



بررسی دوبعدی عبور تک موج از روی صفحه‌ی نازک عمودی با استفاده از روش سرعت-سنجی تصویری ذرات

رضا زاغیان¹، محمدرضا توکلی^{2*}، مهران کرباسی پور¹، مهدی نیلی²

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

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

* اصفهان، صندوق پستی 8415683111، cc.iut.ac.ir، mrtavak@

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 اسفند 1394

پذیرش: 07 اردیبهشت 1395

ارائه در سایت: 12 خرداد 1395

کلید واژگان:

تک موج

گردابه

صفحه‌ی نازک

موج ساز

روش سرعت سنجی تصویری ذرات

چکیده

بررسی عبور تک موج از روی موانع مغروق و مطالعه‌ی الگوی جریان تشکیل شده در اطراف این موانع، به دلیل تأثیر مستقیم بر شکل موج و میزان تغییرات ایجاد شده در انرژی آن اهمیت بسیار زیادی دارد که نمونه‌ای از کاربرد آن را می‌توان در طراحی موج‌شکن‌های ساحلی و دستگاه‌های جاذب انرژی مشاهده کرد. در این پژوهش به بررسی جریان ایجاد شده در اطراف ... یک صفحه‌ی نازک مغروق در آب در اثر عبور یک تک موج از روی آن پرداخته شده است. برای ایجاد تک موج یک موج ساز پیستونی ساخته شده و برای آشکارسازی جریان از روش غیر تداخلی نوری PIV استفاده شده است که بدون ایجاد اغتشاش در جریان قابلیت اندازه‌گیری سرعت سیال را دارد. بررسی الگوی جریان، مقادیر سرعت و ورتیسیت در لحظات مختلف، نشان می‌دهد که قبل از رسیدن موج به مانع گردابه‌ی ساعت‌گردی در پشت مانع تشکیل می‌شود که با گذشت زمان افزایش شعاع داده و باعث تشکیل یک جت عمودی سیال در پایین دست مانع می‌شود. با ورود جریان به ناحیه‌ی پایین دست یک گردابه‌ی پادساعت‌گرد ضعیف‌تر در این ناحیه تشکیل می‌شود که تفاوت اصلی در الگوی جریان نسبت به هندسه‌های ضخیم را ایجاد می‌کند. علاوه بر این شکل بدون بعد مؤلفه افقی سرعت در پشت مانع در لحظه‌ی شکل‌گیری لایه برشی استخراج شده و با حالتی که جسم دارای ضخامت قابل توجهی باشد، مورد مقایسه قرار گرفته است.

Two-Dimensional Investigation of Solitary Wave passing over a Submerged Vertical Thin Plate with PIV Technique

Reza Zaghian, Mohammad Reza Tavakoli*, Mehran Karbasipour, Mahdi Nili

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

* P.O.B. 8415683111, Isfahan, Iran, mrtavak@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 March 2016
Accepted 26 April 2016
Available Online 01 June 2016

Keywords:
Solitary wave
Vortex
Thin Plate
Wave maker
PIV

ABSTRACT

The study of wave transmission over submerged obstacles and the flow pattern that forms around the obstacle has always been an important subject because of the direct affect on wave and the changes in wave energy that is crucial in the design of devices that absorb wave's energy and coastal breakwaters. In this research, the flow pattern induced by solitary wave passing over a submerged vertical thin plate has been studied. A wave maker piston has been used to generate the solitary wave and particle image velocimetry (PIV) technique has been used for flow visualization a technique that is non- intrusive optic method, which can measure the fluid velocity with any changes in flow pattern. The study of the flow pattern visualization, velocity values and vorticity shows, at first, the flow separation shear layer forms and the clockwise vortex generate at the rear edge of the obstacle before the wave arrives at the barrier. Then the vortex grows in size and causes the water to move upward like a vertical jet on upstream. Then the fluid enters to the downstream and generates the counterclockwise vortex in this region, which is less than the first clockwise vortex in power which makes an important difference with the thick geometry researches. In addition, the non-dimensional horizontal components of fluid velocity at the time of shear layer formation at the rear edge of the plate have been studied and compared with the case that the barrier is rectangular.

1- مقدمه

روش‌های تداخلی مثل استفاده از روش سرعت‌سنجی سیم‌داغ و حسگرهای تراسونیک و یا روش‌های غیر تداخلی مثل روش‌های نوری تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های نوری به دلیل عدم تأثیر در جریان سیال مورد استقبال فراوانی قرار گرفته‌اند. PIV¹ و LIF² از جمله پرکاربردترین روش‌های نوری

از گذشته‌های دور بررسی اثر برخورد امواج با موانع مختلف و تحلیل الگوی جریان قبل و بعد از مانع به دلیل کاربردهای متنوع در طراحی سازه‌های ساحلی، موج‌شکن‌ها و تولید انرژی از امواج از اهمیت بسیار زیادی برخوردار بوده است. برای اندازه‌گیری سرعت سیال از روش‌های عددی و تجربی مختلفی استفاده می‌شود. اندازه‌گیری تجربی سرعت سیال در حالت کلی به

¹ Particle Image Velocimetry

² Laser Image Fluorescent

Please cite this article using:

R. Zaghian, M. R. Tavakoli, M. Karbasipour, M. Nili, Two-Dimensional Investigation of Solitary Wave passing over a Submerged Vertical Thin Plate with PIV Technique, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 357-366, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

همکاران مشابه کار چانگ را انجام دادند، با این تفاوت که در پژوهش انجام شده توسط آن‌ها مانع مستطیلی دارای ضخامت بسیار کمی نسبت به ارتفاع آن بود. البته نمی‌توان آن را صفحه‌ی نازک نامید، ولی نسبت به مستطیل‌های آزمایش‌های قبلی بسیار متفاوت بود. آن‌ها برای شبیه‌سازی از مدل اعتبارسنجی شده‌ی VOF^3 استفاده کردند که براساس معادلات رینولدز متوسط نویر-استوک⁴ و مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ است [9]. علاوه بر کارهای یادشده بسیاری از کارهای دیگر بر روی الگوی جریان و گردابه‌های اطراف مانع مغروق مستطیلی انجام شده است که شاید بتوان کارهای هوانگ و لین و ژانگ [10-13] را مهم‌ترین آن‌ها دانست. لین نشان داد که شکل پروفیل مؤلفه افقی سرعت در لحظه‌ی شکل‌گیری لایه‌ی برشی⁵ در پشت اجسامی با هندسه‌ی مستطیلی با ضخامت‌های متفاوت یکسان است و این منحنی سرعت را بر روی معادله‌ای بدون بعد برازش کرد [14].

همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه‌ی پژوهش‌های قبلی انجام گرفته بر روی اجسامی با هندسه‌ی مستطیلی، ضخامت مستطیل نسبت به ارتفاع آن بیشتر یا برابر بوده و بررسی الگوی جریان برای حالتی که ضخامت بسیار کم باشد، انجام نشده است. بدیهی است که کاهش ضخامت مانع تأثیر بسیار زیادی در شکل جریان و تعداد و قدرت گردابه‌های تشکیل شده در اطراف مانع خواهد داشت. از طرفی در نمونه‌ای از تجهیزات مغروقی که به‌عنوان تبدیل‌کننده‌ی انرژی امواج به انرژی الکتریکی استفاده می‌شود از یک صفحه-ی نازک استفاده می‌شود که بر اثر اختلاف فشار ناشی از عبور موج و نوسانات ایجاد شده در دو طرف صفحه به حرکت در می‌آید [15]. لذا اطلاع از وضعیت تشکیل گردابه‌ها که ایجاد کننده‌ی نوسان در دو طرف مانع هستند، می‌تواند اطلاعات سودمندی در طراحی این گونه تجهیزات ارائه نماید. در این پژوهش به بررسی جریان ناشی از عبور یک تک موج آب از روی یک صفحه‌ی نازک پرداخته می‌شود. برای انجام این آزمایش از روش نوری سرعت‌سنجی تصویری ذرات استفاده شده است. با انجام این آزمایش می‌توان مقادیر سرعت، الگوی جریان، محل تشکیل گردابه‌ها و مقادیر ورتیسیته را در اطراف مانع مشخص کرد. علاوه بر این بررسی شکل بی‌بعد مؤلفه افقی سرعت، در حین شکل‌گیری لایه‌ی برشی در پشت مانع نازک انجام شده و با پژوهش‌های انجام شده بر روی هندسه‌ی مستطیل مقایسه شده است.

