

بررسی تجربی ساختار جریان تک موج عبوری از روی یک مانع مستطیلی با استفاده از تکنیک PIV

مهران کرباسی پور
 مهدی نیلی احمدآبادی*
 رضا زاغیان
 محمد رضا توکلی

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
 دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
 کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
 استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

یکی از روش‌های حفاظت از سواحل، استفاده از موج‌شکن‌ها و موانع مغروق است. موج‌شکن‌ها با ایجاد جریان‌های آشفته و گردابی باعث مستهلک شدن بخش اعظمی از انرژی موج می‌شوند. در پژوهش حاضر با قرار دادن یک مانع مستطیلی در برابر تک موج، به تشکیل و گسترش گردابه‌های ایجاد شده با استفاده از تکنیک PIV (Particle Image Velocimetry) پرداخته شده است. نتایج PIV نشان می‌دهد با نزدیک شدن موج به مانع، به علت جدایش جریان، دو گردابه در اطراف لبه ابتدایی (۱) و انتهایی (۲) مانع تشکیل شده و با نزدیک‌تر شدن موج به مانع، این گردابه‌ها گسترش پیدا کرده و اندازه آن‌ها بزرگ‌تر می‌شوند. با رسیدن گردابه‌ی تشکیل شده در لبه ابتدایی (۱) مانع به انتهای مانع، دو گردابه با یکدیگر ترکیب شده و در نتیجه گردابه بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند. در ادامه با استفاده از حسگرهای ارتفاع سنج موج، میزان کاهش ارتفاع موج قبل و بعد مانع اندازه‌گیری شده و نتایج نشان می‌دهد وجود مانع سبب کاهش ۳٪ ارتفاع موج نسبت به حالت بدون مانع شده است. در نهایت، با محاسبه انتگرال فشار و شار اندازه حرکت از نتایج PIV حول مانع، میزان نیروی پسای وارد شده به مانع بدست می‌آید.

واژه‌های کلیدی: تک موج، تکنیک PIV، تشکیل گردابه، موج‌شکن.

Experimental Investigation of Flow Structure of Passing Solitary Wave over A Rectangular Obstacle using PIV Techniques

M. Karbasi pour
 M. Nili-Ahmadbadi
 R. Zaghian
 M. Tavakoli

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

Abstract

Breakwater or submerged obstacle is one of the methods used for protection of the coast. Breakwaters cause dissipation of wave energy by generation of turbulence flow and vortices. In this study, by insert a rectangular obstacle against a solitary wave, the generation and evolution of vortices have been investigated by using Particle Image Velocimetry (PIV) technique. The PIV results show due to flow separation, two vortices are formed around the front and back edges of the obstacle when the solitary wave approaches the obstacle. The closer the wave approaches the obstacle, the larger the vortices are. When the formed vortex over the front edge of the obstacle approaches its end, these two vortices are merged together and form a larger vortex. In the following, the reduction of wave height before and after the obstacle is measured through a wave gage altimeter sensor. The results show the existence of obstacle decreases up to 3% of wave height in comparison to that without obstacle. Finally, by integrating pressure and momentum flux from the PIV results around the obstacle, the drag force applied to the obstacle is obtained.

Keywords: Solitary Wave, PIV Technique, Vortex generation, Breakwater.

۱- مقدمه

مستطیلی صورت پذیرفته است. از جمله کارهای تجربی اولیه می‌توان به بررسی آزمایشگاهی تینک و کیم اشاره نمود. آن‌ها با استفاده از سرعت سنج لیزری، به بررسی گردابه تولید شده به علت عبور تک موج از روی مانع مستطیلی پرداختند. ارتفاع موج و سرعت سیال در محدوده امواج بدون شکست بررسی شد [۱]. اهيام و همکاران نیز با استفاده از دستگاه‌های ارتفاع سنج موج به اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب در زمان عبور امواج استوکس از روی موج‌شکن مستغرق پرداختند [۲]. زهانگ و لی به صورت عددی و آزمایشگاهی به مطالعه برخورد تک موج با مانع مستطیلی پرداختند. به منظور اندازه‌گیری سرعت ذرات آب با روش سرعت سنج لیزری، از چهار بیم

امروزه اهمیت حفاظت از سواحل در برابر فرسایش و دیگر خطرات زیست محیطی به صورت گسترده مورد توجه محققان و مهندسين ساحلی قرار گرفته است. یکی از روش‌های حفاظت از سواحل، استفاده از موج‌شکن‌ها و موانع مغروق است. موج‌شکن‌ها با ایجاد جریان‌های آشفته و گردابی باعث مستهلک شدن بخش اعظمی از انرژی موج و جلوگیری از انتقال رسوبات می‌شوند. به منظور فهم جریان پیچیده در اطراف موج‌شکن‌ها، استفاده از یک مانع مستطیلی شکل امری طبیعی و الزام آور است. تا کنون مطالعات گسترده‌ای به صورت تجربی و عددی بر روی تک موج عبوری از روی مانع

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.nili@cc.iut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۲/۱۳

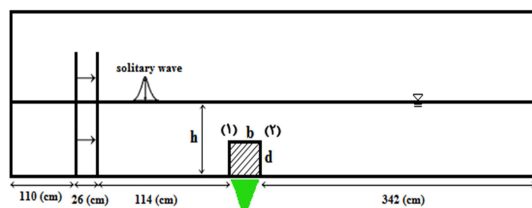
تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۸

