



بررسی دوبعدی جریان جابجایی آزاد حول یک استوانه افقی داغ غوطه ور در آب با استفاده از تکنیک PIV

غلامحسین طاهریان<sup>۱</sup>، مهدی نیلی احمدآبادی<sup>۲\*</sup>، محمد ضابطیان<sup>۳</sup> و مهران کرباسی‌پور<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۲/۰۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۰۷/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۲۶

چکیده

در تحقیق حاضر میدان جریان حاصل از پدیده جابجایی آزاد حول استوانه فلزی با شار حرارتی یکنواخت با استفاده از تکنیک PIV مورد بررسی تجربی قرار می‌گیرد. آزمایش‌ها در یک ظرف مکعبی حاوی سیال آب که سطح آزاد آن با هوا در ارتباط است و یک استوانه فلزی که بطور افقی از دیواره جانبی آن عبور کرده است، انجام می‌شود. برای ایجاد جریان دوبعدی، دو صفحه موازی داخل ظرف قرار می‌گیرد و سپس، استوانه فلزی از میان آن عبور می‌کند. آزمایش برای ارتفاع‌های مختلف آب صورت گرفته و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه می‌شود. برای اندازه‌گیری سرعت جریان در ناحیه موردنظر از روش سرعت‌سنجی PIV استفاده می‌شود. این آزمایش‌ها توسط یک لیزر ۲۰۰ میلی وات پیوسته و یک دوربین CCD ۲۵ فریم بر ثانیه صورت می‌گیرد. در این آزمایش‌ها، در یک بازه زمانی مشخص با ردیابی ذرات هم چگالی با آب میدان جریان اطراف استوانه در لحظات متوالی بدست می‌آید. تحلیل‌های متوالی میدان جریان در لحظات مختلف، میدان جریان غیردائم را بدست می‌آورد. نتایج نشان می‌دهد علی‌رغم حذف اثرات سه بعدی جریان، میدان جریان شدیداً نوسانی و غیردائم است.

کلمات کلیدی: جابجایی آزاد؛ استوانه؛ شار حرارتی یکنواخت؛ اندازه‌گیری PIV؛ توزیع سرعت.

Two-dimensional investigation of free convection flow around a heated horizontal cylinder immersed in water using PIV technique

Gh. Taherian<sup>1</sup>, M. Nili-Ahmadabadi<sup>2,\*</sup>, M. Zabetian<sup>3</sup> and M. Karbasipour<sup>1</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Mech. Eng., Isfahan University of Tech., Isfahan, Iran

<sup>2</sup> Assist. Prof., Mech. Eng., Isfahan University of Tech., Isfahan, Iran

<sup>3</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Sharif University of Tech., Tehran, Iran

Abstract

In the current study, the phenomenon of free convection around a metal cylindrical with uniform heat flux is experimentally investigated using PIV technique. The experimental tests are performed in a cubic container that contains liquid water with free surface which a metal rod horizontally passes through it. To create a two-dimensional flow, two parallel planes are inserted in the container and then, the metal rod is passed through it. The tests are performed for different heights of water and their results are compared with each other. To measure flow velocity in a specified region, the PIV technique is used. The tests are implemented by using a 200 mW laser and a CCD camera of 25 fps. In the experiments, the particles having the same density of water are tracked through the container in a specified time interval to calculate the flow field around the rod. sequence analyses of flow field during the different moments obtains the unsteady flow field. Although removing the 3D effects of flow, the results show that the flow field is strongly oscillatory and unsteady.

Keywords: Free convection; Cylinder; Uniform heat flux; PIV measurement; Velocity distribution.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۳۱۱۳۹۱۵۲۴۰، فکس: ۰۳۱۱۳۹۱۲۶۲۸

آدرس پست الکترونیک: [m.nili@cc.iut.ac.ir](mailto:m.nili@cc.iut.ac.ir)

## ۱- مقدمه

جابجایی آزاد بر روی استوانه افقی پدیده‌ای است که در موارد زیادی در صنعت کاربرد دارد. انتقال حرارت از سیم‌های انتقال برق، مبدل‌های حرارتی، انتقال حرارت از لوله‌ها و ... تعدادی از کاربردهای آن است. در سیستم‌های انتقال برق فشار قوی، عبور برق از سیم‌ها سبب افزایش دمای آن به مقدار زیاد می‌شود. در نتیجه، افزایش انتقال حرارت برای پایین آوردن دمای سیم‌ها بسیار حایز اهمیت است. همچنین در مبدل‌های حرارتی افزایش انتقال حرارت از لوله‌های دایره-ای شکل بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این امر در خطوط لوله انتقال سیال با دمای بالا نیز مطرح است. برای بررسی این پدیده تحقیقات زیادی انجام گرفته است. تعدادی از این پژوهش‌ها به بررسی تحلیلی و عددی این پدیده پرداخته‌اند [۷-۱].

فوجی<sup>۱</sup> [۱] جابجایی آزاد در حالت دائم و آرام در بالای یک منبع حرارتی خطی و یک منبع حرارتی نقطه‌ای را به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار داد. توزیع سرعت و توزیع دما برای اعداد پراپرتل ۰.۰۱ و ۰.۷ با استفاده از توابع ابتدایی (elementary function) محاسبه گردیده و مورد مقایسه قرار گرفت.

ایانی<sup>۲</sup> و همکاران [۲] جریان جابجایی آزاد بر روی یک منبع حرارتی خطی را در حالت غیر دایم و آرام به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. معادلات انتقال حرارت و مومنتم برای سیال و جامد (منبع حرارتی خطی) به صورت همزمان حل گردید. نتایج نشان داد معادلات انرژی خیلی زودتر از معادلات مومنتم به حالت دائم می‌رسند.

هنایی<sup>۳</sup> و همکاران [۳] انتقال حرارت جابجایی آزاد یک ردیف عمودی استوانه‌های افقی در یک ظرف با دیواره‌های عایق را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. در ابتدا فاصله‌ی بهینه‌ی دیواره‌های محدودکننده برای بیشترین مقدار انتقال حرارت جابجایی آزاد به روش تحلیلی پیش‌بینی شد. بررسی‌ها نشان می‌داد با افزایش تعداد استوانه‌ها و فاصله‌ی

آن‌ها از هم، فاصله بهینه‌ی دیواره‌های محدود کننده افزایش می‌یابد.

آنجلو<sup>۴</sup> و همکاران [۴] به بررسی انتقال حرارت استوانه-های افقی با قطرهای متفاوت به صورت دوبعدی در حالت دائم با استفاده از نرم‌افزار فلوتنت اهتمام نمودند.

در کنار پژوهش‌های عددی، کارهای زیادی انجام گرفت که برای بررسی این پدیده از روش تجربی استفاده کردند. آشکارسازی جریان یکی از امور پر کاربرد برای بررسی ویژگی‌های جریان بود.