2-بستر آزمایش تجربی

2-1- شرایط کانال و دستگاه موج ساز

برای انجام این آزمایش از یک کانال باز با ابعاد $6 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ که در ارتفاع 120 سانتی‌متری از سطح زمین قرار گرفته استفاده شده است. این کانال با سطوح شفاف و از جنس پلکسی‌گلاس⁶ در دانشکده‌ی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان طراحی و ساخته شده است. برای ایجاد موج، یک دستگاه موج ساز پیستونی طراحی و ساخته شده است. ارتفاع مانع نصف ارتفاع آب ساکن کانال در نظر گرفته شده است. در "شکل 1" ابعاد کانال و محل قرارگیری مانع در آن مشخص شده است. همچنین شرایط آزمایش که شامل ارتفاع آب ساکن (h)، ارتفاع بیشینه‌ی موج در لحظه‌ی رسیدن موج به مانع (H)، سرعت موج (c) و ابعاد مانع که شامل ارتفاع (D)، ضخامت (L) و عرض (B) آن است، در جدول 1 مشخص شده است. مطابق مرجع [8] برای

هستند که علاوه بر اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر سرعت، توانایی آشکارسازی جریان را نیز دارند.

در اجسام مغروق به دلیل عدم برخورد با سطح موج، غالباً پدیده‌ی شکست موج ایجاد نمی‌شود و در نتیجه آشفتگی کمتری در اطراف مانع ایجاد می‌کنند. به همین جهت آشکارسازی جریان در اطراف این موانع ساده‌تر و صرف‌نظر کردن از اثرات سه‌بعدی در آن بسیار مرسوم است. عبور تک موج از روی استوانه‌های مغروق به دلیل کاربرد در صنایع نفتی و اهمیت برخورد موج با این تجهیزات، در پژوهش‌های بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. چیان و ارتکین از جمله افرادی بودند که به شبیه‌سازی الگوی جریان اطراف یک استوانه‌ی افقی مغروق در حین عبور تک موج پرداختند و نیروی پسای وارد بر استوانه را در زمان‌های مختلف استخراج کردند [1]. از جمله پژوهش‌های اخیر در این زمینه می‌توان به کار انجام شده توسط زاروک و همکاران اشاره کرد که در آن برای آشکارسازی جریان و گردابه‌ها در حین عبور موج از روی استوانه، از تزریق فلئورسنت و آشکارسازی با لیزر استفاده شده و برای اندازه‌گیری سرعت سیال هم از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات¹ استفاده شده است [2].

در پژوهش‌هایی با موانع غیر استوانه‌ای، محل قرارگیری مانع مغروق غالباً در کف کانال است تا مشابهت زیادی با موج‌شکن‌های مغروق به وجود آید. چن با استفاده از یک سیستم دو سیاله به بررسی عبور یک تک موج داخلی یکبار از روی یک مانع مغروق مثلثی و یکبار از روی یک نیم استوانه دوار پرداخت و آن‌ها را با هم مقایسه کرد. هدف چن مشاهده‌ی پرش هیدرولیکی اتفاق افتاده بین دو سطح و گردابه‌ی ایجادشده در پشت مانع بود. برای این کار او با تزریق ماده‌ی فلئورسنت بین دو سطح مرز ایجاد شده بین دو سطح را به خوبی مشخص کرد و تصاویر پرش هیدرولیکی ایجاد شده را استخراج کرد [3]. بعدها همین کار به‌صورت شبیه‌سازی عددی، توسط هسیه و همکاران انجام شد که مطابقت بسیار خوبی با کار انجام شده توسط چن داشت [4]. چانگ و همکاران به بررسی گردابه‌های تشکیل شده در داخل یک حفره در هنگام عبور یک تک موج پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش سرعت سنجی تصویری ذرات توانستند، نشان دهند که ابتدا یک گردابه‌ی بزرگ تقریباً به قطر حفره داخل آن ایجاد می‌شود و پس از مدتی گردابه‌ی دیگری با چرخش در جهت عکس گردابه‌ی اولیه در قسمت کف حفره ایجاد می‌شود [5]. هندسه‌ی مستطیل به دلیل سادگی و کاربرد بسیار در تعداد زیادی از مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است. اولین بار تانگ و همکاران به بررسی تشکیل گردابه ناشی از عبور یک تک موج، در پشت یک مانع مغروق مستطیلی پرداختند. آن‌ها این پدیده را هم به‌صورت تجربی و هم عددی در عدد رینولدز 8200 بررسی کردند [6]. هوانگ همین کار را به‌صورت شبیه‌سازی عددی و برای نسبت‌های ارتفاع موج به نسبت ارتفاع مانع مختلف انجام داد و مقدار نیروی پسای² وارد بر مانع را در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار داد [7]. چانگ و همکاران به بررسی تشکیل گردابه در هنگام عبور یک تک موج از روی یک مکعب مستطیل با نسبت ارتفاع مانع به عمق 0.7 پرداختند. آن‌ها ابتدا با روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات، آزمایش خود را انجام داده و سپس همان شرایط را به‌صورت عددی شبیه‌سازی کردند. از آنجایی که در پشت و جلوی مانع مستطیلی دو گردابه تشکیل می‌شود، مشاهدات آن‌ها نشان داد که قدرت گردابه‌ی تشکیل شده در جلو مانع مستطیلی تقریباً با گردابه‌ی تشکیل شده در عقب مانع برابر است [8]. یانو و

³ Volume of Fluid

⁴ Reynolds-averaged Navier-Stokes Equations

⁵ Shear layer

⁶ Plexiglass

¹ PIV

² Drag

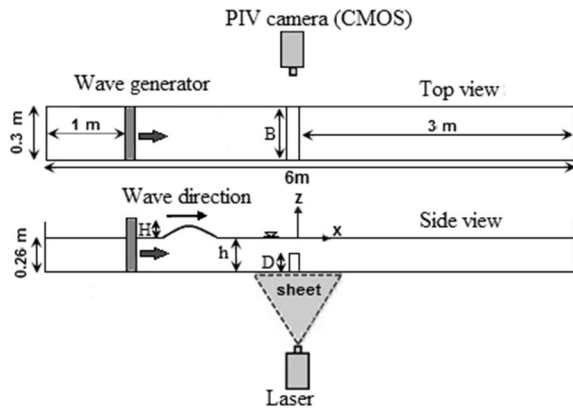


Fig.1 Schematic channel conditions and the location of the barrier in tests

شکل 1 شماتیک شرایط کانال و محل قرارگیری مانع در آزمایش

با توجه به این‌که از مقطع وسط کانال تصویربرداری می‌شود، فاصله‌ی لنز دوربین تا محل تصویربرداری حدوداً 25 سانتی‌متر است. زمان تصویربرداری از لحظه‌ی حرکت موج ساز تا لحظه‌ی رسیدن موج به انتهای کانال است. بعد از این زمان به دلیل اثرات موج برگشتی نتایج آزمایش دارای اعتبار نیست. برای مشخص کردن زمان رسیدن موج به انتهای کانال از سنسورهای موج نگار ساخت شرکت آکامینا⁵ استفاده شده است [19]. البته سرعت موج و ارتفاع موج هم با استفاده از این سنسورها به دست آمده است. علاوه بر این در انتهای کانال یک جاذب موج هم قرار داده شده تا انرژی موج را تخلیه کند و سریع‌تر شرایط ساکن را در آب کانال ایجاد کند. جهت بی‌بعدسازی زمان مطابق مراجع [12,11] از رابطه‌ی (4) استفاده شده است.

$$t^* = t \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (4)$$

در رابطه‌ی (4)، t^* زمان بدون بعد شده است و $t^* = 0$ زمان رسیدن قله‌ی موج به بالای مانع است. بدیهی است که زمان‌های منفی شرایط قبل از رسیدن موج و زمان‌های مثبت لحظات بعد از عبور موج از روی مانع را نشان می‌دهند. زمان رسیدن موج به انتهای کانال هم حدوداً در $t^* = 4.1$ است. همچنین در همه‌ی تصاویر ارائه شده در بخش نتایج جهت حرکت موج مطابق "شکل 1" از چپ به راست است.