بررسی اثر ارتفاع موج بر تشکیل و گسترش گردابه صورت پذیرفت. ارتباط بین میدان گردابه و نیروی پسا وارد بر مانع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌داد نیروی پسا وارد بر مانع به صورت قابل توجهی از میدان گردابه قابل تأثیر است. همچنین یک رابطه تقریباً خطی بین عدد رینولدز و اندازه بیشینه نیروی پسا وارد بر مانع مشاهده شد [۱۲]. چانگ و همکاران به بررسی عددی و تجربی تک موج عبوری از روی حفره ایجاد شده در کف کانال پرداختند. همچنین اثر ارتفاع موج و ابعاد حفره بر روی جریان گردابی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حفره با پهنای ۰.۵ برابر عمق آب، تأثیر کمی بر تک موج می‌گذارد. در صورتی که افزایش پهنای حفره باعث ایجاد اغتشاش بیشتر در موج بازتابی و انتقالی می‌شود [۱۳]. یان تا وو و همکاران به بررسی تجربی و عددی برخورد تک موج با مانع عمودی نصب شده در کف کانال پرداختند. به منظور بررسی میدان سرعت از تکنیک PIV استفاده شد. نتایج نشان داد که شکست موج در جهت مخالف بعد از عبوری تک موج از روی مانع رخ می‌دهد و بیشترین مقدار آشفتگی در نقطه شکست موج رخ می‌دهد [۱۴]. هانگ زیو و همکاران به صورت عددی به بررسی نیروی اعمالی بر سیلندر افقی بر اثر برخورد تک موج و جریان یکنواخت در نزدیک سطح آزاد پرداختند. نتایج نشان داد که نیروی اعمالی بر سیلندر در حالتی که موج و جریان یکنواخت همزمان بر سیلندر وارد می‌شوند بیشتر از حالتی است که هر کدام به تنهایی بکار می‌رود [۱۵]. وهو مو و همکاران به مطالعه شکست موج در اثر برخورد تک موج با سیلندر عمودی نصب شده در سطح شیب‌دار پرداختند. به منظور بدست آوردن پروفیل سطح و میدان سرعت از تکنیک PIV استفاده گردید. شبیه‌سازی عددی بر اساس مدل LES و مدل توربولانسی RNG صورت پذیرفت و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد [۱۶]. کوان زوو و همکاران به بررسی عددی برخورد تک موج و دو مانع مستطیلی متوالی در فواصل مختلف پرداختند. ایشان تأثیرات ارتفاع موج و فاصله میان دو مانع را بر گردابه ایجاد شده و نیروی پسا اعمالی مورد بررسی قرار دادند. همچنین مطالعه پارامتریک بر روی ضرایب بازتاب، انتقال و اتلاف انرژی نیز صورت پذیرفت. نتایج نشان داد وجود مانع عقبی دارای اثری مستقیمی بر حرکت و اندازه گردابه اولیه تشکیل شده در پشت مانع جلویی است. همچنین حضور مانع عقبی، حداکثر مقدار منفی پسای مانع جلویی را افزایش می‌دهد اما در حداکثر مقدار مثبت اثری ندارد [۱۷].

در پژوهش حاضر با استفاده از تکنیک PIV به بررسی میدان سرعت و تشکیل و گسترش گردابه‌های ایجاد شده در لبه ابتدایی و انتهایی مانع که در شکل ۱ به ترتیب با (۱) و (۲) نشان داده شده است پرداخته شده است. در این مطالعه به علت متفاوت بودن ابعاد مانع با سایر پژوهش‌های پیشین، ترکیب دو گردابه ابتدایی و انتهایی مانع و تشکیل گردابه بزرگ‌تر مشاهده گردید. همچنین قدرت گردابه تشکیل شده در لبه ابتدایی و عقبی مانع با گذشت زمان بررسی شد. در ادامه به منظور بررسی تغییرات ارتفاع موج، دو حسگر موج نگار در قبل و بعد مانع نصب و اثر حضور مانع در تغییر ارتفاع موج بررسی گردید. در نهایت، با محاسبه انتگرال فشار و شار اندازه حرکت از نتایج PIV حول مانع، میزان نیروی پسا وارد شده به مانع بدست