اینکروپرا<sup>۵</sup> و یاگوری<sup>۶</sup> [۸] به بررسی اثر جابجایی آزاد یک استوانه و همچنین آرایشی از پنج استوانه کنار هم در یک ظرف که با هوای آزاد در ارتباط بود پرداختند. برای بررسی جریان سیال از آشکارسازی با رنگ و همچنین برای بررسی انتقال حرارت از نصب ترموکوپل در اطراف استوانه‌ها استفاده کردند. آرایش استوانه‌ها و همچنین واکنش جریان ناشی از استوانه‌ها با سطح آزاد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌داد لایه‌مرزی جابجایی آزاد که بر روی سیلندر تشکیل می‌شود، آرام بوده و ادغام لایه‌مرزی در بالای استوانه بدون جدایش صورت می‌گیرد. این اثرات بین سطح میان هوا و آب و جریان سیال است که باعث می‌شود یک منطقه‌ی افقی آشفته به همراه ورتکس‌های دایره‌ای در بالای استوانه به‌وجود آید.

شور<sup>۷</sup> و گبهارت<sup>۸</sup> [۹] جریان حول یک منبع حرارتی خطی افقی در داخل مایع و هوا را به صورت تجربی بررسی کردند. برای بررسی انتقال حرارت اطراف منبع حرارتی از دستگاه تداخل‌سنج استفاده شد. همچنین به آشکارسازی جریان در بالای منبع برای بررسی ویژگی‌های جریان اهتمام شد.

کیتامورا<sup>۹</sup> و همکاران [۱۰] با استفاده از آشکارسازی جریان نشان دادند که با افزایش عدد رایلی، نقطه‌ی جدایش در بالای استوانه به سمت بالا دست انتقال می‌یابد. پس از این نقطه‌ی جدایش، آشفستگی جریان مشاهده و ایجاد می-

<sup>4</sup> Angelo

<sup>5</sup> Incropera

<sup>6</sup> Yaghoury

<sup>7</sup> Schorr

<sup>8</sup> Gebhart

<sup>9</sup> Kitamura

<sup>1</sup> Fujii

<sup>2</sup> Ayani

<sup>3</sup> Hannani

جریان را نشان دهد، نمایانگر پارامترهای کمی جریان سیال باشد مورد اهمیت قرار می‌گیرد.

در این تحقیق سعی بر این است که جریان سیال بر روی یک استوانه افقی که شار حرارتی ثابتی تولید می‌کند، با استفاده از تکنیک PIV به صورت دوبعدی مورد مطالعه قرار گرفته و بر روی پارامترهای جریان سیال بحث شود. اثرات ارتفاع سیال بر روی استوانه در حالات مختلف بررسی می‌شود تا نسبت به تحقیقات گذشته علاوه بر اطلاعات کیفی، سرعت جریان در یک ناحیه دوبعدی محاسبه شود. با استفاده از اندازه‌گیری میدان سرعت می‌توان پارامترهای موثر در افزایش انتقال حرارت را پیدا کرده و در طراحی موارد کاربرد استوانه افقی با شار حرارتی ثابت که به آن اشاره شد به کار برد. از مزایای این روش، نسبت به سایر ابزار اندازه‌گیری سرعت این است که اولاً سایر ابزار اندازه‌گیری سرعت، تنها سرعت در یک نقطه را اندازه‌گیری می‌کنند، در حالی که با استفاده از این روش، سرعت در یک صفحه دوبعدی قابل اندازه‌گیری است. همچنین در این روش تمامی تجهیزات آزمایش در بیرون از سیال قرار دارند و هیچ مزاحمی در جریان سیال وجود نخواهد داشت. آزمایش برای دوبار در شرایط آزمایشگاهی کاملاً متفاوت انجام گردید و نتایج تا اندازه‌ی بسیار زیادی بر هم انطباق داشت.

## ۲- بستر آزمایش

در این آزمایش از یک ظرف از جنس پلکسی گلاس با سطح مقطع  $10 \times 10$  سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر استفاده شده است. برای اطمینان از ایجاد جریان دوبعدی، دو صفحه موازی از جنس پلکسی گلاس به فاصله‌ی یک سانتی‌متر در داخل ظرف نصب گردیده است که در واقع فضایی با سطح مقطع  $10 \times 1$  سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در داخل ظرف ایجاد شده است. علت انتخاب فاصله یک سانتی‌متر در این است که ضخامت صفحه لیزر برابر ۶ میلی‌متر است. فاصله انتخابی باید به صورتی باشد که اولاً دربرگیرنده‌ی این ضخامت به طور کامل باشد و ثانیاً آن قدر بزرگ نباشد که اثرات سه‌بعدی در آن قابل مشاهده باشد. در نتیجه فاصله انتخابی برابر یک سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

برای ایجاد استوانه افقی با شار گرمایی ثابت از یک هیتر فشنگی 200w با قطر یک سانتی‌متر که با جریان AC و

شود. ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌داد که این ضریب در رژیم آشفته بیشتر خواهد بود.

آتایلماز<sup>۱</sup> و تکه<sup>۲</sup> [۱۱] به بررسی اثرات افزایش انتقال حرارت یک پوشش اسفنجی بر روی یک استوانه افقی با شار ثابت پرداختند. نتایج با استفاده از روش تجربی و عددی محاسبه گردیده و با هم مقایسه شدند.

اشجعی و همکاران [۱۲] جریان دوبعدی دائم جابجایی آزاد در بالای یک استوانه‌ی افقی دما ثابت در زیر یک سقف بی‌درو با استفاده از تداخل‌سنج مورد بررسی قرار دادند. تاثیرات نسبت فاصله استوانه با سقف به قطر استوانه ( $L \setminus D$ ) برای اعداد رایلی بین ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد برای ( $L \setminus D > 1/5$ ) سقف هیچ تاثیری بر روی جابجایی آزاد استوانه ندارد، ولی با کاهش این نسبت تا ۰.۵ عدد ناسلت به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. با کاهش دوباره این نسبت به مقدار کمتر از ۰.۵ عدد ناسلت به‌صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. آشکارسازی جریان با استفاده از دود برای نمایش وجود یا عدم وجود ورتکس‌ها و محل آنها انجام گرفت.

رضایی و همکاران [۱۳] نیز با استفاده از تداخل سنج و آشکارسازی با دود تاثیر دوصفحه بی‌درو با زاویه‌های مختلف را در اطراف یک استوانه با اعداد رایلی در محدوده ۱۰۰۰ تا ۵۵۰۰۰ بررسی کردند. مشاهده گردید در اعداد رایلی کمتر از ۵۵۰۰ وجود دو صفحه سبب کاهش میزان انتقال حرارت می‌شود. تغییر زاویه‌های دو صفحه نیز تاثیری در میزان انتقال حرارت ندارد. در حالی که در اعداد رینولدز بین ۵۵۰۰ تا ۵۵۰۰۰ اضافه کردن دو صفحه سبب افزایش انتقال حرارت می‌شود. افزایش زاویه صفحه‌ها از صفر تا ۲۰ درجه سبب کاهش میزان انتقال حرارت استوانه می‌شد.