در پایان پردازش تصاویر، استخراج الگوی جریان و بردارهای سرعت از طریق کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب⁶ انجام می‌شود و صحت محاسبه‌ی سرعت با استفاده از این کد، توسط عکس‌های معیار بررسی شده است [20]. در همین آزمایشگاه هم توسط طاهریان و همکاران نیز محاسبات سرعت صحت‌سنجی شده است [21]. در "شکل 2" می‌توان نمونه‌ای از تصویر الگوی جریان در پشت مانع را قبل و بعد از پردازش تصویری مشاهده کرد. شکل سمت چپ (a) تصویر گرفته شده با استفاده از آزمایش سرعت‌سنجی تصویری ذرات در پشت مانع نازک (با رنگ قرمز مشخص شده) است که در آن ذرات اضافه شده به سیال به صورت درخشان قابل مشاهده هستند. با انجام عملیات پردازش تصویری که شامل مقایسه‌ی عکس‌های متوالی و دنبال کردن دسته ذرات موجود در عکس‌ها است، می‌توان به شکل بردارهای سرعت در هر لحظه رسید. برای نمونه در شکل 2 در قسمت (b) بردارهای ناشی از پردازش تصویر و تحلیل شکل (a) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است

محاسبه عدد رینولدز می‌توان از رابطه‌ی (1) استفاده کرد.

$$Re = \frac{Uh}{\nu} \quad (1)$$

که در آن ν ویسکوزیته دینامیکی سیال، h ارتفاع آب ساکن و U نمایانگر سرعت است که از رابطه‌ی (2) محاسبه می‌شود.

$$U = \frac{u_m h}{h - D} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (2) برای محاسبه‌ی u_m که معرف بیشینه سرعت ذره‌ی سیال در تک موج است، می‌توان از رابطه‌ی (3) استفاده کرد، که در این رابطه، g شتاب گرانش است.

$$u_m = \frac{H}{h} \sqrt{g(h + H)} \quad (3)$$

به این ترتیب مقدار عدد رینولدز هم با توجه به داده‌های جدول 1 قابل محاسبه خواهد بود.

2-2- نحوه‌ی انجام آزمایش

در روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات به سیال مورد استفاده ذراتی با ابعاد بسیار کوچک، اضافه شده و ردیابی می‌شود. این ذرات باید دارای خواص مخصوصی باشند که بتوانند از دینامیک سیال پیروی کنند. اساس این روش بر این فرض استوار است که حرکت ذرات تزریق شده به جریان، نماینده حرکت سیال هستند. در نهایت جهت ردیابی، این ذرات توسط لیزر مشخص شده و از آن‌ها فیلم‌برداری می‌شود و این فیلم به عکس‌های سازنده آن تبدیل می‌گردد. با تحلیل این عکس‌ها بردارهای سرعت سیال به دست خواهد آمد. برای انجام این آزمایش ابتدا ذرات 10 و 20 مایکرونی از جنس پودر شیشه ساخت شرکت دانتک¹ با چگالی برابر با آب به سیال اضافه می‌شود [16]. مطابق "شکل 2" نور لیزر از کف کانال یک صفحه‌ی دوبعدی را در مقطع وسط کانال روشن می‌سازد تا بتوان این ذرات را به خوبی دنبال کرد. برای این کار از یک لیزر نور سبز پیوسته مدل (DPSS) ساخت شرکت بیجینگ² با طول موج 532 نانومتر و توان 9 وات استفاده شده است. قطر پرتو نور این لیزر 5 میلی‌متر است و به کمک یک لنز استوانه‌ای ساخت شرکت ادومند³ نور به یک صفحه با ضخامت در حدود 1 میلی‌متر و عرض 12 سانتی‌متر تبدیل شده است [17]. همچنین فاصله‌ی محل قرارگیری لیزر از کف کانال 50 سانتی‌متر است. در نهایت تصویربرداری از حرکت سیال توسط یک دوربین پرسرعت نوع CMOS⁴ ساخت شرکت آلمانی PCO با سرعت 450 فریم بر ثانیه و کیفیت تصویری 1024 × 1280 پیکسل انجام شده است [18]. لنز دوربین مورد استفاده نیکون 50 میلی‌متری با عدد کانونی 1.8 بوده و فاصله-ی، لنز دوربین از دیواره کانال حدوداً 10 سانتی‌متر است.

جدول 1 شرایط در نظر گرفته شده برای آزمایش

Table 1 Conditions intended to test

نماد	واحد	مقدار	پارامتر
h	m	0.26	ارتفاع آب ساکن
H	m	0.09	ارتفاع بیشینه موج
c	m/s	1.84	سرعت تئوری موج
D	m	0.13	ارتفاع مانع
L	m	0.004	ضخامت مانع
B	m	0.3	عرض مانع
Re	-	329189	عدد رینولدز

¹ Dantec

² Beijing

³ Edmund

⁴ Complementary Metal Oxide Silicon

⁵ Acamina

⁶ Matlab

بررسی قرار می‌گیرد. اما برای بهتر بیان شدن نحوه‌ی شکل‌گیری جریان در اطراف مانع در بعضی از قسمت‌ها مؤلفه‌های عمودی و افقی سرعت مورد بحث قرار گرفته‌اند.

با حرکت موج ساز و تشکیل موج، جریان توده‌ی سیال جلوتر از موج سطحی ایجادشده حرکت می‌کند. در این لحظات یعنی قبل از زمان رسیدن موج به مانع (زمان‌های منفی) شاهد تشکیل جدایش جریان در پشت مانع خواهیم بود. مطابق شکل 3 در پشت جسم ابتدا در ناحیه‌ی بسیار کوچکی در نوک مانع لایه‌ی برشی تشکیل می‌شود و مقدمات تشکیل یک گردابه‌ی ساعت‌گرد در پشت مانع را فراهم می‌سازد.

همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود، در لحظات رسیدن موج به مانع این گردابه تقریباً به‌طور کامل شکل گرفته است. در واقع تا زمان رسیدن موج به مانع و اندکی بعد از آن، این گردابه از موج انرژی گرفته و قوی‌تر می‌شود، که مکانیزم انتقال انرژی به این گردابه در این وضعیت از نوع انتقال² است. در "شکل 5" هم مؤلفه‌های قائم و افقی سرعت در مقاطعی، پشت مانع مورد بررسی قرار گرفته است. اما با گذشت زمان و عبور موج از روی مانع، مکانیزم انتقال انرژی گردابه به پخش³ تغییر کرده و شروع به کاهش قدرت و افزایش شعاع می‌کند [8].

همچنین مقایسه‌ی "شکل 6 با شکل 4" به‌خوبی افزایش شعاع گردابه را نشان می‌دهد. روند تشکیل این گردابه‌ی ساعت‌گرد در پشت مانع دقیقاً مشابه با آن چیزی است که در هندسه‌های مستطیلی ضخیم مشاهده می‌شود، با این تفاوت که در هندسه‌های ضخیم هم‌زمان یک گردابه‌ی ساعت‌گرد بر روی سطح بالایی مستطیل تشکیل می‌شود [8-11]، در صورتی که این گردابه در حالت مانع نازک تشکیل نمی‌شود. با مقایسه‌ی سرعت در دو مقطع نزدیک به مانع در پشت جسم ($x/h = 0.2$ و $x/h = 0.1$) در "شکل‌های 5 و 7" حرکت رو به جلوی گردابه به خوبی قابل مشاهده است. مطابق "شکل 5"

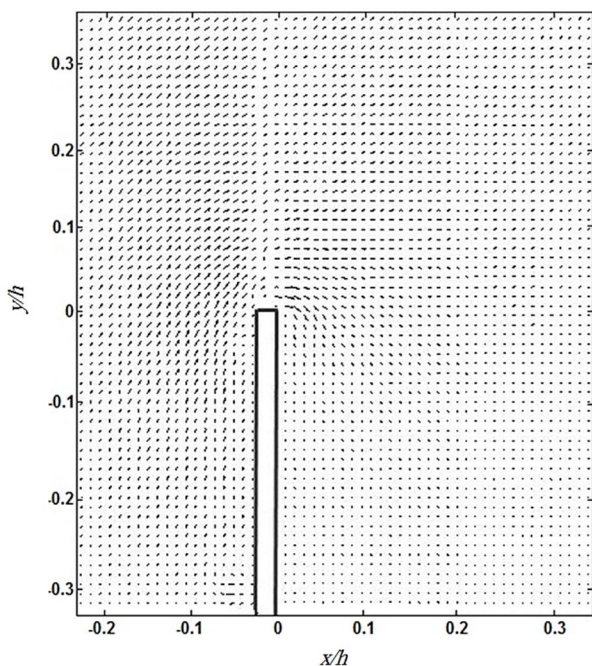


Fig.3 Flow pattern around an obstacle in time $t^*=-2.21$

شکل 3 الگوی جریان اطراف مانع در لحظه‌ی $t^*=-2.21$

² Convection
³ Diffusion

به دلیل این‌که نور لیزر از کف کانال تابیده می‌شود، در قسمت بسیار کوچکی در بالای مانع به دلیل ایجاد سایه و تغییر در روشنایی نور باعث بروز خطا در تحلیل نتایج و در الگوی جریان این ناحیه می‌شود که خود را به‌صورت ناپیوستگی اندکی در شکل بردارها نشان می‌دهد.

بررسی تکرارپذیری آزمایش از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. برای بررسی این مسئله این آزمایش 3 بار در شرایط مشابه تکرار شده است. از لحاظ الگوی کلی آشکارسازی و مشاهده‌ی جریان¹ تکرارپذیری آزمایش با توجه به زمان و نحوه‌ی تشکیل گردابه‌ها کاملاً قابل قبول بود.

