ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی دوبعدی عبور تک موج از روی صفحهی ناز ک عمودی با استفاده از روش سرعت-سنجي تصويري 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 پستى 8415683111 mrtavak@cc.iut.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله
بررسی عبور تک موج از روی موانع مغروق و مطلعهی 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 صفحه ی ناز	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 26 اسفند 1394 پذیرش: 07 اردیبهشت 1395 ارائه در سایت: 12 خرداد 1395
— 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	کلید واژگان:
تداخلی نوری PIV استفاده شده است که بدون ایجاد اغتشاش در جریان قابلیت اندازهگیری سرعت سیال را دارد. بررسی الگوی جریان، مقادیر	تک موج
سرعت و ورتیسیته در لحظات مختلف، نشان میدهد که قبل از رسیدن موج به مانع گردابهی ساعتگردی در پشت مانع تشکیل میشود که با	گردابه
گذشت زمان افزایش شعاع داده و باعث تشکیل یک جت عمودی سیال در پاییندست مانع میشود. با ورود جریان به ناحیهی پاییندست یک	صفحهی ناز ک
گردابهی یادساعتگرد ضعیفتر در این ناحیه تشکیل میشود که تفاوت اصلی در الگوی جریان نسبت به هندسههای ضخیم را ایجاد میکند.	موج ساز
علاوه بر این شکل بدون بعد مؤلفه افقی سرعت در پشت مانع در لحظهی شکل گیری لایه برشی استخراج شده و با حالتی که جسم دارای	روش سرعت سنجی تصویری ذرات
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	Abstract
Original Research Paper Received 16 March 2016 Accepted 26 April 2016 Available Online 01 June 2016	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
<i>Keywords:</i> Solitary wave Vortex Thin Plate Wave maker PIV	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- introsire 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.
ام الم الم	

روشهای تداخلی مثل استفاده از روش سرعتسنجی سیمداغ و حسگرهای التراسونیک و یا روش های غیر تداخلی مثل روش های نوری تقسیم بندی می-شوند. روشهای نوری به دلیل عدم تأثیر در جریان سیال مورد استقبال فراوانی قرار گرفتهاند. PIV¹ وLIF² ازجمله 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 اندازه گیری سرعت سیال از روش های عددی و تجربی مختلفی استفاده می شود. اندازه گیری تجربی سرعت سیال در حالت کلی به

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

¹ Particle Image Velocimetry ² Laser Image Fluorescent

Please cite this article using:

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

در اجسام مغروق به دلیل عدم برخورد با سطح موج، غالبا پدیدهی شکست موج ایجاد نمیشود و در نتیجه آشفتگی کمتری در اطراف مانع ایجاد می کنند. 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 اندازه-گیری سرعت سیال هم از روش سرعتسنجی تصویری ذرات¹ استفاده شده است [2].

در پژوهشهایی با موانع غیر استوانهای، محل قرارگیری مانع مغروق غالبا 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 فلوئورسنت بین دو سطح مرز ایجاد شده بین دو سطح را به خوبی مشخص کرد و تصاویر پرش هیدرولیکی ایجاد شده را استخراج كرد [3]. بعدها همين كار بهصورت شبيهسازي عددي، توسط هسيه 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 تقریبا به قطر حفره داخل آن ایجاد می شود و پس از مدتی گردابهی دیگری با چرخش در جهت عکس گردابهی اولیه در قسمت کف حفره ایجاد می شود [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 رينولدز 8200 بررسى كردند [6]. هوانگ همين كار 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 عمق0.7 پرداختند. آنها ابتدا با روش سرعتسنجي تصويري ذرات، آزمايش خود را انجام داده و سپس همان شرایط را به صورت عددی شبیه سازی کردند. از آنجایی که در پشت و جلوی مانع مستطیلی دو گردابه تشکیل می شود، مشاهدات آنها نشان داد که قدرت گردابهی تشکیل شده در جلو مانع مستطیلی تقریبا با گردابهی تشکیل شده در عقب مانع برابر است [8]. یانو و