آنچه که در تحقیقات تجربی انجام گرفته مشهود بود، این است که آشکارسازی جریان با وجود این که نمایانگر حرکت سیال است، ولی صرفاً یک روش کیفی است و برای بررسی پارامترهای دیگر جریان کاربرد نخواهد داشت. در نتیجه استفاده از روشی که بتواند علاوه بر این که شکل کیفی

<sup>1</sup> Atayılmaz

<sup>2</sup> Teke

در این تحقیق، لیزر مورد استفاده، یک لیزر پیوسته با توان ۲۰۰ میلی‌وات است که پرتو خروجی آن با استفاده از یک لنز استوانه‌ای به یک صفحه تبدیل می‌شود. دوربین نیز یک دوربین با رزولوشن مکانی  $600 * 800$  و سرعت عکس-برداری ۲۵ فریم بر ثانیه است. از گلوله‌های شیشه‌ای توخالی با اندازه ۱۰ و ۲۰ میکرون نیز به‌عنوان ذره استفاده می‌شود.

#### ۴- پردازش تصویر

برای پردازش تصویر، دو عکس متوالی با هم مقایسه می‌شوند و حرکت ذرات مشاهده می‌شود. بدین ترتیب که باید یک ذره را دنبال کرد و تغییر مسیر آن را مشاهده کرد. برای اینکه بتوان ردیابی مؤثری داشت، به جای تک تک ذرات (در روش PTV) یک دسته از آن‌ها دنبال می‌شود و بررسی می‌شود که در عکس دوم به کجا منتقل شده‌اند. برای بررسی کمی و نه کیفی دو عکس، آن‌ها به ماتریس‌هایی از اعداد تبدیل شده، که عدد بزرگتر به معنی نور بیشتر است. سپس ماتریس اصلی به ماتریس‌های کوچکتری تقسیم می‌شود. هر یک از این ماتریس‌های کوچکتر، نماینده یک دسته ذرات (که پیش تر ذکر شد) هستند. این ماتریس‌ها، پنجره پوش نامیده می‌شوند. حال باید در عکس دوم به دنبال دسته ذرات اولی گشت، یعنی الگویی که مشابه آنها باشد. در بررسی کمی، باید ماتریسی حتی الامکان مشابه ماتریس اول را در عکس دوم پیدا کرد. تشابه دو ماتریس را به صورت معادله (۱) تعریف می‌کنند و آن را ضریب همبستگی می‌نامند. هر چه این ضریب به یک نزدیک‌تر باشد، جست‌و جوی دقیقتر انجام گرفته است. در این رابطه  $\bar{A}$  و  $\bar{B}$  مقادیر متوسط ماتریس A و B هستند.

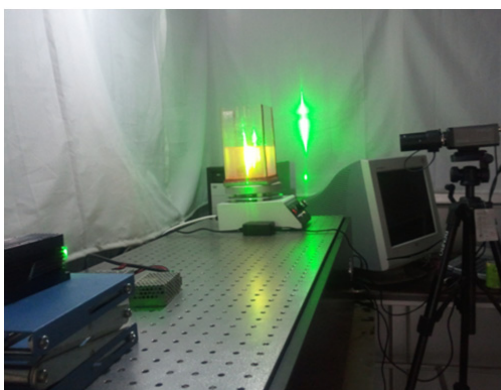
$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}} \quad (1)$$

لذا در ماتریس عکس دوم، ماتریسی جست‌وجو می‌شود که بیشترین همبستگی را با پنجره‌ی پوش اول داشته باشد. فاصله‌ی بین مراکز دو ماتریس، جابه‌جایی نقطه‌ی مرکزی ماتریس اول را نشان می‌دهد. البته نیازی به جست‌وجوی کل عکس دوم نیست، می‌توان تنها یک ماتریس بزرگتر را در اطراف ماتریس پوش تعریف کرد، و جست‌وجو را تنها در آن انجام داد. اختلاف بین ماتریس جست‌وجو و ماتریس پوش را می‌توان به صورت چشمی تعیین کرد، یعنی با مشاهده

۲۲۰ ولت کار می‌کند، استفاده شده است. برای تنظیم شار استوانه از یک تنظیم‌کننده ولتاژ که ولتاژ ورودی به استوانه را تنظیم می‌کند استفاده می‌شود. در این آزمایش از ولتاژ ۱۳۰ ولت استفاده شده است. هیتر در فاصله ۷.۵ سانتی‌متری کف ظرف نصب گردیده است.

در شکل ۱ بستر آزمایش شامل میز ضد ارتعاشات، رایانه، لیزر، دوربین و ظرف مورد آزمایش به همراه هیتر آورده شده است. لازم به ذکر است سطح مقطع بالای ظرف باز بوده و با هوا در ارتباط است.

آزمایش دوبار در شرایط آزمایشگاهی کاملاً متفاوت انجام گردید و نتایج تا اندازه بسیار زیادی بر هم انطباق داشت.



شکل ۱- بستر آزمایش PIV

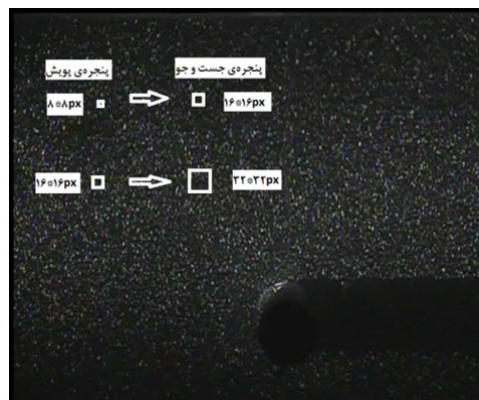
در تکنیک PIV تعدادی ذره به سیال مورد نظر اضافه می‌شود، ذرات باید چگالی نزدیک به چگالی سیال داشته باشند تا از حرکت سیال پیروی کنند. با استفاده از لیزر یک صفحه مشخص از سیال مورد نظر روشن می‌شود. برای ایجاد این صفحه روشن از یک لنز استوانه‌ای در برابر لیزر استفاده می‌شود. ذرات داخل سیال بر اثر تابش نور لیزر روشن گردیده و ردیابی می‌شوند. سپس با استفاده از دوربین از این صفحه روشن عکس‌برداری شده و با پردازش تصویر عکس-های بدست آمده، بردارهای سرعت سیال بدست می‌آید. در پدیده‌های سیالاتی هر چه سرعت پدیده بیشتر باشد، نیاز به دوربینی با سرعت بالاتر (عکس‌برداری با تعداد فریم بیشتر در ثانیه) است. هر چه سرعت عکس‌برداری دوربین بالاتر رود، زمان نورگیری دوربین (میزان نوری که به دوربین می‌رسد) کاهش می‌یابد و در نتیجه نیاز به لیزری با توان بالاتر است.

هرچه پنجره پویش کوچکتر باشد، مطلوب تر است. در حالت حدی بهتر است که سرعت را در تمامی پیکسل‌ها پیدا کرد تا در صورت نیاز، بتوان گرادیان‌ها را با دقت خوب محاسبه کرد. ولی هر چه اندازه آن کوچکتر می‌شود، بردارهای خطای بیشتری ظاهر می‌شود. در شکل ۳ بردارهای سرعت در یک زمان مشخص برای دو پنجره پویش و جست-وجوی یاد شده برای حالت  $L=4\text{cm}$  آورده شده است.