لیزر استفاده کردند [۳]. تانگ و چانگ به صورت عددی و آزمایشگاهی به مطالعه شکل‌گیری گردابه تشکیل شده در پشت مانع در لحظه عبور تک موج از روی مانع مستطیلی پرداختند. در مطالعه آنها جدایش جریان در پشت مانع با استفاده از تزریق ذرات خاک در جریان مشاهده گردید [۴]. وان دیچنگ و گوزینگ به شبیه‌سازی عددی برخورد تک موج با دو مانع مغزوق در فواصل مختلف پرداختند. شبیه‌سازی عددی بر اساس حل معادلات دو بعدی کاملاً غیر خطی ناویر استوکس با روش تفاضل محدود انجام پذیرفت و برای شبیه‌سازی سطح آزاد از روش حجم سیال استفاده گردید. نتایج تک مانع با نتایج تجربی گذشته مقایسه و نتایج بهتری نسبت به کارهایی که بر اساس تئوری جریان پتانسیل و استفاده از موج‌های بلند بدست آورده شده بود حاصل گردید [۵]. هانگ و دانگ، با حل دو بعدی معادلات ناویراستوکس به صورت گذرا با شرط مرزی دقیق سطح آزاد به شبیه‌سازی جریان عبوری تک موج از روی مانع مستطیلی پرداختند. تأثیر ارتفاع موج و اندازه مانع بر انتقال موج، میدان جریان و نیروهای پسا وارد بر مانع مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید مقادیر نیروی پسا اصطکاکی در حدود ۳٪ نیروی پسا فشاری است [۶]. با پیشرفت امکانات آزمایشگاهی، چانگ و همکاران با استفاده از تکنیک PIV میدان سرعت در اطراف مانع مستطیلی را بررسی نمودند. همچنین با حل عددی معادلات ناویراستوکس متوسط‌گیری شده زمانی رینولدز و استفاده از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ نتایج عددی را با آزمایشگاهی مقایسه نمودند. ایجاد و گسترش گردابه به علت جدایش جریان در گوشه‌ی مانع مشاهده و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد با وجود اینکه اندازه گردابه در لبه ابتدایی مانع کوچک‌تر از لبه انتهایی مانع است، اما شدت اغتشاشات در لبه ابتدایی مانع بیشتر است. همچنین گزارش دادند اگر نسبت ارتفاع مانع به ارتفاع آب بزرگ‌تر از ۰/۵ شود اتلاف انرژی در داخل گردابه ۱۵٪ از انرژی موج ورودی را به خود اختصاص می‌دهد [۷]. پنگری لین به صورت عددی به بررسی تأثیر ابعاد مانع مستطیلی بر ضرایب بازتاب، انتقال و اتلاف موج پرداخت. نتایج نشان داد تا ۶۰٪ از کل انرژی موج می‌تواند صرف اتلاف انرژی موج شود که این اتلافات عمدتاً ناشی از جریان‌های گردابی و شکست موج است [۸]. چانگ و همکاران به صورت عددی و تجربی، ایجاد و گسترش گردابه بر روی مانع مستطیلی را تحت امواج کنویدال بررسی نمودند. به منظور اندازه‌گیری تجربی از تکنیک PIV استفاده گردید [۹]. پینتو مؤلفه‌های سرعت ناشی از شکست موج را بر روی موج‌شکن مستغرق با استفاده از روش سرعت سنج لیزری در فازهای زمانی کوتاه اندازه‌گیری نمود [۱۰]. چانگ لین و همکاران به صورت تجربی برخورد تک موج با مانع مستطیلی نصب شده در کف کانال را با استفاده از روش کمی PIV و دو روش کیفی آشکارسازی جریان و ردیابی ذرات مورد بررسی قرار دادند. برخلاف بیشتر گزارش‌های پیشین که تنها از به وجود آمدن یک گردابه با الگوی ساده بر لبه ابتدایی و انتهایی مانع خبر می‌دادند ایشان تشکیل حداقل ۷ گردابه در لبه ابتدایی مانع و ۸ گردابه در لبه انتهایی مانع را گزارش دادند [۱۱]. لین و هانگ با ترکیبی از روش‌های گردابه‌ای و انتگرال مرزی به بررسی دو بعدی جریان عبوری تک موج از روی مانع مستطیلی پرداختند. مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها با ارتفاع موج مختلف به منظور

9 (cm)	H	ارتفاع موج
12 (cm)	d	ارتفاع مانع
8 (cm)	b	پهنای مانع



شکل ۱- بستر آزمایش



شکل ۲- نصب حسگرهای ارتفاع سنج موج بر روی کانال

۲-۱- بررسی صحت تک موج

برای صحت از تک موج ایجاد شده در آزمایشگاه باید موج اندازه‌گیری شده توسط حسگرها، با معادله تئوری تک موج مقایسه و صحت سنجی شود. به همین منظور تک موج ایجاد شده در آزمایشگاه با موج حاصل از تئوری که با معادله (۱) نشان داده شده است مورد مقایسه قرار گرفت. [۱۱].

$$\eta(x, t) = H \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right] \quad (1)$$

در معادله (۱) H و h به ترتیب نشان دهنده ارتفاع موج و ارتفاع سطح آزاد هستند که در این آزمایش به ترتیب ۹ و ۲۴ سانتی‌متر می‌باشند. همچنین C سرعت موج بوده که به صورت $C = \sqrt{g(H + h)}$ محاسبه می‌شود. در شکل ۳ مشاهده می‌شود موج حاصل از تئوری با موج حاصل از آزمایش مطابقت خوبی با یکدیگر دارند.

آورده شد که در مطالعات پیشین، نیروی پسا به صورت عددی محاسبه شده است.