جهت بررسی کمی تکرارپذیری سرعت سیال، 4 مقطع در فواصل 2 سانتی‌متری و 4 سانتی‌متری در جلو و عقب مانع مشخص شده‌اند و مؤلفه‌های افقی و عمودی سرعت در 200 نقطه بر روی این مقاطع و در چهار زمان مختلف در هر سه آزمایش به دست آورده شده است و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. به‌عنوان نمونه‌ای از بررسی‌های انجام شده برای تکرارپذیری آزمایش و درک بهتر آن مؤلفه‌های افقی و عمودی سرعت برای زمان مشخص $t^* = -0.08$ و در فاصله‌ی 2 سانتی‌متری از مانع در قسمت پیوست ترسیم شده است. در پیوست 1 مؤلفه‌ی افقی سرعت و در پیوست 2 مؤلفه‌ی عمودی سرعت برای هر 3 آزمایش نشان داده شده است. در نهایت اختلاف مقادیر سرعت‌ها برای هر 200 نقطه و هر سه آزمایش در هر حالت محاسبه شده است و خطای تکرارپذیری به‌صورت میانگین در همه‌ی حالت‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که میانگین خطای تکرارپذیری مطلق در حدود 0.0095 (m/s) است که با توجه به سرعت جریان سیال و وجود عواملی چون مغشوش بودن جریان مقدار بسیار قابل قبولی است.

3- نتایج بررسی الگوی کلی جریان اطراف مانع

در این قسمت نتایج الگوی جریان در مختصات بدون بعد ترسیم شده‌اند، که برای بی‌بعد کردن ابعاد طولی از ارتفاع آب در وضعیت ساکن (h) استفاده شده است. از آنجایی که در این نوع پژوهش‌ها هدف از بخش ارائه‌ی الگوی جریان به نوعی آشکارسازی جریان است و بیشتر محل تشکیل گردابه مورد

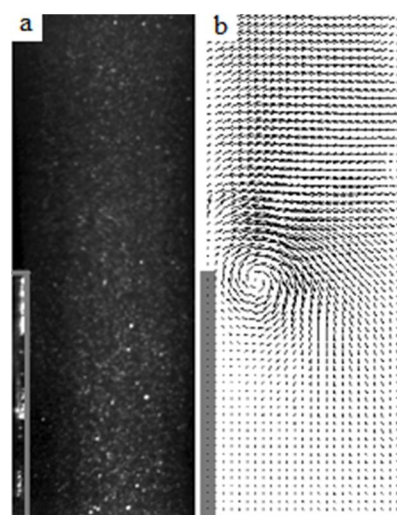


Fig.2 Sample of output results, a) Image taken from tests b) After Image Processing

شکل 2 نمونه خروجی نتایج (a) تصویر گرفته شده از آزمایش (b) بعد از پردازش تصویر

¹ Visualization

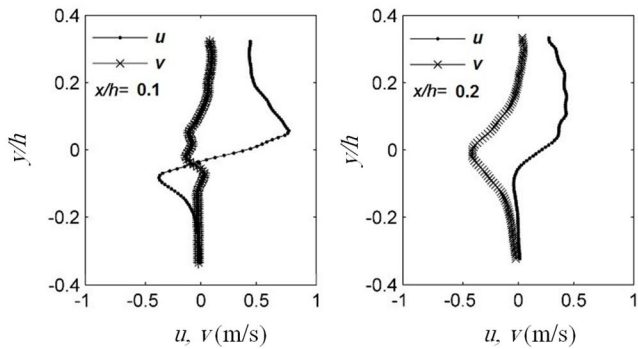


Fig.7 Vertical and horizontal velocity component at time $t^*=1.2$ seconds in the specified section

شکل 7 مؤلفه قائم و افقی سرعت در لحظه‌ی $t^*=1.2$ در مقاطع مشخص

گردابه در لحظه‌ی رسیدن موج به مانع در ناحیه‌ی بسیار کوچکی متمرکز بوده و اثرات آن هنوز به $x/h = 0.2$ نرسیده و تغییرات سرعت در این ناحیه اندک است. اما پس از عبور موج و افزایش شعاع گردابه تغییرات سرعت در این مقطع که ناشی از حرکت روبه جلوی گردابه است را می‌توان مشاهده کرد. در زمان حضور موج در نزدیکی مانع علاوه بر حرکت دادن گردابه به سمت جلو، همزمان آن را کمی به سمت کف کانال نیز هدایت می‌کند.

پس از عبور موج از روی مانع مومنتم در بالای گردابه کاهش یافته و گردابه‌ی ساعت‌گرد تحت تأثیر نیرویی به سمت بالا قرار گرفته و با سرعت بسیار کم به سمت بالا حرکت می‌کند، که اثرات کف کانال نیز در شکل‌گیری این حرکت تأثیرگذار است. پیش از این نیز توضیح داده شد که بعد از عبور موج، گردابه شروع به افزایش شعاع و گسترش در اطراف مانع می‌کند. افزایش شعاع گردابه، جریان را به سمت مانع سوق داده و در واقع باعث تغییر جهت مؤلفه افقی سرعت در نزدیکی مانع می‌شود. جریانی که به سمت مانع می‌آید از یک طرف به کف کانال محدود شده و از طرفی با مانع مواجه شده و به‌ناچار به سمت بالا حرکت می‌کند. در حقیقت در این لحظات یک جت عمودی سیال به سمت سطح آزاد سیال تشکیل می‌شود. این پدیده در "شکل 8" در قسمت پشت مانع کاملاً قابل مشاهده است. همچنین افزایش مؤلفه قائم سرعت در "شکل 9" در مقاطع پشت مانع نشان‌دهنده‌ی جت عمودی تشکیل شده در پشت مانع نازک است. اما در بالادست مانع، پس از عبور موج سرعت کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که بعد از زمان اندکی سرعت بالادست به سمت صفر می‌رود. در همین لحظات جت عمودی سیال در پایین‌دست مانع، تشکیل شده و مقداری از سیال را به‌آرامی وارد بخش بالادست مانع می‌کند که باعث تشکیل گردابه‌ی پادساعت‌گرد جدیدی در جلوی مانع (بالادست) می‌شود. گردابه‌ی جدید تشکیل شده از لحاظ قدرت ضعیف‌تر و از لحاظ ابعاد کوچک‌تر از گردابه‌ی ساعت‌گرد اولیه است. همچنین زمان اندکی بعد از تشکیل این گردابه موج به انتهای کانال می‌رسد. اما به‌طور کلی حرکت هر دو گردابه به سمت سطح آزاد سیال قابل مشاهده است. مقایسه‌ی جریان اطراف مانع نازک انجام شده در این پژوهش با جریان اطراف موانع مستطیلی [8-11] خود را بیش از هر چیز در این قسمت نشان می‌دهد. البته در موانع ضخیم هم تشکیل جت عمودی سیال در اثر پخش گردابه‌ی پشت مانع به صورت بسیار ضعیفی وجود دارد که نمونه‌ای از آن را می‌توان در پژوهش انجام گرفته توسط ژانگ [13] مشاهده کرد ولی تشکیل گردابه بر روی سطح بالایی مستطیل در لحظات ابتدایی، مانع از تأثیر جریان پشت مانع بر جلوی مانع و تشکیل گردابه‌ی پادساعت‌گرد می‌شود.