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 شده توسط آنها مانع مستطیلی دارای ضخامت بسیار کمی نسبت به مستطیلهای آن بود. البته نمیتوان آن را صفحهی نازک نامید، ولی نسبت به مستطیلهای ازمایش های قبلی بسیار متفاوت بود. آنها برای شبیه سازی از مدل اعتبار سنجی شده ی و مدل اغتشاشی s - k است [9]. علاوه بر کارهای متوسط نویر -استوک⁴ و مدل اغتشاشی s - k است [9]. علاوه بر کارهای مانع مغروق مستطیلی انجام شده است که شاید بتوان کارهای هوانگ و لین مانع مغروق مستطیلی انجام شده است که شاید بتوان کارهای هوانگ و لین مانع مغروق مستطیلی انجام شده است که شاید بتوان کارهای هوانگ و لین مانع مغروق مستطیلی انجام شده است که شاید بتوان کارهای هوانگ و لین مانع مغروق مستطیلی انجام شده است که شاید بتوان کارهای هوانگ و لین مانع مغروق مستطیلی انجام شده است که شاید بتوان کارهای هوانگ و لین مانع مغروق مستطیلی انجام شده است که شاید بتوان کارهای موانگ و لین مانع مغروق مستطیلی انجام شده است که شاید بتوان کارهای موانگ و لین مانع مغروق مستطیلی انجام شده است که شاید بتوان کارهای موانگ و لین مانع مغروق مستطیلی انجام شده است که شاید بتوان کارهای موانگ و لین مانع مغروق مستطیلی انجام شده است که شاید بتوان کارهای موانگ و لین مانع مغروق مستطیلی انجام شده است که شاید بتوان کارهای موانگ و لین موانگ و لین مانع مغروق مستطیلی با ضخامت های میز کرد [14].

همان طور که مشاهده می شود در همه ی پژوهش های قبلی انجام گرفته بر روی اجسامی با هندسه یمستطیلی، 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 تبدیل کننده ی انرژی امواج به انرژی الکتریکی استفاده می شود از یک صفحه-ی نازک استفاده می شود که بر اثر اختلاف فشار ناشی از عبور موج و نوسانات ایجاد شده در دو طرف صفحه به حرکت در می آید [15]. لذا اطلاع از وضعیت تشکیل گردابه ها که ایجاد کننده های نوسان در دو طرف مانع هستند، می تواند 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 مى توان مقادير سرعت، الكوى جريان، محل تشكيل گردابه ها و مقادير ورتیسیته را در اطراف مانع مشخص کرد. علاوه بر این بررسی شکل بی بعد مؤلفه افقی سرعت، در حین شکل گیری لایهی برشی در پشت مانع نازک انجام شده و با پژوهشهای انجام شده بر روی هندسهی مستطیل مقایسه شده است.

2-بستر آزمایش تجربی 1-2- شرایط کانال و دستگاه موج ساز

برای انجام این آزمایش از یک کانال باز با ابعاد $4 \times 0.4 = 0.5 \times 0.5 \times 0.5$ در ارتفاع 120 سانتیمتری از سطح زمین قرار گرفته استفاده شده است. این کانال با سطوح شفاف و از جنس پلکسی گلاس⁶ 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 شامل ارتفاع آب ساکن (h)، ارتفاع بیشینهی موج در لحظهی رسیدن موج به شامل ارتفاع آب ساکن (h)، ارتفاع بیشینهی موج در لحظهی رسیدن موج به مانع (H)، سرعت موج (n) و ابعاد مانع که شامل ارتفاع (n)، ضخامت (L) و مرض (B) آن است، در جدول 1 مشخص شده است. مطابق مرجع [B] برای

³ Volume of Fluid

⁴ Reynolds-averaged Navier-Stokes Equations

⁵ Shear layer ⁶ Plexiglass

مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1395، دورہ 16، شمارہ 5



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

شکل 1 شماتیک شرایط کانال و محل قرارر گیری مانع در آزمایش

با توجه به این که از مقطع وسط کانال تصویربرداری می شود، فاصلهی لنز دوربین تا محل تصویربرداری حدودا 25 سانتی متر است. زمان تصویربرداری از لحظهی حرکت موج ساز تا لحظهی رسیدن موج به انتهای کانال است. بعدازاین 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 بی بعدسازی زمان

$$t^* = t \sqrt{\frac{g}{h}} \tag{4}$$

در رابطهی (4)، t^* زمان بدون بعد شده است و $0 = t^*$ 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 حدودا در **1.4 =** t 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 می شود 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" می توان 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 مقایسه ی عکسهای متوالی و دنبال کردن دسته ذرات موجود در عکسها است، می توان به شکل بردارهای سرعت در هرلحظه 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 $\mathbf{Re} = \frac{Uh}{v}$ (1) $\sum_{\nu = 1}^{n} \sum_{\nu = 1}^{n} \sum_{\nu$