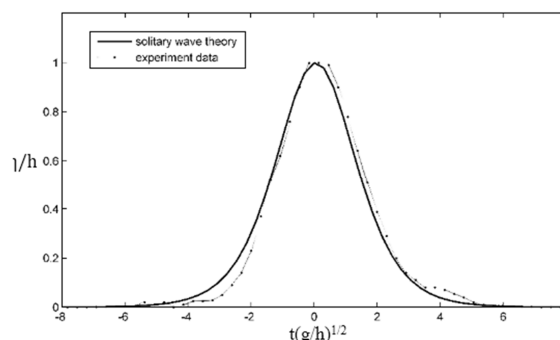
۲- بستر آزمایش و نحوه انجام آزمایش

تکنیک PIV یک روش نوری اندازه‌گیری سرعت در مکانیک سیالات است. در این روش، ذراتی به سیال مورد نظر اضافه می‌شود که چگالی این ذرات باید با چگالی سیال مورد نظر یکسان باشد تا بتوانند از دینامیک سیال به خوبی پیروی کنند. پس از آن با استفاده از لیزر، یک صفحه از سیال مورد نظر روشن می‌شود. برای ایجاد این صفحه روشن، یک لنز استوانه‌ای در برابر لیزر قرار داده می‌شود. پس از آن با ردیابی این ذرات توسط نور لیزر، توسط دوربین از آن‌ها عکس‌برداری شده و با پردازش عکس‌های بدست آمده، بردارهای سرعت سیال در لحظات مختلف بدست آورده می‌شوند. به منظور بررسی ساختار جریان و بدست آوردن میدان سرعت با استفاده از تکنیک PIV، کانال آبی به طول ۶۰۰ سانتی‌متر و سطح مقطع 30×60 سانتی‌متر ساخته و یک موج ساز پیستونی طراحی و بر روی کانال نصب گردید. پس از آن یک مانع شیشه‌ای به طول ۸ سانتی-متر، ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و پهنای ۳۰ سانتی‌متر در کف کانال نصب گردید. علت انتخاب جنس شیشه، صلب و شفاف بودن آن بوده که بتواند نور لیزر را از خود عبور دهد. در جدول ۱ و شکل ۱ می‌توان به صورت طرحواره مانع و ابعاد بستر آزمایش را مشاهده نمود. همانگونه که قابل مشاهده است ارتفاع سطح آزاد ۲۴ سانتی‌متر است و پیستون موج‌ساز با طی کردن مسافت ۲۶ سانتی‌متر موجی به ارتفاع ۹ سانتی‌متر ایجاد می‌کند. همچنین برای سادگی، لبه ابتدایی مانع با (۱) و لبه انتهایی با (۲) نام گذاری شده است. برای پیاده سازی تکنیک PIV ابتدا ذراتی باید به سیال اضافه شوند که بتوانند از دینامیک سیال به خوبی پیروی کنند. در این تحقیق از گلوله‌های شیشه‌ای توخالی^۱ با اندازه ۱۰ و ۲۰ میکرون با چگالی $1.05 \frac{kg}{m^3}$ استفاده گردید. برای ۴۰۰ لیتر آب از هر کدام ۰/۲ گرم مورد استفاده قرار گرفت. لیزر مورد استفاده، یک لیزر پیوسته با توان ۹ وات بوده که پرتو خروجی آن با استفاده از یک لنز استوانه‌ای به یک صفحه تبدیل می‌شود. دوربین مورد استفاده، یک دوربین پر سرعت از شرکت PCO آلمان با مدل 1200hs است. حسگرهای این دوربین از نوع CMOS می‌باشد. رزولوشن دوربین 1024×1024 پیکسل است که سرعت فیلم‌برداری دوربین ۵۰۰ فریم بر ثانیه می‌باشد. به منظور تعیین ارتفاع موج در قبل و بعد مانع از دو حسگر ارتفاع سنج ساخت شرکت AKAMINA استفاده شده است که دقت آنها ۱۰ میکرومتر است. فاصله‌ی حسگر اول از ابتدای کانال ۲۳۵ سانتی‌متر و فاصله‌ی حسگر دوم از حسگر اول ۱۲۵ سانتی‌متر است. در شکل ۲ نمایی از حسگرهای نصب شده بر روی کانال قابل مشاهده است.

جدول ۱- پارامترهای استفاده شده در شکل ۱

عنوان	پارامتر	اندازه
ارتفاع سطح آزاد	h	24 (cm)

^۱ Hollow Glass Spheres



شکل ۳- مقایسه موج ایجاد شده در آزمایشگاه با موج حاصل از تئوری

۳- بررسی نتایج

۳-۱- بررسی ساختار جریان

در این بخش به بررسی ساختار جریان تک موج عبوری از روی یک مانع مستطیلی پرداخته می‌شود. به علت اینکه صفحه‌ی لیزر تنها محدوده‌ی مشخصی (حداکثر ۱۰ سانتی‌متر) را پوشش می‌دهد، به منظور بررسی کل میدان سرعت، لیزر و دوربین در سه ناحیه‌ی پشت، روی، و جلوی مانع قرار گرفته و هر آزمایش در این نواحی سه بار تکرار می‌شود. برای تحلیل و مقایسه بهتر نتایج با یکدیگر، زمان رسیدن قله موج به لبه ابتدایی مانع، زمان مرجع در نظر گرفته شده است که با استفاده از رابطه (۲) در حالت‌های مختلف بی‌بعد شده است. که t^* زمان بی‌بعد و t زمان عبور موج نسبت به مانع می‌باشد.