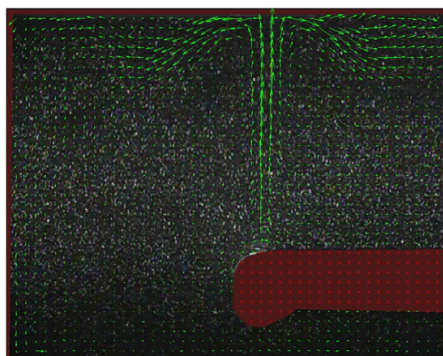
سرعتی که با استفاده از این الگوریتم برای نقاط مختلف سیال بدست می‌آید بر حسب پیکسل بر فریم است که باید به متر بر ثانیه تبدیل شود. برای این کار فاصله‌ای مشخص بر روی یکی از عکس‌ها در نظر گرفته می‌شود (برای مثال قطر استوانه که برابر یک سانتی متر است). این فاصله در برگیرنده تعدادی پیکسل بر روی عکس است. با یک نسبت ساده می‌توان اندازه هر پیکسل بر حسب متر را مشخص کرد. فاصله زمانی میان دو فریم نیز مشخص است. در نتیجه می‌توان پیکسل بر فریم را به متر بر ثانیه تبدیل کرد. در واقع دقت این روش یک پیکسل بر فریم است. برای بررسی اعتبار داده‌ها نیاز است که صحت برنامه کامپیوتری مورد استفاده بررسی شود. برای این کار از عکس‌های مینا که با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری معتبر مورد تحلیل قرار گرفته‌اند استفاده می‌شود و نتایج حاصل از تحلیل با استفاده از برنامه کامپیوتری، با نتایج معتبر موجود مقایسه می‌شود. در شکل ۴ نتایج با استفاده از برنامه‌ی کامپیوتری مورد استفاده و در شکل ۴ الف نتایج معتبر آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود نتایج تا اندازه بسیار زیادی با هم مطابقت دارند [۱۴].

عکس‌های متوالی، حرکت ذرات را دنبال کرد و بدین ترتیب ماتریس جستجو را به اندازه کافی بزرگتر از ماتریس اولیه در نظر گرفت. حال این کار را برای تمامی نقاط ماتریس شکل اول انجام داده می‌شود. البته نشان داده شده است که اگر پنجره‌های پویش، با یکدیگر ۵۰ درصد هم پوشانی داشته باشند کافی است، بیشتر از آن اطلاعات غیرمفید خواهد بود و کمتر از آن باعث از دست رفتن اطلاعات مفید می‌شود.

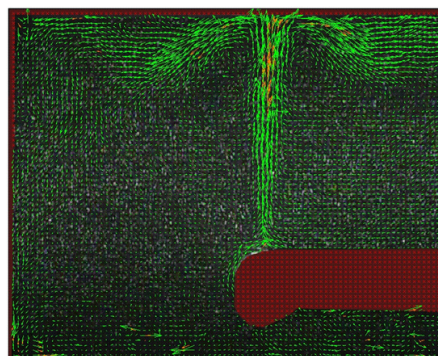
در این پژوهش، برای اندازه‌ی پنجره‌ی پویش  $8*8$  پیکسلی و اندازه پنجره جستجو  $16*16$  پیکسلی و همچنین پنجره پویش  $16*16$  پیکسلی و پنجره جستجو  $32*32$  پیکسلی نتایج بررسی شده و مورد مقایسه قرار گرفتند. در شکل ۲ یک عکس گرفته شده از ذرات، در آزمایش به همراه پنجره پویش و پنجره جستجو و نشان داده شده است.



شکل ۲- پنجره پویش و پنجره جست‌وجو بر روی ناحیه مورد بررسی

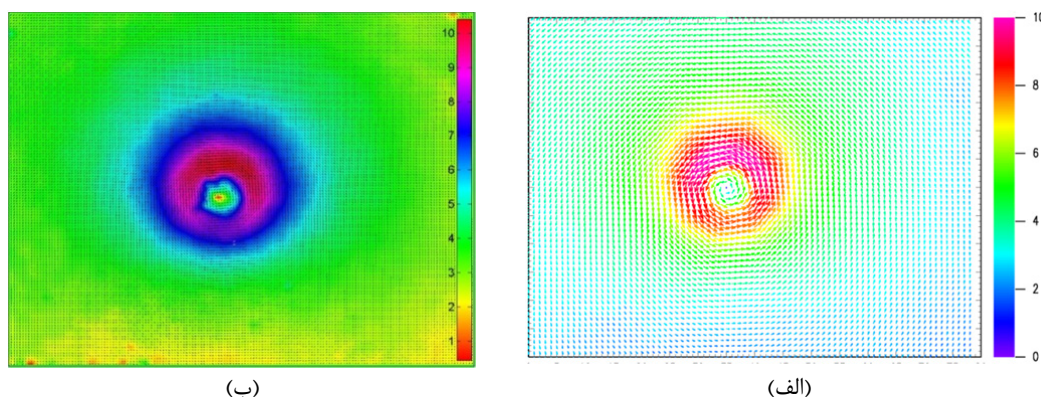


(ب)



(الف)

شکل ۳- (الف) بردارهای سرعت برای پنجره پویش  $16*16$  پیکسلی (ب) بردارهای سرعت برای پنجره پویش  $8*8$  پیکسلی



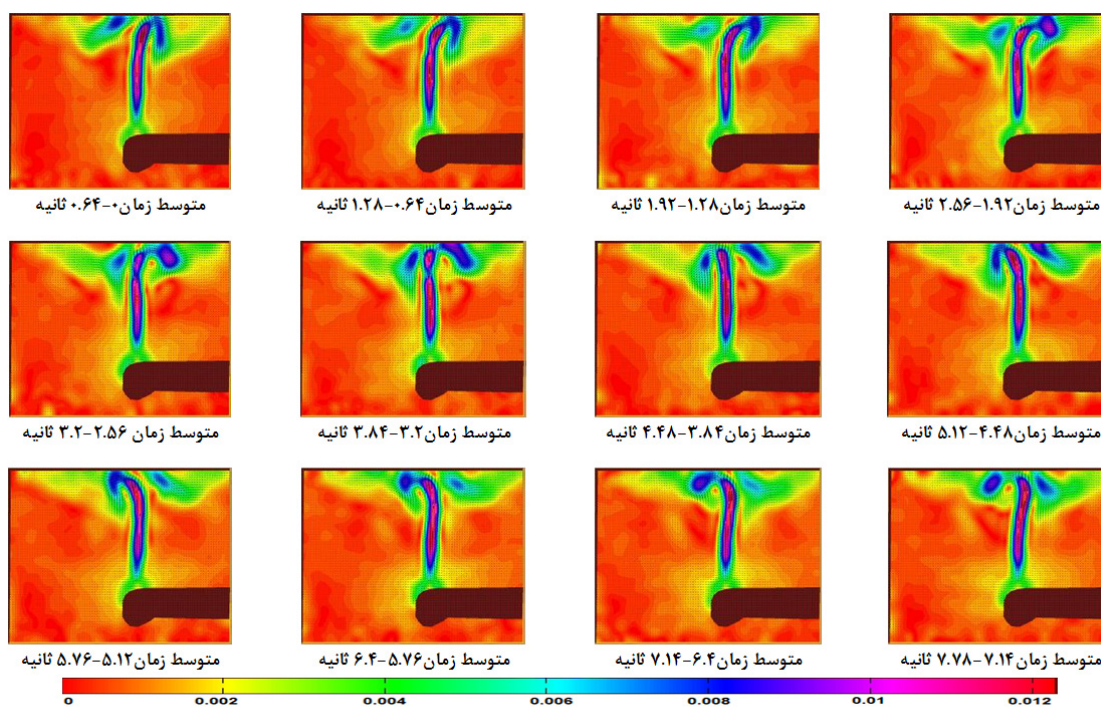
شکل ۴- (الف) کانتورهای سرعت معتبر (ب) کانتورهای سرعت با استفاده از برنامه کامپیوتری مورد استفاده