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

$$\mu_m = \frac{H}{h} \sqrt{g(h+H)} \tag{3}$$

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 می شود. 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 می گردد. با تحلیل این عکسها بردارهای سرعت سیال بهدست خواهد آمد. برای انجام این آزمایش ابتدا ذرات 10 و 20 مایکرونی از جنس یودر 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 بهخوبی 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 ادموند³ 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 CMOS⁴ساخت شرکت آلمانی PCO با سرعت 450 فریم بر ثانیه و کیفیت تصویری 1024 × 1280 پیکسل انجام شده است [18]. لنز دوربين مورد استفاده نيكون 50 ميلىمترى با عدد كانونى 1.8 بوده و فاصله-ی، لنز دوربین از دیواره کانال حدودا 10 سانتیمتر است.

جدول 1 شرایط در نظر گرفته شده برای آزمایش

نماد	واحد	مقدار	پارامتر
h	m	0.26	ارتفاع آب ساکن
Н	m	0.09	ارتفاع بيشينه موج
С	m/s	1.84	سرعت تئورى موج
D	m	0.13	ارتفاع مانع
L	m	0.004	ضخامت مانع
В	m	0.3	عرض مانع
Re	-	329189	عدد رينولدز

¹ Dantec

² Beijing ³ Edmund

⁵ Acamina ⁶ Matlab

⁴ Complementary Metal Oxide Silicon

به دلیل این که نور لیزر از کف کانال تابیده می شود، 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 می شود که خود را به صورت ناپیوستگی اندکی در شکل بردارها نشان می دهد.

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 کاملا قابل 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 مؤلفه-های 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 \mathcal{P} رفتهاند. بهعنوان نمونهای از بررسیهای انجام شده برای تکرارپذیری آزمایش مخص و درک بهتر آن مؤلفههای افقی و عمودی سرعت برای زمان مشخص شده است و مورد مقایسه قرار منده است و مورد مقایسه قرار می مختلف در هر سه آزمایش به دست آورده شده است و مورد مقایسه قرار مرک بهتر آن مؤلفههای افقی و عمودی سرعت برای زمان مشخص شده است. بعنوان نمونهای از بررسیهای انجام شده برای تکرارپذیری آزمایش مشخص شده است. در پیوست 7 مؤلفه ی و مودی سرعت و در پیوست 7 مؤلفه ی مودی شده است. در نهایت اختلاف مقادیر شرعت برای هر 20 نقطه و هر سه آزمایش در هر حالت محاسبه شده سرعت هرای مرای هر 200 نقطه و هر سه آزمایش در هر حالت محاسبه شده سرعتها برای هر 200 نقطه و هر سه آزمایش در همه ی حالتها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان میدهد که میانگین خطای تکرارپذیری مطلق در حدود (m/s) مودن مغشوش بودن جریان مقدار بسیار قابل قبولی سیال و وجود عواملی چون مغشوش بودن جریان مقدار بسیار قابل قبولی سیال و مود عواملی چون مغشوش بودن جریان مقدار بسیار قابل قبولی سیال.

3-نتايج بررسي الگوي كلي جريان 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

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 ساعت گرد در پشت مانع را فراهم میسازد.

همان طور که در شکل 4 مشاهده می شود، در لحظات رسیدن موج به مانع این گردابه تقریبا به طور کامل شکل گرفته است. درواقع تا زمان رسیدن موج به مانع و اندکی بعد از آن، این گردابه از موج انرژی گرفته و قوی تر می-شود، که مکانیزم انتقال انرژی به این گردابه در این وضعیت از نوع انتقال² است. در "شکل 5" هم مؤلفه های 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 می کند [8].