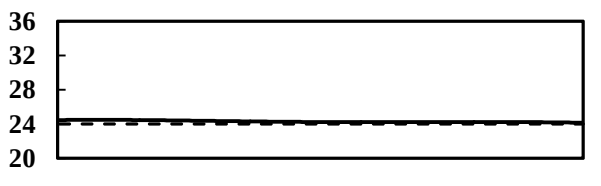
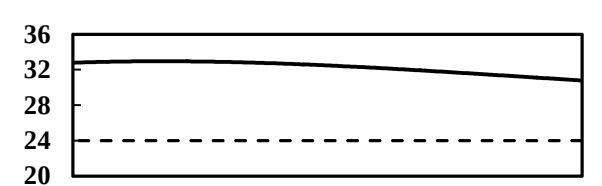
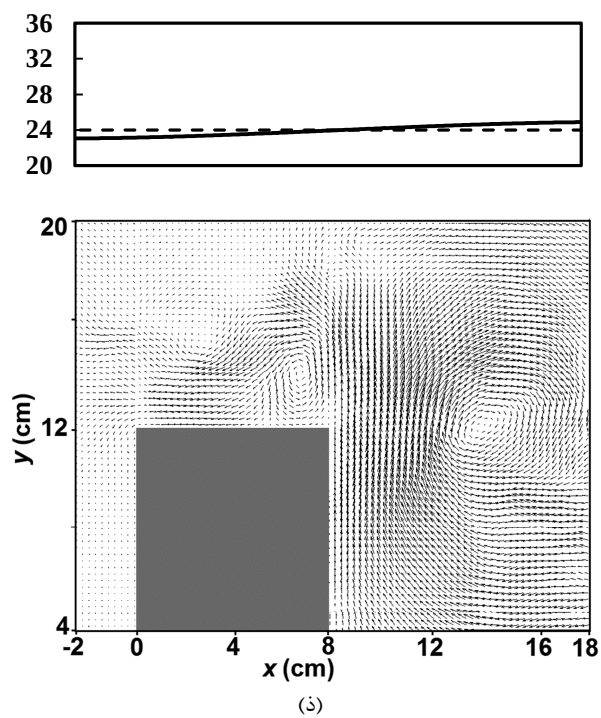
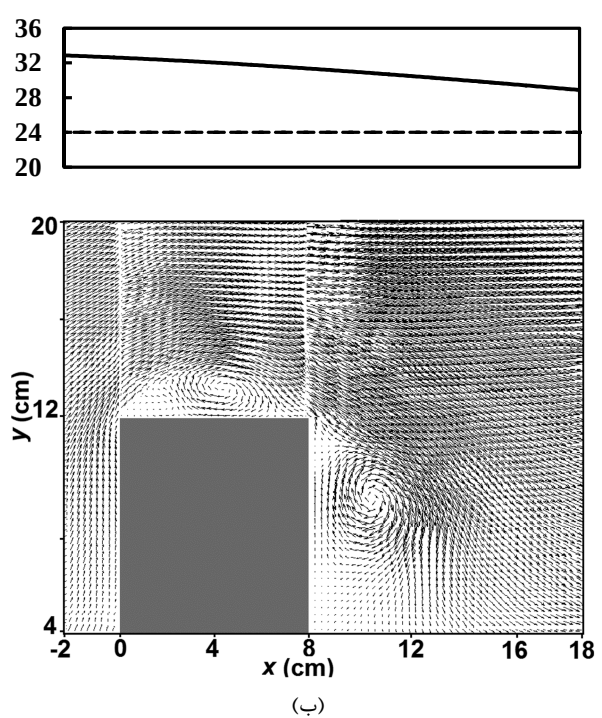
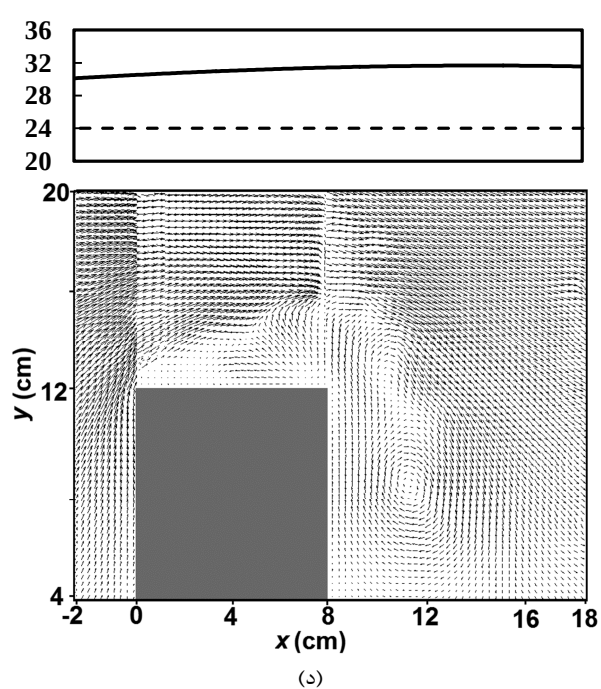
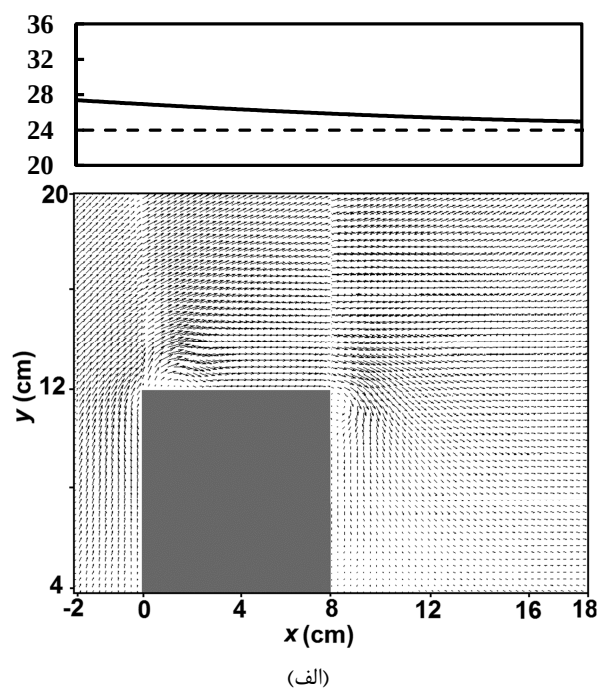
$$t^* = t \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (2)$$

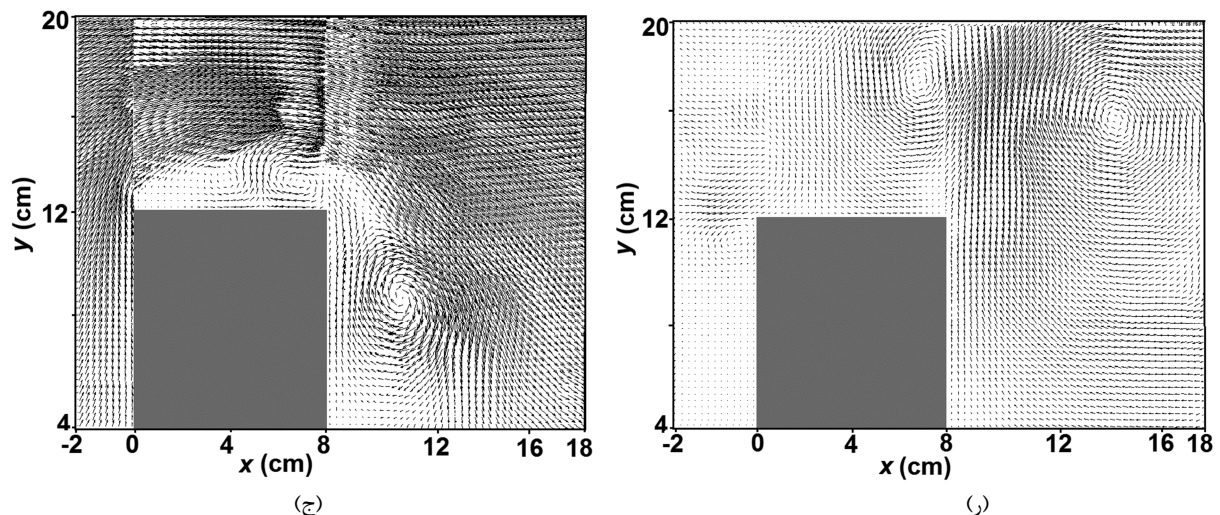
برای درک بهتر ساختار جریان در هنگام تشکیل و گسترش گردابه‌های ایجاد شده، پروفیل موج در هر لحظه در بالای هر شکل آورده شده است.