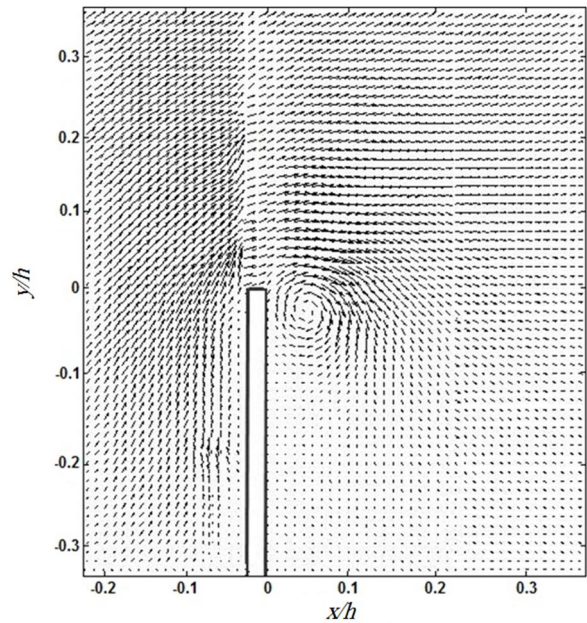


Fig.4 Flow pattern around an obstacle in time $t^*=-0.06$

شکل 4 الگوی جریان اطراف مانع در لحظه‌ی $t^*=-0.06$

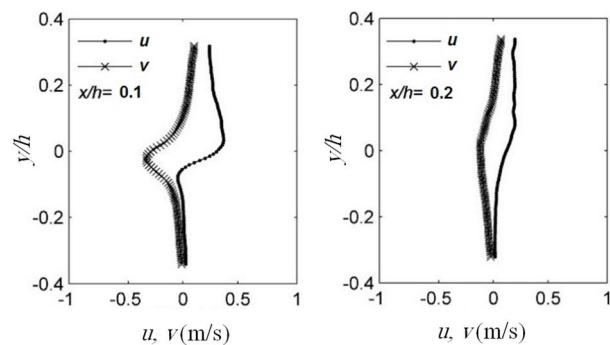


Fig.5 Vertical and horizontal velocity component at time $t^*=-0.06$ seconds in the specified section

شکل 5 مؤلفه قائم و افقی سرعت در لحظه‌ی $t^*=-0.06$ در مقاطع مشخص

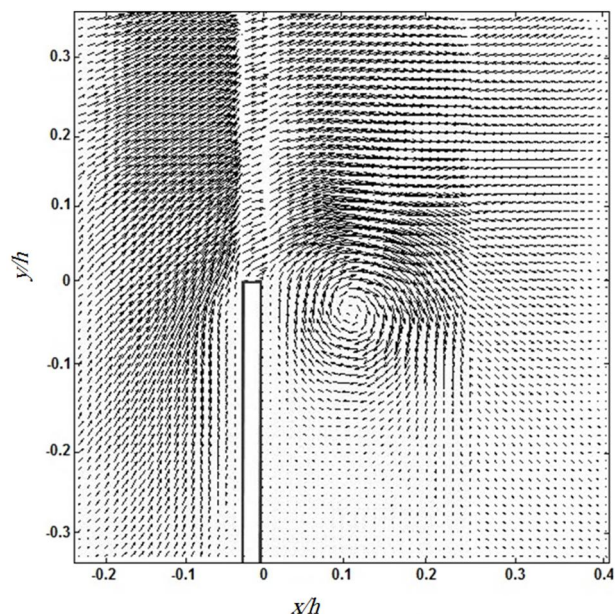


Fig.6 Flow pattern around an obstacle in time $t^*=1.2$

شکل 6 الگوی جریان اطراف مانع در لحظه‌ی $t^*=1.2$

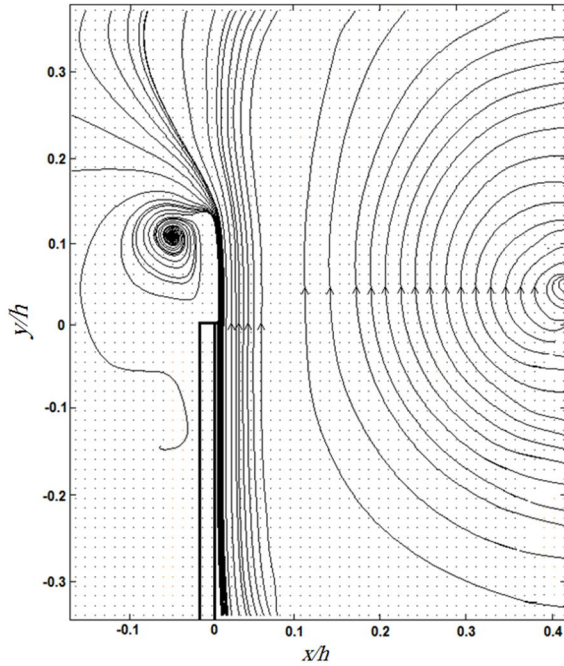


Fig.10 Stream line at the moment of the formation of two vortices at time $t^*=3.68$

شکل 10 خطوط جریان اطراف مانع در لحظه‌ی شکل‌گیری دو گردابه در زمان $t^*=3.68$

جهت مقایسه‌ی قدرت دو گردابه، مقدار سیرکولاسیون¹ اطراف گردابه‌ها محاسبه شده است. با توجه به این‌که مقدار ورتیسیت² از مؤلفه‌های سرعت به‌دست آمده از آزمایش سرعت‌سنجی تصویری ذرات استخراج شده است، با انتگرال‌گیری از آن در یک محیط بسته مطابق رابطه‌ی (5) می‌توان مقدار سیرکولاسیون (Γ) را محاسبه نمود.

$$\Gamma = \oint \omega dA \quad (5)$$

که در رابطه‌ی (5)، ω ورتیسیت²ی سطح مشخص شده‌ی اطراف گردابه است. لازم به ذکر است که لحظه‌ی تشکیل این دو گردابه از نظر زمانی یکسان نیست. در "شکل 11" مقدار قدر مطلق سیرکولاسیون این دو گردابه از زمان تشکیل تا زمان رسیدن به قدرت بیشینه مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار قدر مطلق بیشینه سیرکولاسیون تشکیل

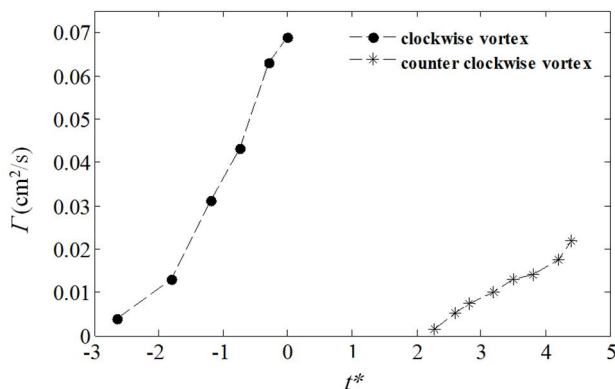


Fig.11 Absolut value circulation of clockwise vortex from formation time until the maximum vortex strength

شکل 11 قدر مطلق سیرکولاسیون گردابه‌ی ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد از لحظه‌ی تشکیل تا لحظه‌ی رسیدن به قدرت بیشینه

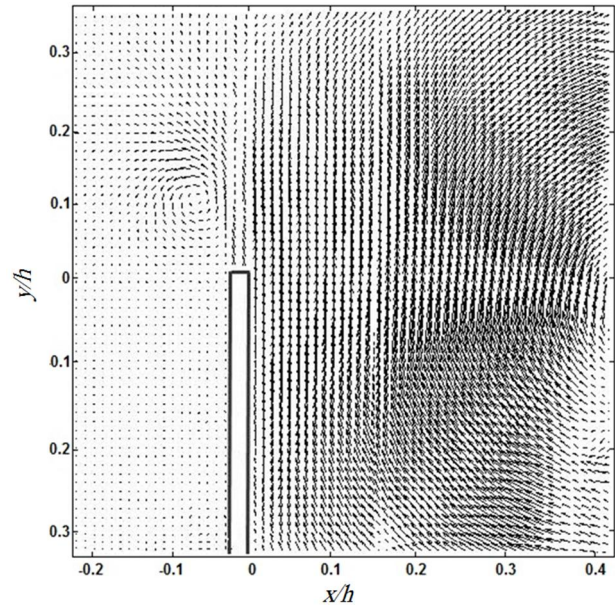


Fig.8 Flow pattern around an obstacle in time $t^*=3.6$

شکل 8 الگوی جریان اطراف مانع در لحظه‌ی $t^*=3.68$

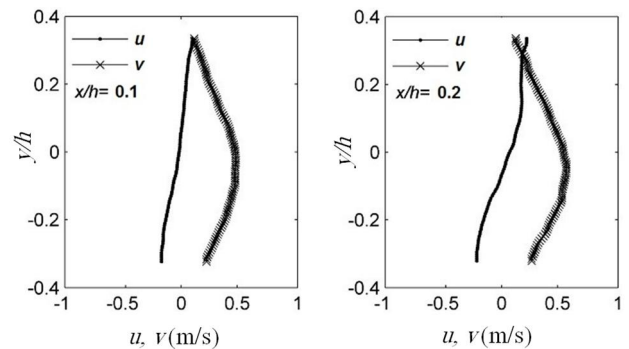


Fig.9 Vertical and horizontal velocity component at time $t^*=3.68$ seconds in the specified section