انتخاب گردیده است که شامل چندین پریود نوسانی باشد. در حالتی که  $L=4\text{cm}$  است، این مقدار برابر ۸ ثانیه می‌شود. هنگامی که سطح آب بیشتر می‌شود (شکل ۵ب) مانند حالت الف تا رسیدن به سطح آزاد جدایش اتفاق نمی‌افتد ولی پریود نوسانات افزایش یافته و برابر ۱۸.۲۶ ثانیه می‌شود. هنگامی که سطح آب بیشتر می‌شود (شکل ۵ج) قبل از رسیدن جریان سیال به بالای ظرف جدایش رخ داده و گردابه‌هایی در دو طرف استوانه به‌وجود می‌آید. در این حالت نیز نوسانات وجود دارد و گردابه‌ها همان گونه که در شکل ۵ ج مشخص است از یک سو به سوی دیگر می‌رود. در این حالت پریود نوسانات برابر ۱۳.۳۶ ثانیه است. همانطور که مشخص است هنگامی که ارتفاع آب کم است نیروی شناوری ناشی از جابجایی آزاد بر نیروی وزن آب غلبه داشته، سبب می‌شود که سیال به سطح آزاد برسد. همین نیروی شناوری است که سبب ایجاد نوسانات گردابه‌ها در نزدیکی سطح آب می‌شود. هر اندازه سطح آب افزایش پیدا می‌کند، نیروی وزن در برابر نیروی شناوری افزایش پیدا کرده و سبب خنثی شدن نیروی شناوری می‌شود. این امر سبب می‌شود با افزایش سطح آب، نوسانات در نزدیکی سطح آب کاهش پیدا کرده، پریود نوسانات افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر سطح آب، نیروی شناوری دیگر توان غلبه بر نیروی وزن را نداشته، سبب جدایش جریان بالای استوانه قبل از رسیدن به سطح آب می‌شود. در این حالت جریان ناپایدار شده و نوسانات دوباره افزایش می‌یابد.