با توجه به شکل ۴- الف و پروفیل موج در بالای آن، با نزدیک شدن تک موج به مانع، در حالی که قله موج به لبه ابتدایی (۱) مانع نرسیده است، در مجاورت لبه‌های ابتدایی (۱) و انتهایی (۲) مانع، جدایش جریان باعث تشکیل گردابه در این نواحی می‌شود. نکته مهم در بررسی الگوی جریان در دو سمت مانع این است که عمق آب در لبه ابتدایی مانع (۱)، نصف لبه انتهایی مانع (۲) است. بنابراین اندازه سرعت در لبه ابتدایی مانع بیشتر از اندازه سرعت در لبه انتهایی مانع است. که این امر سبب انتشار بیشتر اغتشاشات در لبه ابتدایی مانع (۱) می‌شود. همانطور که در شکل ۴- ب قابل مشاهده است با نزدیک‌تر شدن قله موج به مانع، سرعت و اندازه حرکت جریان افزایش یافته و در نتیجه گردابه‌های تشکیل شده با مکانیزم انتقال گسترش یافته و بنابراین اندازه آنها بزرگ‌تر می‌شوند. همچنین گردابه تشکیل شده در لبه ابتدایی مانع (۱)، به علت محصور شدن بین مانع و موج، کشیده می‌شود. با مقایسه گردابه تشکیل شده در لبه انتهایی و ابتدایی مانع مشاهده می‌شود گردابه تشکیل شده در لبه انتهایی مانع (۲) به علت داشتن فضای بیشتر، گسترش بیشتری یافته و بزرگ‌تر می‌شود. این گردابه به علت اندازه حرکت بالادست جریان به سمت پایین کانال هدایت می‌شود. همانطور که در شکل

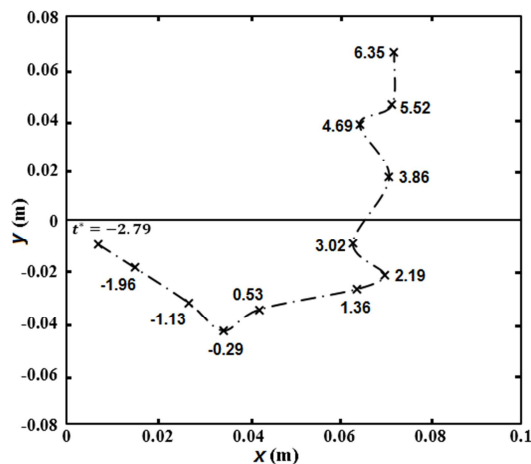
۴- ج قابل مشاهده است در زمان $t^* = 0$ که موج به لبه ابتدایی مانع رسیده، گردابه تشکیل شده بر روی مانع به انتهای مانع رسیده و در این زمان، گردابه تشکیل شده در لبه ابتدایی (۱) و انتهایی مانع (۲) در حال ترکیب شدن با یکدیگر می‌باشند. در سایر پژوهش‌های گذشته به علت متفاوت بودن پهنای مانع با این پژوهش، ترکیب این دو گردابه گزارش نشده است. در پژوهش حاضر پهنای مانع به گونه‌ای است که این دو گردابه با یکدیگر ترکیب می‌شوند. همچنین گردابه تشکیل شده در پشت مانع به علت داشتن فضای کافی گسترش بیشتری یافته و بزرگ‌تر می‌شود. در شکل ۴- د ترکیب شدن دو گردابه با یکدیگر و تشکیل گردابه بزرگ‌تر قابل مشاهده است. همانطور که در شکل ۴- ذ و ۴- ر قابل مشاهده است با عبور قله موج از روی مانع، سرعت در بالای مانع تقریباً صفر شده و در نتیجه نیروی رو به بالایی به گردابه لبه انتهایی مانع (۲) وارد شده و موجب حرکت آن به سمت سطح آزاد می‌شود. اثرات کف کانال نیز به این حرکت رو به بالا کمک می‌کند. مطابق این شکل با عبور کامل تک موج، گردابه تشکیل شده در لبه انتهایی مانع (۲) با مکانیزم پخش گسترش یافته و بزرگ‌تر می‌شود. با حرکت این گردابه به سمت سطح آزاد، جریان رو به بالایی در نزدیک دیواره‌های انتهایی مانع شکل می‌گیرد که باعث جدایش جریان در لبه انتهایی مانع (۲) و ایجاد گردابه پادساعت‌گرد بر روی مانع می‌شود. تشکیل گردابه پادساعت‌گرد بروی مانع، سبب ایجاد جریان برگشتی بر روی مانع می‌شود. این جریان برگشتی سبب تشکیل گردابه پادساعت‌گرد دیگری در لبه ابتدایی مانع (۱) می‌شود. پس از تشکیل گردابه پادساعت‌گرد بر روی مانع، هر دو گردابه به سمت سطح آزاد حرکت کرده و با برخورد به سطح آزاد جهت حرکت خود را تغییر می‌دهد. در آزمایش حاضر به علت برخورد موج به انتهای کانال و تأثیر امواج بازتابی بر روی جریان، بررسی ادامه میدان سرعت دارای خطای قابل توجهی خواهد بود.