شکل 9 مؤلفه قائم و افقی سرعت در لحظه‌ی $t^*=3.68$ در مقاطع مشخص

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که دو گردابه‌ی تشکیل شده در موانع مستطیلی ضخیم، از نظر زمان تشکیل و هم از نظر قدرت (سیرکولاسیون ایجاد شده) برخلاف آنچه در هندسه‌ی مانع نازک مشاهده می‌شود، تقریباً یکسان هستند [8]. برای این‌که بتوان محل دو گردابه را بهتر مشاهده کرد خطوط جریان در حوالی گردابه‌ها در زمانی که دو گردابه در دو سمت مانع تشکیل شده‌اند، ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مطابق "شکل 10" در زمان تشکیل گردابه‌ی پادساعت‌گرد، گردابه‌ی ساعت‌گرد اولیه به شعاع نسبتاً قابل‌توجهی رسیده است. نکته‌ی قابل‌ذکر دیگر این است که همان‌طور که قبلاً اشاره شد جهت حرکت گردابه‌ها به سمت بالا بوده و به نظر می‌رسد با استناد به مرجع [7] که در آن نسبت ارتفاع مانع به ارتفاع آب ساکن مطابق پژوهش انجام گرفته برابر 0.5 است، اگر طول کانال به اندازه‌ی کافی زیاد بود، دو گردابه به سطح آب خواهند رسید. اما نباید فراموش کرد که این مسئله تحت تأثیر نسبت ارتفاع مانع به ارتفاع آب ساکن است. چنانچه ارتفاع مانع زیاد بوده و به سطح آب نزدیک باشد گردابه‌ی ساعت‌گرد تحت تأثیر موج قرار گرفته و به سمت کف کانال حرکت می‌کند، که نمونه‌ای از آن را می‌توان در پژوهش انجام گرفته توسط ویو و همکاران (با نسبت $D/H = 0.8$) مشاهده کرد [9].

¹ Circulation
² Vorticity

15 تا شکل 17 ترسیم شده‌اند. به‌طور کلی به غیر از لحظات ابتدایی مشاهده می‌شود که روند تغییرات y_{max} و b با زمان تقریباً رو به افزایش است که البته این تغییرات به صورت خطی نمی‌باشند. همچنین مطابق انتظار با گذشت زمان و نزدیک شدن موج به مانع u_{max} و u_{min} هم افزایش خواهند یافت و حاصل تفاضل آن‌ها به‌نوعی با زمان کنترل می‌شود. در نتیجه این تعادل اثر خود را در پارامتر بدون بعد U_n نشان می‌دهد.

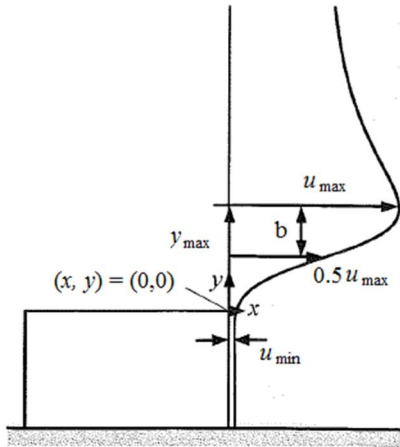


Fig.12 The pattern of horizontal component of velocity in shear layer formation time [12]

شکل 12 الگوی مؤلفه افقی سرعت در لحظه‌ی شکل‌گیری لایه‌ی برشی [12]

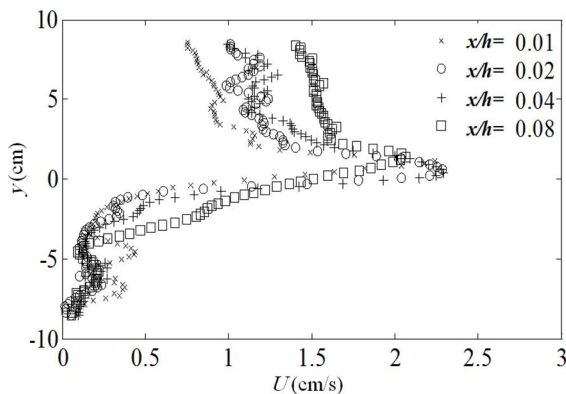


Fig.13 Horizontal component of velocity in several different section in constant time $t^* = -0.2$

شکل 13 سرعت افقی جریان در چند مقطع مختلف پشت جسم در زمان $t^* = -0.2$

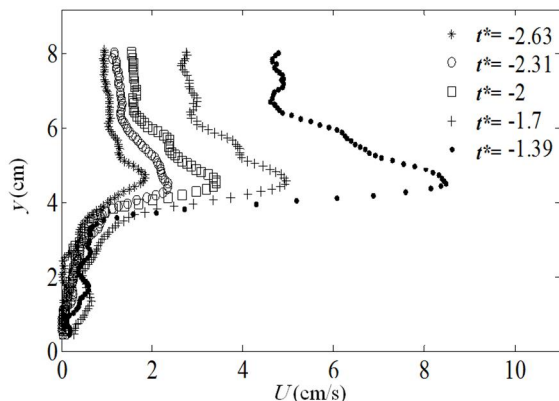


Fig.14 Horizontal component of velocity in several different time in constant section $\frac{x}{h} = 0.04$

شکل 14 سرعت افقی در چند زمان متفاوت در مقطع ثابت $\frac{x}{h} = 0.04$

شده توسط گردابه‌ی ساعت‌گرد، تقریباً 3 برابر گردابه‌ی پادساعت‌گرد است که نشان‌دهنده‌ی قوی بودن گردابه‌ی موردنظر نسبت به گردابه‌ی پادساعت‌گرد است.

بررسی نیروی پسای وارد بر اجسام مستطیلی با زمان نشان می‌دهد که در ابتدا نیروی پسا در جهت حرکت موج بوده و پس از عبور موج از روی مانع این نیروی پسا به دلیل جهت چرخش گردابه‌ی ساعت‌گرد در جهت عکس (منفی) به مانع مستطیلی وارد می‌شود [7]. اما آنچه که درباره‌ی مانع نازک باید در نظر گرفته شود این است که تشکیل گردابه‌ی پادساعت‌گرد در بالادست مانع، نیرویی در جهت حرکت موج (مثبت) به مانع وارد کرده و باعث کم کردن نیروی پسای منفی، پس از عبور موج از روی مانع است. این پدیده از مهم‌ترین تأثیراتی است که تشکیل گردابه بر جریان اطراف مانع خواهد گذاشت.

4- بررسی مؤلفه افقی سرعت در لحظه‌ی شکل‌گیری لایه برشی

همان‌طور که پیش از این توضیح داده شد، لین معادله‌ای را برای شکل بدون بعد مؤلفه‌ی افقی سرعت در لحظات ابتدایی شکل‌گیری لایه برشی در پشت موانع مستطیلی پیشنهاد کرد که در "شکل 12" قابل مشاهده است و نشان داد که برای دو ضخامت متفاوت این پروفیل یکسان است [12]. با توجه به توضیحات ارائه شده درباره‌ی تفاوت جدایش جریان به‌خصوص در لحظات ابتدایی در مستطیل ضخیم و صفحه‌ی نازک به بررسی و مقایسه‌ی این موضوع در پشت هندسه‌ی صفحه‌ی نازک پرداخته شده است. برای انجام چنین کاری با انتخاب 6 مقطع مشخص در پشت مانع (ناحیه‌ی مثبت دستگاه مختصاتی) و در هر مقطع برای 6 زمان (t^*) مختلف مؤلفه‌ی افقی سرعت محاسبه شده است. بدیهی است که چون هدف بررسی نحوه‌ی تشکیل لایه‌ی برشی در پشت مانع است، مقاطع نزدیک به مانع و زمان‌ها قبل از زمان رسیدن موج به مانع انتخاب شده است. در نهایت با انجام این روند نمودارهایی مطابق "شکل 13" و "شکل 14" ایجاد می‌شود که نشان‌دهنده‌ی تغییرات مؤلفه‌ی افقی سرعت در زمان‌ها و مکان‌های مختلف پشت مانع هستند. همان‌طور که در این دو شکل مشاهده می‌شود با وجود تغییر در مقادیر عددی، شکل کلی پروفیل سرعت در مقاطع و زمان‌های مختلف تا حدودی یکسان است و مشابهت زیادی با پروفیل معرفی شده توسط لین "شکل 12" دارد.