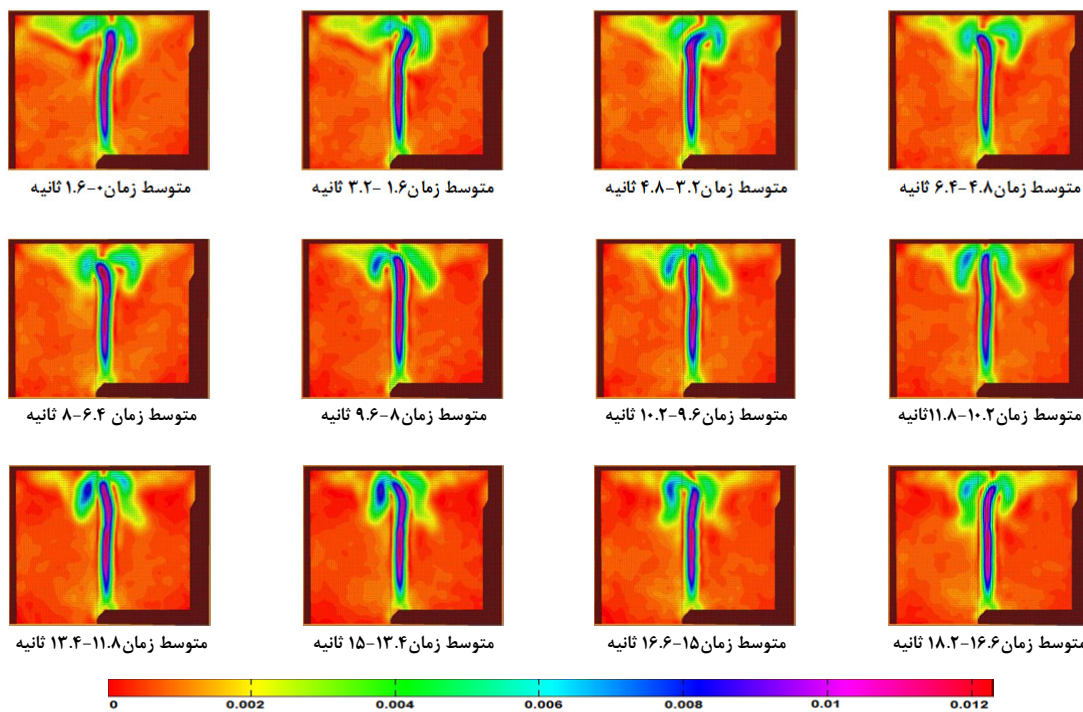
## ۵- بررسی نتایج

### ۵-۱- بررسی میدان جریان

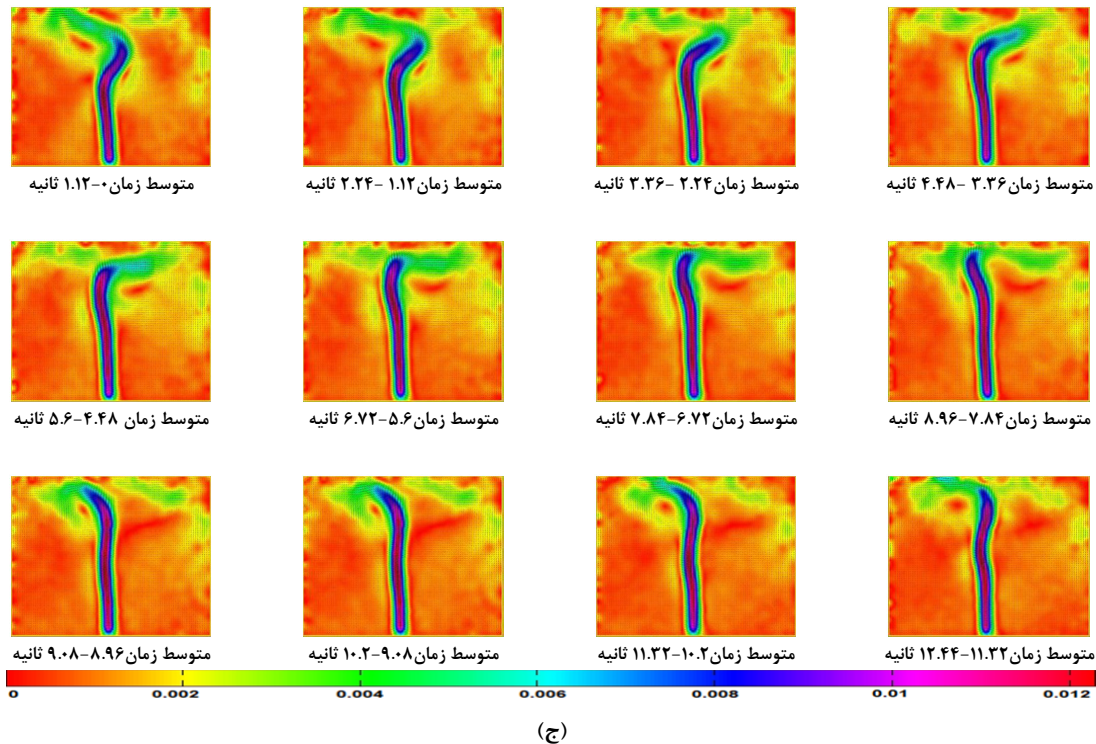
بردارها و کانتورهای سرعت جریان در یک ناحیه پیوسته دو بعدی برای سه ارتفاع مختلف آب درون ظرف محاسبه می‌شود. در شکل ۵ کانتورهای سرعت جریان برای یک پریود زمانی برای ارتفاع‌های مختلف آب آورده شده است. کانتورهای سرعت هر تصویر در شکل ۵، میانگین کانتورهای سرعت در بازه‌های زمانی قید شده است. آنچه از این تصاویر مشخص است، جریان سیال در تمامی حالات غیردایم است. جریان سیال از کناره‌های استوانه، جریان پیدا کرده و به صورت یک مسیر عمودی به سمت بالا حرکت می‌کند، این حرکت یک حرکت شتابدار است که از سرعت پایین در اطراف استوانه، به سرعت بیشینه در میانه‌های ظرف می‌رسد. در حالتی که ارتفاع آب کم است (شکل ۵ الف) جریان سیال به سطح آزاد رسیده و بر اثر واکنش با این سطح جدایش رخ داده و گردابه‌هایی در دو طرف استوانه به‌وجود می‌آید. این گردابه‌ها حرکت نوسانی داشته و از یک طرف استوانه به سمت دیگر منتقل می‌شوند. با بررسی جریان در یک بازه زمانی، پریود نوسانات برای ارتفاع‌های مختلف آب محاسبه می‌شود. این پریود برابر مدت زمانی است که طول می‌کشد که یک گردابه از یک سمت به سمت دیگر رفته و سپس دوباره به مکان اولیه خود بازگردد. به علت نوسانی بودن جریان بازه زمانی مورد بررسی باید حداقل در برگزیده دو پریود زمانی باشد. در تحقیق حاضر بازه زمانی به صورتی



(الف)



(ب)



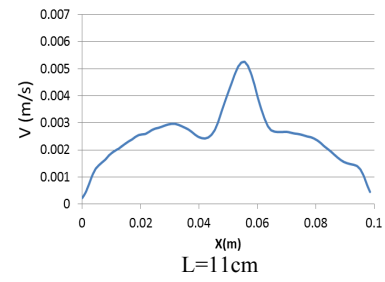
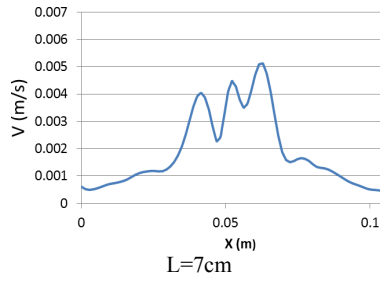
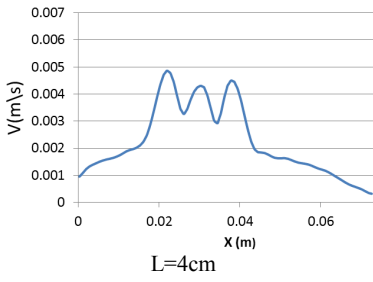
شکل ۵- (الف) کانتورهای سرعت جریان برای یک پریود زمانی ۸ ثانیه‌ای برای  $L=4\text{cm}$  (ب) کانتورهای سرعت جریان برای یک پریود زمانی ۱۸.۲۶ ثانیه‌ای برای  $L=7\text{cm}$  (ج) کانتورهای سرعت جریان برای یک پریود زمانی ۱۳.۳۶ ثانیه‌ای برای  $L=11\text{cm}$

جریان سیال بر روی استوانه به بالای ظرف نرسیده و دچار جدایش می‌شود، در نتیجه شرایط آن دیگر مشابه شرایط دو حالت دیگر (ارتفاع ۴ و ۷ سانتی‌متری آب بالای استوانه) نیست و همان‌طور که در نمودار مربوط به این حالت مشاهده می‌شود دیگر شاهد سه نقطه ماکزیمم در این سطح مقطع نخواهیم بود. هر چه به سمت سطح مقطع‌های پایین‌تر می‌رویم (۰.۴، ۰.۶، ۰.۸،  $y/L=0.8$ )، دو نقطه ماکزیمم که در دو سمت واقع شده‌اند کم‌کم از بین رفته و مقدار نقطه‌ی ماکزیمم میانی افزایش پیدا کرده و به مقدار بیشینه خود می‌رسد.

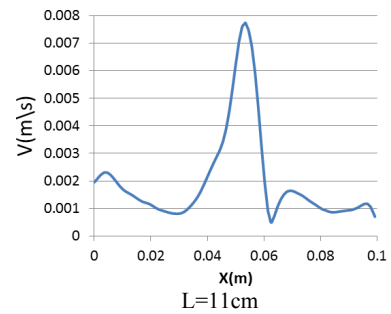
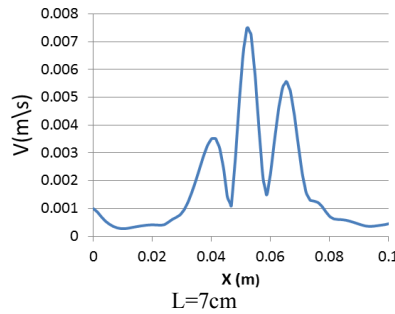
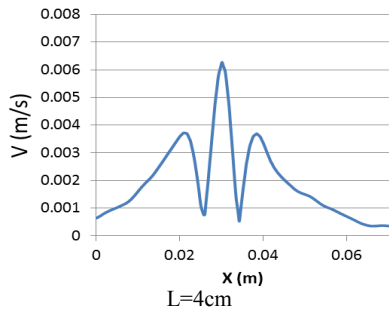
پدیده دیگری که در این نمودارها مشهود است، برای حالتی که  $L=4, 7\text{cm}$  است، تقارن نسبتاً خوبی در نمودارها وجود دارد، که این تقارن در حالت  $L=11\text{cm}$  به علت جدایش جریان تا حدودی از بین می‌رود.