به منظور مشاهده مقادیر سرعت در حین عبور موج، در شکل ۵ سه کانتور سرعت در پشت مانع در لحظات مختلف عبور موج قابل مشاهده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با نزدیک شدن موج به مانع، مقادیر سرعت افزایش یافته و گردابه در پشت مانع بزرگ می‌شود. در لحظه عبور موج از بالای مانع مقادیر سرعت به بیشترین مقدار خود رسیده و پس از عبور موج از روی مانع، مقادیر سرعت کاهش می‌یابد.





شکل ۴- میدان سرعت استخراج شده با استفاده از تکنیک PIV: (الف) $t^* = -2.32$ (ب) $t^* = -0.75$ (ج) $t^* = 0$ (د) $t^* = 0.37$ (ه) $t^* = 3.66$ (و) $t^* = 6.1$



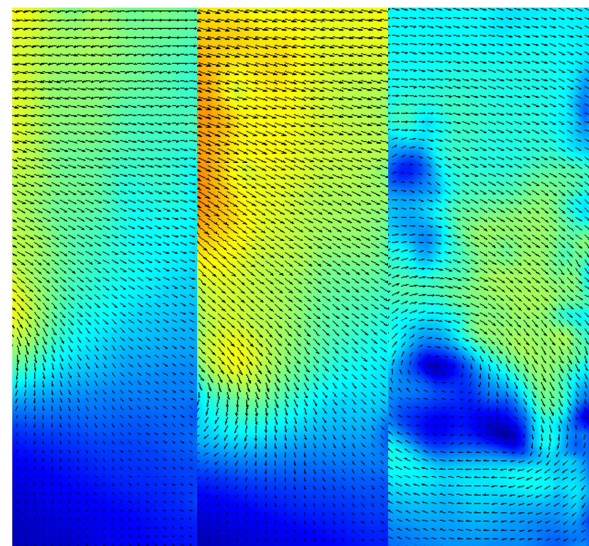
شکل ۶- خط مسیر حرکت مرکز گردابه ساعت گرد تشکیل شده در پشت مانع

۳-۲- قدرت و بیشینه گردابه گردابه تشکیل شده در لبه ابتدایی و انتهایی مانع

در شکل ۷ روند تغییرات قدرت گردابه تشکیل شده در لبه انتهایی مانع با گذشت زمان قابل مشاهده است. مقدار قدرت گردابه از رابطه (۳) که انتگرال ورتیسیته در مساحت مورد نظر است محاسبه می شود. مساحت در نظر گرفته شده برای تمام لحظات یکسان بوده و به گونه ای اختیار شده که گردابه را به طور کامل شامل شود. در رابطه (۳) ω میدان ورتیسیته و Γ بیانگر قدرت گردابه است.

$$\Gamma = \int \omega dA \quad (3)$$

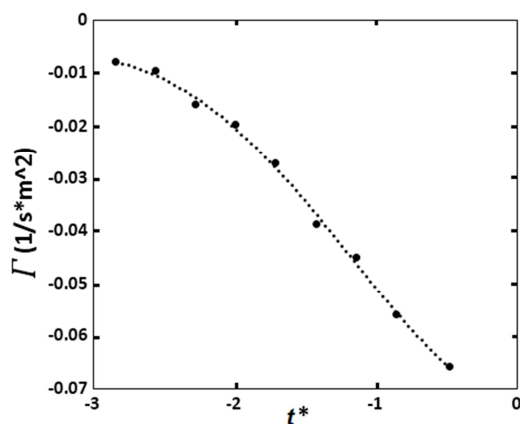
با توجه به شکل ۷ مشاهده می شود قدرت گردابه با نزدیک شدن موج به مانع افزایش یافته و در لحظه عبور موج از روی گردابه به بیشترین مقدار خود می رسد. با عبور کامل موج از روی مانع،



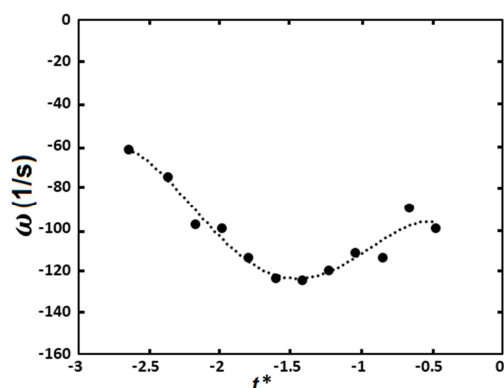
شکل ۵- نمایی از کانتور سرعت در پشت مانع در هنگام عبور موج

۳-۱- بررسی روند حرکت گردابه

شکل ۶ روند حرکت گردابه تشکیل شده در لبه انتهایی مانع را از لحظه شکل گیری نشان می دهد. نقطه صفر در محور X و Y نشان همانطور که مشاهده می شود، گردابه تشکیل شده در لبه انتهایی مانع، در ابتدا به علت اندازه حرکت بالادست جریان به سمت کف کانال هدایت می شود. پس از آن با عبور کامل موج از روی مانع، نیروی رو به بالا سبب حرکت این گردابه به سمت سطح آزاد می شود.