با تعریف پارامترهای معرفی شده توسط لین می‌توان این نمودارها را بدون بعد کرد [12]. برای این منظور مطابق "شکل 12"، اگر بیشینه‌ی مؤلفه افقی سرعت و محل آن در مقطعی پشت مانع به ترتیب u_{max} و y_{max} ، سرعت کمینه u_{min} و فاصله‌ی بین محل سرعت بیشینه با محل نصف سرعت بیشینه b نامیده شود، آن‌گاه از طریق روابط (6) و (7) می‌توان نمودارهای مؤلفه‌های افقی سرعت در مقاطع پشت مانع را بدون بعد کرد.

$$\xi = \frac{y - y_{max}}{b} \quad (6)$$

$$U_n = \frac{u - u_{min}}{u_{max} - u_{min}} \quad (7)$$

که در این روابط ξ و U_n به ترتیب معرف مکان بی‌بعد و سرعت بی‌بعد شده هستند. پارامترهای u_{max} ، y_{max} و b در زمان‌ها و مکان‌های محاسبه شده از روی "شکل‌های 13 و 14" قابل دستیابی است. بدین منظور کافی است نقاط سرعت بیشینه و نصف آن به همراه مختصات این نقاط مشخص شود. تغییرات این سه پارامتر در زمان‌ها و مقاطع مختلف در پشت مانع در "شکل

$$U_n = [\tanh(c_1 \cdot \xi + c_2) + 1] \cdot \{c_3 - c_4 \cdot \cos[c_5 \cdot (\xi + c_6)]\} \cdot e^{-\xi} \quad (8)$$

که در این معادله ضرایب C_1 تا C_6 اعداد ثابتی هستند که باید بعد از برازش منحنی استخراج شوند. برازش منحنی میانگین مشخص شده در "شکل 18" با معادله‌ی (8) انجام شده است و ضرایب ثابت آن در جدول 2 قابل مشاهده است. همچنین ضرایب این معادله برای آزمایش لین برای یک مستطیل با پهنای زیاد و یک مستطیل با پهنای کم در جدول 2 آورده و با نتایج تحقیق حاضر مقایسه شده است. بررسی ضریب رگرسیون معادله‌ی برازش شده بر روی منحنی نشان می‌دهد که این پروفیل با دقت بسیار مناسبی از این معادله پیروی می‌کند. همچنین نزدیکی این ضریب به عدد 1 و نزدیک بودن آن به اعداد به‌دست آمده در آزمایش لین نشان از دقت در آزمایش انجام شده دارد. به نوعی می‌توان نتیجه گرفت که معادله‌ی پیشنهاد شده توسط لین برای صفحه‌ی نازک در حالت عمودی هم، صادق خواهد بود.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش عبور یک تک موج آب از روی یک صفحه‌ی نازک قائم با استفاده از آزمایش سرعت‌سنجی تصویری ذرات مورد بررسی قرار گرفت و مهمترین نتایج به‌دست آمده به شرح زیر است:

- 1- بررسی الگوی جریان اطراف مانع نشان می‌دهد که عبور موج از روی مانع نازک شامل سه مرحله‌ی اصلی تشکیل گردابه‌ی ساعت‌گرد، تشکیل جت عمودی سیال و تشکیل گردابه‌ی پادساعت‌گرد در بالادست است.
- 2- عمده‌ترین تغییر شکل در جریان حول مانع نازک در مقایسه با مانع ضخیم در تشکیل گردابه‌ی پادساعت‌گرد در بالادست بوده در حالی که در

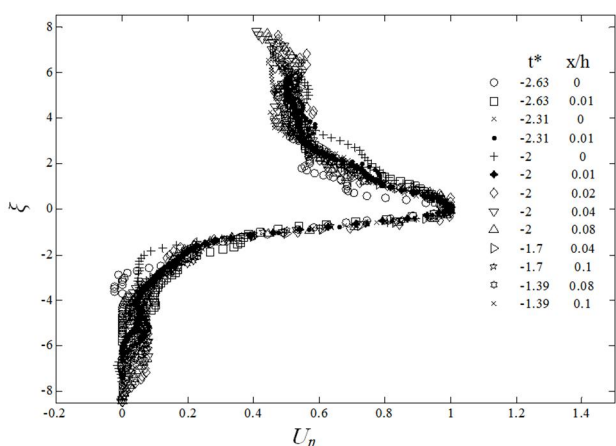


Fig.18 Non dimensional horizontal velocity profile in different time and section at the rear edge of the obstacle

شکل 18 پروفیل بی‌بعد سرعت افقی در مقاطع و زمان‌های مختلف در پشت مانع

جدول 2 مقایسه‌ی ضرایب معادله‌ی 8 در آزمایش انجام شده در این پژوهش و مراجع [14], [12]

Table 1 Comparison the constant of equation 8 between this study and reference [12], [14]

پارامتر	مستطیل با پهنای کم [14]	مستطیل با پهنای زیاد [14]	مانع نازک
C_1	1.63	2.7238	0.0910
C_2	1.5032	2.9873	0.9071
C_3	0.2799	0.4617	0.2645
C_4	14.7156	0.0481	-0.5021
C_5	0.0187	-1.7244	-0.003
C_6	145.94	30.719	69.03
R^2	0.979	0.988	0.978

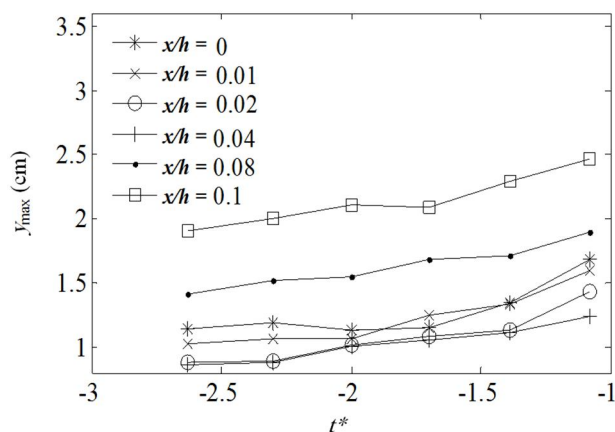


Fig.15 The changes in y_{max} with time at different section

شکل 15 تغییرات y_{max} بازمان در مقاطع مختلف

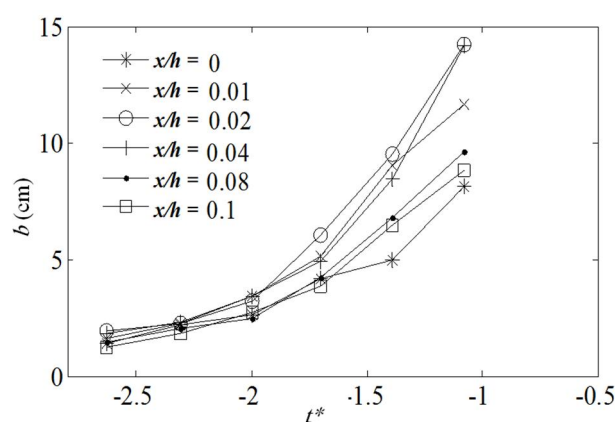


Fig.16 The changes in b with time at different section

شکل 16 تغییرات b بازمان در مقاطع مختلف

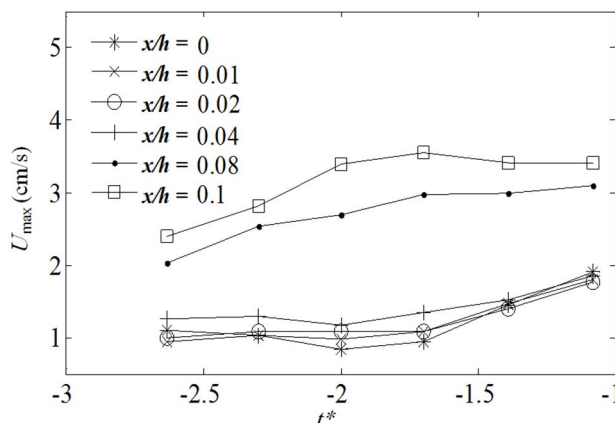
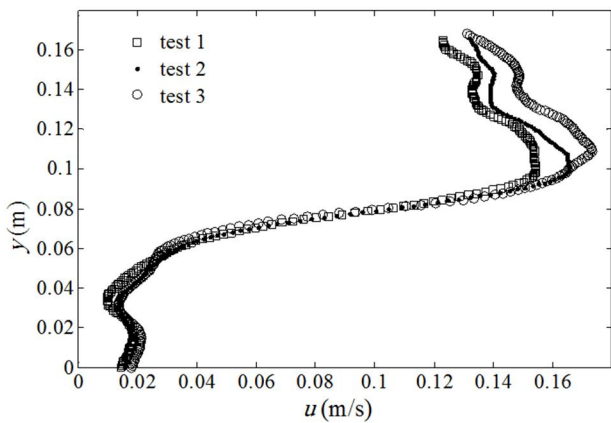


Fig.17 The changes in u_{max} with time at different section

شکل 17 تغییرات u_{max} با زمان در مقاطع مختلف

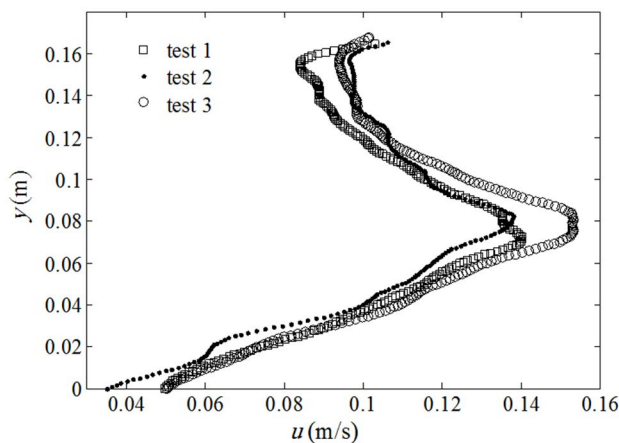
با بدون بعد کردن محورهای سرعت و مکان از طریق روابط (6) و (7) مشاهده می‌شود که تمامی نمودارهای سرعت در زمان و مکان‌های متفاوت در پشت مانع تقریباً از یک مسیر عبور می‌کنند. این نمودار بدون بعد شده در "شکل 18" برای 4 زمان و 4 مقطع نزدیک مانع رسم شده است. برای برازش منحنی میانگین عبوری از نقاط "شکل 18" از معادله‌ی پیشنهادی لین استفاده شده است. معادله‌ی پیشنهادی لین برای این پروفیل در پشت اجسام مستطیلی به‌صورت معادله‌ی (8) است.