در شکل ۶ نمودارهای مقدار سرعت در مقاطع مختلف در سه سطح مختلف آب برای میانگین سرعت در یک پریود زمانی برای هر حالت آورده شده است. مقدار سرعت برای مقاطع  $y/L = 0.4, 0.6, 0.8, 0.9$  آورده شده است. حال به تفکیک درباره‌ی سرعت در مقاطع مختلف صحبت می‌شود. در مقطع  $y/L=0.9$  که در واقع سطح مقطع نزدیک به سطح آب است، سه نقطه‌ی ماکزیمم نسبی وجود دارد. علت به وجود آمدن این نقاط در این است که به دلیل برخورد جریان سیال ناشی از استوانه با سطح تماس آب و هوا، جدایش رخ داده و دو عدد ورتکس در دو طرف استوانه به وجود می‌آید. در واقع نقطه ماکزیمم میانی به علت جریان سیال در بالای استوانه و دو نقطه ماکزیمم در دو طرف به علت وجود دو ورتکس در اطراف است. هنگامی که سطح آب به بیشترین مقدار خود می‌رسد ( $L=11\text{cm}$ )، شرایط تا حدودی دچار تغییر می‌شود. همان‌طور که گفته شده در این حالت دیگر

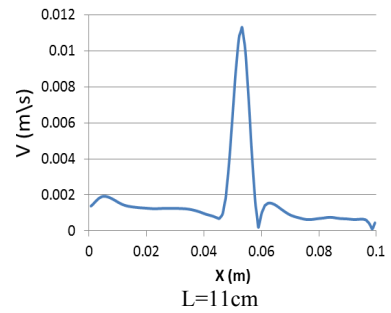
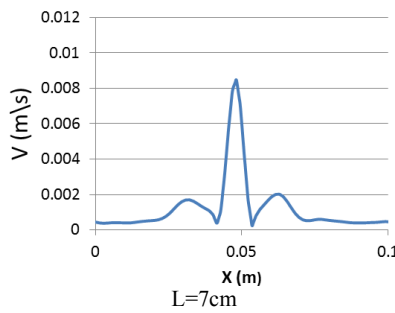
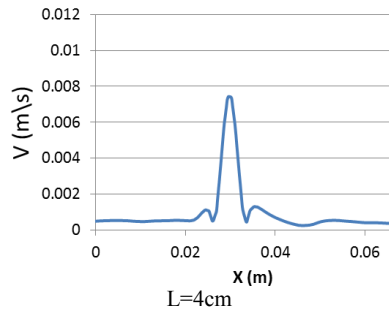




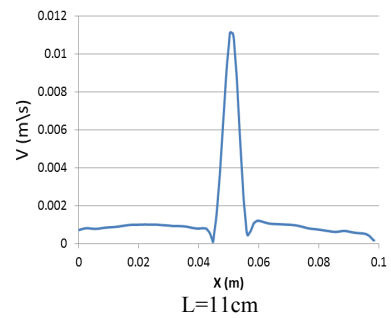
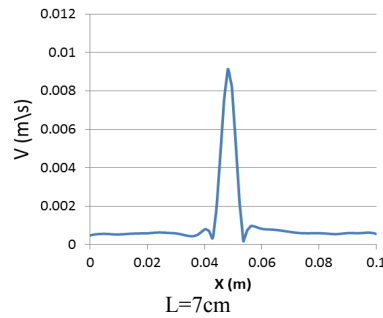
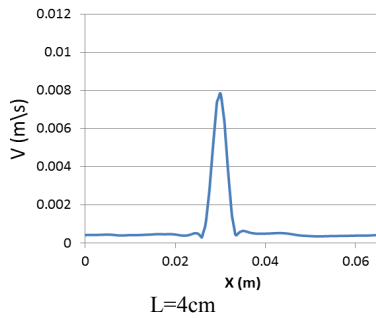
شکل ۶ (الف)



شکل ۶ (ب)



شکل ۶ (ج)



شکل ۶ (د)

شکل ۶ (الف) توزیع سرعت در مقطع  $y/L=0.9$  (ب) توزیع سرعت در مقطع  $y/L=0.6$  (ج) توزیع سرعت در مقطع  $y/L=0.8$  (د) توزیع سرعت در مقطع  $y/L=0.4$

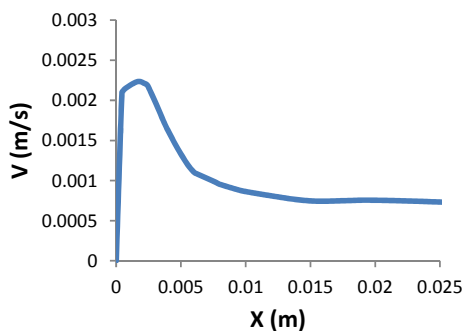
## ۵-۲- بررسی سرعت در مقطع عمود بر استوانه

در شکل ۷ سرعت در یک مقطع ۴۵ درجه عمود بر سطح استوانه برای حالت‌های  $L = 4, 7 \text{ cm}$  آورده شده است. سرعت از یک مقدار بسیار کم اطراف استوانه شروع شده، سپس به یک میزان بیشینه می‌رسد. بعد از آن کاهش پیدا کرده و در آخر نیز ثابت می‌شود. همان‌طور که مشخص است برای سطوح مختلف آب، این نمودارها تقریباً شبیه هم هستند. با استفاده از این نمودارها اندازه ضخامت لایه مرزی در اطراف استوانه قابل اندازه‌گیری است.

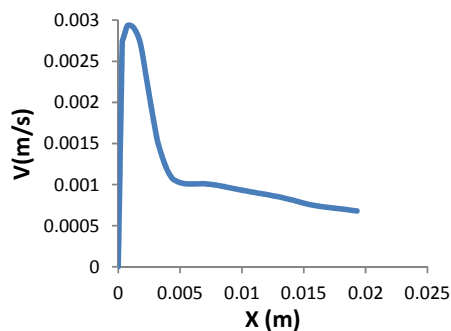
## ۵-۳- بررسی سرعت روی خط واصل نقطه بالای استوانه و نقطه وسط سطح آزاد

در شکل ۸ سرعت بر روی خط واصل عمودی میان وسط سطح آزاد و نقطه میانی فاصله سطح آزاد و استوانه در بالای استوانه برای ارتفاع‌های مختلف آب برای متوسط یک پرپود زمانی نشان داده شده است. در جابجایی آزاد علت

حرکت سیال نیروی شناوری ناشی از گرما است. در واقع اختلاف دما بین دو ناحیه سیال سبب حرکت می‌شود. در ناحیه مورد آزمایش به علت اینکه اختلاف دمای بین سطح استوانه و مقاطع مختلف سیال ثابت فرض می‌شود، در نتیجه نیروی شناوری ناشی از گرما نیز ثابت است و فرض شتاب ثابت برای حرکت سیال فرض نسبتاً صحیحی است. هنگامی که سیال با شتاب ثابت حرکت می‌کند، نمودار سرعت سیال بر حسب جابجایی باید از معادله‌ی  $V = A \times \sqrt{X}$  پیروی کند. در نمودارهای رسم شده (الف و ب و ج) این امر کاملاً مشخص و قابل مشاهده است. برای حالات  $L = 4, 7 \text{ cm}$  یک فرورفتگی در نمودار ایجاد می‌شود. هنگامی که سیال با سطح آزاد برخورد می‌کند، نیرویی از طرف سطح به سیال وارد می‌شود، علت ایجاد این کاهش سرعت هم وجود همین برخورد است. همان‌طور که مشخص است در حالت  $L = 11 \text{ cm}$  که جدایش جریان اتفاق می‌افتد، جریان با سطح آزاد برخورد نکرده، این فرورفتگی هم مشاهده نمی‌شود.

