity of small scale physical models involving breaking waves, *In Proccesding 22nd International Worlshope on Water Waves and Floating Bodies,* Plitvice, Croatia, 2007.
[20] A. K. Roy, B. Maiti, P.K. Das, Visualisation of air entrainment by a plunging jet, *Procedia Engineering,* Vol. 56, No. 1, pp. 468-473, 2013.
[21] A. Vaidelienė, V. Vaidelys, Air bubbles and water droplets entrainment and removal in turbulent water flows, *Mechanika,* Vol. 18, No. 1, pp. 56-62, 2012.
[22] X. L. Qu, L. Kaezzer, D. Danciu, M. Labois, D. Lakehal, Characterization of plunging liquid jets: A combined experimental and numerical investigation, *International Journal of Multiphase Flow,* Vol. 37, No. 7, pp. 722-731, 2011.
[23] B. Jahne, P. Geibler, Depth from focus with one image, *Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recongnition,* Seattle, 1994.