همچنین مقایسهی "شکل 6 با شکل 4" بهخوبی افزایش شعاع گردابه را نشان میدهد. روند تشکیل این گردابه ی ساعت گرد در پشت مانع دقیقا مشابه با آن چیزی است که در هندسههای مستطیلی ضخیم مشاهده میشود، با این تفاوت که در هندسههای ضخیم همزمان یک گردابهی ساعت گرد 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 (1.0 = h/x و 2.0 = h/x) 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 لحظه
ی $t^{*}=-2.21$

² Convection ³ Diffusion



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 لحظه ی 1.2* t 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 شکل گیری 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 می کند. افزایش شعاع گردابه، جریان را به سمت مانع سوق داده و در واقع باعث تغییر جهت مؤلفه افقی سرعت در نزدیکی مانع می شود. جریانی که به سمت مانع مىآيد از يک طرف به كف كانال محدود شده و از طرفي 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 می شود. این پدیده در "شکل 8" در قسمت پشت مانع کاملا قابل مشاهده است. همچنین افزایش مؤلفه قائم سرعت در "شکل 9" در مقاطع پشت مانع نشان دهنده ی 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 می رود. در همین لحظات جت عمودی سیال در پاییندست مانع، تشکیل شده و مقداری از سیال را بهآرامی وارد بخش بالادست مانع می کند که باعث تشکیل گردابه ی پادساعت گرد جدیدی در جلوی مانع (بالادست) می شود. گردابه ی جدید تشکیل شده از لحاظ قدرت ضعیفتر و ازلحاظ ابعاد کوچکتر از گردابهی ساعت گرد اولیه است. همچنین زمان اندکی بعد از تشکیل این گردابه موج به انتهای کانال میرسد. اما به طور 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 مستطيلي [8-11] خود را بيش از هر چيز در اين قسمت نشان میدهد. البته در موانع ضخیم هم تشکیل جت عمودی سیال در اثر یخش 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 یشت مانع بر جلوی مانع و تشکیل گردابهی یادساعت گرد می شود.



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





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

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



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 مقایسه یقدرت دو گردابه، مقدار سیر کولاسیون¹ اطراف گردابه ها محاسبه شده است. با توجه به این که مقدار ورتیسیته² از مؤلفه های سرعت به دست آمده از آزمایش سرعت سنجی تصویری ذرات استخراج شده است، با انتگرال گیری از آن در یک محیط بسته مطابق رابطه ی (5)می توان مقدار سیر کولاسیون (T) را محاسبه نمود. (5)

$$T = \oint \omega dA \tag{5}$$

که در رابطهی (5)، w ورتیسیتهی 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. همان طور که مشاهده می شود مقدار قدر مطلق بیشینه سیرکولاسیون تشکیل



Fig.11 Absolut value circulation of clockwise voltex 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



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



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 3.68=*t 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 می شود، تقریبا یکسان هستند [8]. برای این که 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. همان طور که مشاهده می شود، مطابق "شكل 10" در زمان تشكيل گردابهى يادساعتگرد، گردابهى ساعتگرد اولیه به شعاع نسبتا قابلتوجهی رسیده است. نکتهی قابل ذکر دیگر این است که همان طور که قبلا اشاره شد جهت حرکت گردابه ها به سمت بالا بوده و به نظر میرسد با استناد به مرجع [7] که در آن نسبت ارتفاع مانع به ارتفاع آب ساكن مطابق پژوهش انجام گرفته برابر 0.5 است، اگر طول كانال به اندازهی کافی زیاد بود، دو گردابه به سطح آب خواهند رسید. اما نباید فراموش كرد كه اين مسئله تحت تأثير نسبت ارتفاع مانع به ارتفاع آب ساكن است. چنانچه ارتفاع مانع زیاد بوده و به سطح آب نزدیک باشد گردابهی ساعت گرد تحت تأثير موج قرار گرفته و به سمت كف كانال حركت مىكند، که نمونهای از آن را می توان در پژوهش انجام گرفته توسط ویو و همکاران (با نسبت D/H = 0.8) مشاهده کرد [9].

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.20.1

¹ Circulation ² Vorticity

شده توسط گردابهی ساعتگرد، تقریبا 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 شکل گیری لایه برشی

همان طور که پیش از این توضیح داده شد، لین معادلهای را برای شکل بدون بعد مؤلفهی افقی سرعت در لحظات ابتدایی شکل گیری 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 توضيحات ارائه شده دربارهی تفاوت جدايش جريان 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 می شود که نشان دهنده ی تغییرات مؤلفهی افقی سرعت در زمانها و مکانهای مختلف پشت مانع هستند. همانطور که در این دو شکل مشاهده می شود با وجود تغییر در مقادیر عددی، شکل کلی پروفیل سرعت در مقاطع و زمان های مختلف تا حدودی یکسان است و مشابهت زیادی با پروفیل معرفی شده توسط لین "شكل 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 س¹ سو w_{max} سرعت کمینه اس¹ و فاصلهی بین محل سرعت بیشینه با محل نصف سرعت بیشینه b نامیده شود، آن گاه از طریق روابط (6) و (7) میتوان نمودارهای مؤلفههای افقی سرعت در مقاطع پشت مانع را بدون بعد کرد.