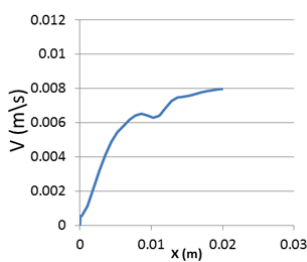


L=7cm (ب)

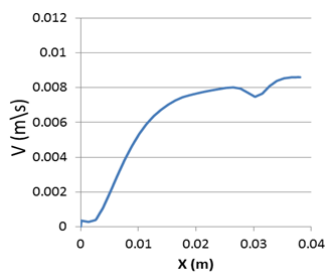


L=4cm (الف)

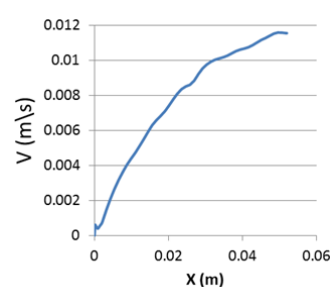
شکل ۷- توزیع سرعت در مقطع ۴۵ درجه عمود بر سطح استوانه



L=4cm (ج)



L=7cm (ب)



L=11cm (الف)

شکل ۸- توزیع سرعت خط واصل نقطه بالای استوانه و نقطه وسط سطح آزاد

- and a point heat source, *Int. J. Heat Mass Transfer* 6: 597–606.
- [2] Ayani MB, Esfahani JA, Niazmand H, Sousa ACM (2005) Transient laminar convection induced by a line heat source: a numerical study with primitive variables. *Scientia Iranica*, 12(2): 247–254.
- [3] Kazemzadeh Hannani S, Sadeghipour MS, Nazaktabar MN (2002) Natural convection heat transfer from horizontal cylinders in a vertical array confined between parallel walls. *IJE Transactions A: Basics* 15(3): 293–302.
- [4] Angelo D, Levoni P, Barozzi G (2008) Numerical predictions for stable buoyant regimes within a square cavity containing a heated horizontal cylinder. *Int J Heat and Mass Transfer* 51: 553–565.
- [5] Gebhart B, Pera L, Schorr AW (1970) Steady laminar natural convection plumes above a horizontal line source. *Int J Heat and Mass Transfer* 13: 161–171.
- [6] Pera L, Gebhart B (1971) On the stability of laminar plumes: some numerical solutions and experiments. *Int J Heat Mass Transfer* 14: 975–984.
- [7] Fujii T, Morioka I, Uehara H (1973) Buoyant plume above a horizontal line heat source. *Int J Heat Mass Transfer* 16: 755–768.
- [8] Incropera FP, Yaghoury MA (1979) Buoyancy driven flows originating from heated cylinder submerged in a finite water layer. *Int J Heat and Mass Transfer* 23: 269–278.
- [9] Schorr AW, Gebhart B (1973) An experimental investigation of natural convection wakes above a line heat source. *Int J Heat Mass Transfer* 13: 557–571.
- [10] Kitamura K, Kami-iwa F, Misumi T (1992) Heat transfer and fluid flow of natural convection around large horizontal cylinders. *Int J Heat and Mass Transfer* 42: 4093–4106.
- [11] Atayılmaz O, Teke I (2010) Experimental and numerical study of the natural convection from a heated horizontal cylinder wrapped with a layer of textile material. *Int C Heat and Mass Transfer* 37: 58–67.
- [12] Ashjaee M, Eshtiaghi AH, Yaghoubi M, Yousefi T (2007) Experimental investigation on free convection from a horizontal cylinder beneath an adiabatic ceiling. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32: 614–623.
- [13] Rezaei A, basharhagh M, Yousefi T (2010) Free convection heat transfer from a horizontal fin attached cylinder between confined nearly adiabatic walls. *Experimental Thermal and Fluid Science* 34: 177–182.
- [14] Stanislas M, Okamoto K, Kahler C (2003) Main results of the First International PIV Challenge. *Meas. Sci Technol* 14: 63–89.

## ۶- نتیجه‌گیری

جریان جابجایی آزاد بر روی یک استوانه فلزی با شار ثابت به صورت دوبعدی با استفاده از روش سرعت‌سنجی PIV مورد بررسی قرار گرفت. کانتورهای سرعت در یک صفحه پیوسته دوبعدی برای ارتفاع‌های مختلف آب بر روی استوانه در یک مدت زمان مشخص اندازه‌گیری شد. مشاهده شد که جریان کاملاً غیر دایم بوده و هر اندازه ارتفاع آب بر روی استوانه بیشتر شود، جریان سیال ناشی از جابجایی آزاد بر روی استوانه توانایی رسیدن به سطح آب را نداشته و در میان راه دچار جدایش می‌شود. حرکت سیال بر روی استوانه نوسانی بوده و گردابه‌ها از یک سو به سوی دیگر می‌روند. پریود نوسانات برای حالات مختلف محاسبه شده و مشاهده گردید با افزایش سطح آب این نوسانات کاهش می‌یابد. اگر سطح آب بیشتر شود و جدایش رخ دهد، جریان سیال بازهم ناپایدار شده و تعداد نوسانات زیاد می‌شود.

همچنین، توزیع سرعت در مقاطع مختلف ظرف برای ارتفاع‌های مختلف آب بدست آمد. در بالاترین ارتفاع آب، به علت جدایش جریان تفاوت‌هایی در ساختار توزیع سرعت با حالت‌های با ارتفاع کم مشاهده شد. توزیع سرعت برای مقاطع عمود بر سطح استوانه اندازه‌گیری شده و نشان داده شد ارتفاع آب تاثیر چندانی بر لایه‌مرزی سرعت در اطراف استوانه ندارد.

با بررسی سرعت بر روی خط واصل عمودی میان وسط سطح آزاد و نقطه میانی فاصله سطح آزاد و استوانه در بالای استوانه مشاهده شد در حالت‌های  $L = 4, 7\text{cm}$  برخورد جریان سیال با سطح آزاد تاثیراتی روی توزیع سرعت این مقطع ایجاد می‌کند. این تاثیرات در حالت  $L = 11\text{cm}$  به علت جدایش جریان وجود ندارد.

## ۷- فهرست علائم

$r$	ضریب همبستگی
$L$	فاصله‌ی میان مرکز استوانه و سطح آب (m)
$V$	مقدار بزرگی سرعت (m/s)
$A$	ضریب ثابت

## مراجع

- [1] Fujii T (1963) Theory of the steady laminar natural convection above a horizontal line heat source