7- پیوست



Appendix.1 Compare the horizontal component of speed in the 3 tests at $t^* = -0.08$ and $\frac{x}{h} = 0.15$

پیوست 1 مقایسه مؤلفه افقی سرعت در 3 آزمایش در $t^* = -0.08$ و $\frac{x}{h} = 0.15$



Appendix.2 Compare the vertical component of speed in the 3 tests at $t^* = -0.08$ and $\frac{x}{h} = 0.15$

پیوست 2 مقایسه مؤلفه عمودی سرعت در 3 آزمایش در $t^* = -0.08$ و $\frac{x}{h} = 0.15$

8- مراجع

[1] C. Chian, R. C. Ertekin, Diffraction of solitary waves by submerged horizontal cylinders, *Wave Motion*, Vol. 15, No. 2, pp. 121-142, 1992.

[2] G. A. Zarruk, E. A. Cowen, T. R. Wu, Vortex shedding and evolution induced by a solitary wave propagating over a submerged cylindrical structure, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 124, No. 1, pp. 742-749, 2015.

[3] C. Y. Chen, An experimental study of stratified mixing caused by internal solitary waves in a two-layered fluid system over variable seabed topography, *Ocean Engineering*, Vol. 34, No. 14, pp. 1995-2008, 2007.

[4] C. M. Hsieh, R. R. Hwang, J. R. Hsu, M. H. Cheng, Numerical modeling of flow evolution for an internal solitary wave propagating over a submerged ridge, *Wave Motion*, Vol. 55, No. 1, pp. 48-72, 2015.

[5] C. H. Chang, C. J. Tang, C. Lin, Vortex generation and flow pattern development after a solitary wave passing over a bottom cavity, *Computers & Fluids*, Vol. 53, No. 1, pp. 79-92, 2012.

[6] C. J. Tang, J. H. Chang, Flow separation during solitary wave passing over submerged obstacle, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 7, pp. 724-749, 1998.

[7] C. J. Huang, C. M. Dong, On the interaction of a solitary wave and a submerged dike, *Coastal Engineering*, Vol. 43, No. 3, pp. 265-286, 2001.

[8] K. A. Chang, T. J. Hsu, P. L. Liu, Vortex generation and evolution

هندسه‌های ضخیم یک گردابه بر روی سطح بالایی مستطیل و یک گردابه در پشت مانع تشکیل می‌شود که هر دو نیز در یک جهت چرخش و قدرت یکسان دارند. در حالی که در صفحه‌ی نازک قائم به علت کم بودن ضخامت صفحه در روی آن گردابه‌ای تشکیل نمی‌شود و تنها یک گردابه‌ی ساعت‌گرد در پشت مانع و یک گردابه‌ی پادساعت‌گرد در جلوی مانع (بالادست) تشکیل می‌شود که لزوماً دارای قدرت یکسان نیستند.

3- قدرت بیشینه‌ی گردابه‌ی ساعت‌گرد در پشت صفحه‌ی نازک در حدود سه برابر قدرت گردابه‌ی پادساعت‌گرد در جلوی آن است. علاوه بر این تشکیل گردابه‌ی پادساعت‌گرد به دلیل محل تشکیل و جهت چرخش باعث کاهش نیروی پسا منفی ناشی از گردابه‌ی پادساعت‌گرد در زمان‌های بعد از عبور موج می‌شود.

4- بررسی الگوی مؤلفه‌ی افقی سرعت در زمان‌های اولیه در پشت مانع نازک نشان می‌دهد که این پروفیل سرعت الگوی نسبتاً یکنواختی دارند و پس از بدون بعد شدن همگی از یک منحنی پیروی می‌کنند. این منحنی با معادله‌ی معرفی شده برای مستطیل ضخیم [12] با دقت بالا و ضریب رگرسیون 0.978 برازش می‌شود.

6- فهرست علائم

B	عرض مانع (m)
b	فاصله‌ی بین محل سرعت بیشینه و نصف آن (m)
c	ضرایب ثابت معادله
D	ارتفاع مانع (m)
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
H	ارتفاع بیشینه موج (m)
h	ارتفاع آب ساکن (m)
L	ضخامت مانع (m)
Re	عدد رینولدز
t	زمان (s)
u	مؤلفه افقی سرعت (ms^{-1})
v	مؤلفه عمودی سرعت (ms^{-1})
x	مختصات طولی (m)
y	مختصات عرضی (m)

علائم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ω	ورتیسیته (s^{-1})
ν	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
Γ	سیرکولاسیون (m^2s^{-1})
ξ	مکان بدون بعد شده

بالانویس‌ها

* بدون بعد شده‌ی پارامتر اصلی

زیرنویس‌ها

m	بیشینه
max	بیشینه
min	کمینه
n	بدون بعد شده

- Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Hamburg, Germany, June 4-9, 2006.
- [15] C. F. Ferguson, *Submerged Pressure Differential Wave Energy Converter*, PhD Thesis, Department of Faculty of the Physics, California Polytechnic State University, San Luis, 2011.
- [16] *Hollow glass spheres and silver-coated hollow glass spheres*, Dantec Dynamic company, Accessed 10 march 2006; <http://www.dantecdynamics.com/seeding-materials>.
- [17] *Yag laser LWGL532-130112 model*, Beijing Laserwave Optoelectronics Tech company, Accessed 22 january 2005; <http://www.pco.de/scmos-cameras>.
- [18] *CMOS camera 1200h model*, PCO company, Accessed 8 may 2008; http://www.laser-wave.com/EN/products_show.aspx.
- [19] *Wave height gauge AWP-24-3 model*, Acamina company, Accessed 15 april 2001; <http://www.akamina.com/AWP-300-3.html>.
- [20] W. Thielicke, E. J. Stamhuis, Affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB, *Journal of Open Research Software*, Vol. 2, No. 1, pp. 30-31, 2014.
- [21] Gh. Taherian, M. Nili-Ahmadabadi, M. Zabetian, M. Karbasipour, Two-dimensional investigation of free convection flow around a heated horizontal cylinder immersed in water using PIV technique, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 4, No. 1, pp. 107-117, 2014. (in Persian فارسی)
- in water waves propagating over a submerged rectangular obstacle: Part I. Solitary waves, *Coastal Engineering*, Vol. 44, No. 1, pp. 13-36, 2001.
- [9] Y. T. Wu, S. C. Hsiao, Z. C. Huang, K. S. Hwang, Propagation of solitary waves over a bottom-mounted barrier, *Coastal Engineering*, Vol. 62, No. 1, pp. 31-47, 2012.
- [10] K. S. Hwang, Z. C. Huang, H. H. Hwang, K. A. Chang, Unstable vortices induced by solitary waves propagating over a rectangular barrier, *Proceedings of The 10th Asian Symposium on Visualization*, Andhra Pradesh, India, April 10, 2009.
- [11] M. Y. Lin, L. H. Huang, Vortex shedding from a submerged rectangular obstacle attacked by a solitary wave, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 651, No. 1, pp. 503-518, 2010.
- [12] C. Lin, T. Y. Ho, S. C. Hsieh, K. A. Chang, Laboratory observation of solitary wave propagating over a submerged rectangular dike, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 132, No. 5, pp. 545-554, 2006.
- [13] F. Zhuang, J. J. Lee, A viscous rotational model for wave overtopping over marine structure, *Proceedings of The 25th International Conference on Coastal Engineering*, Orlando, U. S. statec, September 2-6, 1996.
- [14] C. Lin, T. Y. Ho, S. C. Hsieh, K. A. Chang, Characteristics of vortex shedding process induced by a solitary wave propagating over a submerged obstacle, *Proceedings of The 25th International*