$$\xi = \frac{y - y_{\text{max}}}{b} \tag{6}$$

$$U_n = \frac{u - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}} \tag{7}$$

که در این روابط $\xi e_n U_n$ به ترتیب معرف مکان بی بعد و سرعت بی بعد شده هستند. پارامترهای u_{max} u_{max} و d در زمانها و مکانهای محاسبه شده از روی "شکلهای 13 و 14" قابل دستیابی است. بدین منظور کافی است محل 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

15 تا شكل "17 ترسیم شدهاند. بهطوركلی به غیر از لحظات ابتدایی مشاهده میشود كه روند تغییرات به y_{max} و b با زمان تقریبا رو به افزایش است كه البته این تغییرات به صورت خطی نمیباشند. همچنین مطابق انتظار با گذشت زمان و نزدیك شدن موج به مانع u_{max} u_{min} و m_{max} مانع u_{max} و مانع u_{max} مانع حواهند عوامند زمان و نزدیك شدن موج به مانع رامن كنترل میشود. در نتیجه این یافت و حاصل تفاضل آنها بهنوعی با زمان كنترل میشود. در نتیجه این تعادل اثر خور را در پارامتر بعدون بعد u_n نشان میده.



hind a second state and a state of a state of the second state of the

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

شکل 12 الگوی مؤلفه افقی سرعت در لحظهی شکل گیری 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 0.04 = 🕺



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 می شود که تمامی نمودارهای سرعت در زمان و مکانهای متفاوت در پشت مانع تقریبا از یک مسیر عبور می کنند. 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 به صورت معادلهی (8) است.

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

که در این معادله ضرایب C_1 تا C_0 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 به دست 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-نتيجه گيري

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 پادساعت گرد در بالا دست 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 زمان های مختلف در پشت مانع

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

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

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



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

 $\frac{x}{\mu}$ = 0.15 و $t^* = -0.08$ و در 3 آزمایش در $t^* = -0.08$ و ازمایش در $t^* = -0.08$ و ازمایش در



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

 $\frac{x}{h}$ = 0.15 و $t^* = -0.08$ پیوست $t^* = -0.08$ و $t^* = -0.08$ و زمایش در

8-مراجع

- 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 solitarywaves 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

3- قدرت بیشینهی گردابهی ساعت گرد در پشت صفحهی نازک در حدود سه برابر قدرت گردابهی پادساعت گرد در جلوی آن است. علاوهبر این تشکیل گردابهی پادساعت گرد به دلیل محل تشکیل و جهت چرخش باعث کاهش نیروی پسا منفی ناشی از گردابهی پادساعت گرد در زمان های بعد از عبور موج می شود.

4- بررسی الگوی مؤلفهی افقی سرعت در زمانهای اولیه در پشت مانع نازک نشان میدهد که این پروفیل سرعت الگوی نسبتا 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

- ^E عرض مانع (m)
- (m) فاصله ی بین محل سرعت بیشینه و نصف آن
 - ضرایب ثابت معادله c
 - ^D ارتفاع مانع (m)
 - ^g شتاب گرانش (ms⁻²)
 - (m) ارتفاع بیشینه موج (H
 - (m) ارتفاع آب ساکن (h
 - (m) فخامت مانع L
 - Re عدد رينولدز
 - ا زمان (s)
 - (ms^{-1}) مؤلفه افقی سرعت u
 - (ms⁻¹) مؤلفه عمودی سرعت *v*
 - : مختصات طولی (m)
 - y مختصات عرضی (m)

علائم يونانى

لا جت دینامیکی (^{(r-1}s⁻¹))
 ورتیسیته (^{(r-1}s))
 ورتیسیته (^{(r-1}s))
 لزجت سینماتیکی (^{(m-2}s⁻¹))
 سیر کولاسیون (^{(m-2}s⁻¹))
 مکان بدون بعد شده

بالانويسها

بدون بعد شدهي پارامتر اصلي

- زيرنويسها
- يب ^m بي **max**
- min کمن

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 نفارسی)

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. Hwung, 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*