شکل ۹- قدرت گردابه تشکیل شده در لبه ابتدایی مانع



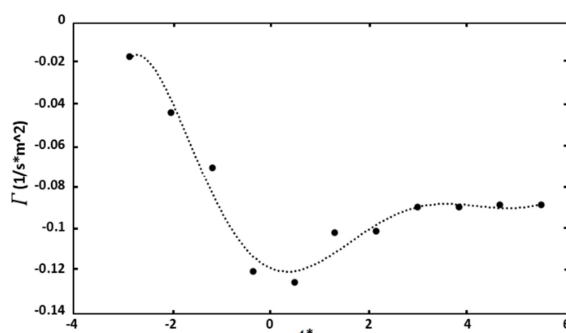
شکل ۱۰- بیشینه ورتیسسته در لبه ابتدایی مانع

۳-۴- تغییر ارتفاع موج

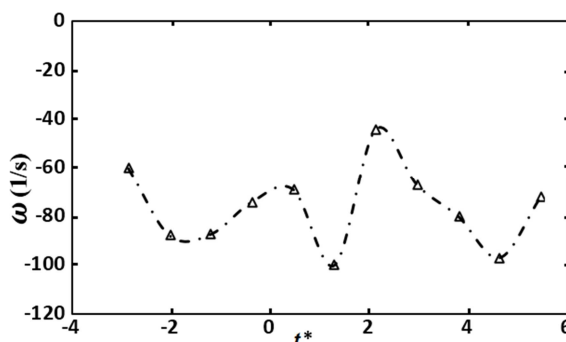
همانگونه که پیشتر اشاره شد با بکارگیری موج‌شکن‌ها در سواحل، می‌توان انرژی موج را کاهش داده و از اثرات مخرب آن جلوگیری نمود. یکی از نشانه‌های کاهش انرژی موج، کاهش ارتفاع قله موج است. در صورتی که چیدمان و فواصل مانع و موج‌شکن‌ها بگونه‌ای اختیار شود که بیشترین کاهش ارتفاع قله موج اتفاق بیافتد در نتیجه از موج‌شکن‌ها به صورت مطلوب‌تری استفاده شده است.

با نصب حسگرهای ارتفاع سنج در قبل و بعد مانع، می‌توان تغییرات ارتفاع موج را با گذشت زمان ذخیره نمود. در شکل ۱۱ روند تغییرات ارتفاع موج در قبل و بعد مانع قابل مشاهده است. به منظور درک درست از اثر مانع، تغییر ارتفاع موج در حالت عدم حضور مانع اندازه‌گیری شد. با اندازه‌گیری تغییرات ارتفاع موج مشاهده شد، ارتفاع موج در فاصله بین دو حسگر در حالت عدم حضور مانع، ۰/۵۵ سانتی‌متر کاهش پیدا کرده که عمدتاً ناشی از اثرات اصطکاک است. لازم به ذکر است فاصله دو حسگر از یکدیگر ۱۲۵ سانتی‌متر است. با قرار دادن مانع در برابر موج، میزان تغییر ارتفاع موج قبل و بعد مانع ۰/۸۷ سانتی‌متر است که نسبت به حالت بدون مانع در حدود ۳٪ کاهش بیشتر ارتفاع موج را نشان می‌دهد.

اندازه حرکت جریان کاهش یافته و در نتیجه مقدار قدرت گردابه کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر می‌توان بیان نمود تا لحظه رسیدن قله موج به مانع، گردابه با مکانیزم انتقال گسترش یافته و با عبور موج از روی مانع و کاهش اندازه حرکت جریان، مکانیزم گسترش گردابه به مکانیزم پخش تغییر پیدا می‌کند. شکل ۷ مقدار بیشینه ورتیسسته در مرکز گردابه تشکیل شده در لبه انتهایی مانع (۲) را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود میزان تغییرات بیشینه ورتیسسته در مرکز گردابه تغییرات پی در پی داشته است. در صورت مقایسه شکل ۶ و شکل ۸ با یکدیگر مشاهده می‌شود در زمان‌هایی که مسیر حرکت گردابه تغییر کرده، مقدار ورتیسسته در مرکز گردابه دارای تغییرات شدیدی است.

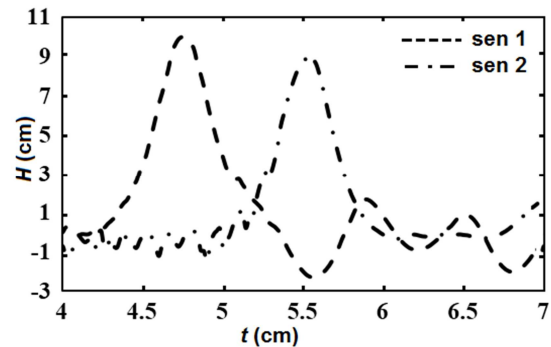


شکل ۷- قدرت گردابه تشکیل شده در لبه انتهایی مانع (۲)



شکل ۸- بیشینه ورتیسسته در لبه انتهایی مانع

شکل ۹ قدرت گردابه تشکیل شده در لبه ابتدایی مانع (۱) را نشان می‌دهد. قدرت گردابه از رابطه (۳) و با انتگرال‌گیری مقدار ورتیسسته در مساحت مورد نظر محاسبه می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود با نزدیک شدن موج به مانع، اندازه حرکت جریان افزایش یافته و در نتیجه قدرت گردابه افزایش می‌یابد. شکل ۱۰ مقدار بیشینه ورتیسسته در مرکز گردابه لبه ابتدایی مانع (۱) را نشان می‌دهد. مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد علیرغم افزایش قدرت گردابه، به علت افزایش اندازه گردابه، مقدار بیشینه ورتیسسته در مرکز گردابه کاهش می‌یابد. مقایسه شکل ۱۰ و ۸ نشان می‌دهد مقدار ورتیسسته در مرکز گردابه لبه ابتدایی مانع (۱) بیشتر از گردابه لبه انتهایی (۲) مانع است که علت آن بالا بودن سرعت در لبه ابتدایی مانع نسبت به لبه انتهایی آن است.



شکل ۱۱- تغییر ارتفاع موج اندازه‌گیری شده توسط حسگر قبل و بعد از مانع

۳-۵- محاسبه نیروی پسا

محاسبه‌ی نیروی وارد شده بر روی موج‌شکن‌ها و سازه‌های دریایی یکی از مسائل مهم در مباحث هیدرولیک دریا است. طراحی موج‌شکن‌ها با ابعاد بهینه، باعث کاهش نیروی پسا و در نتیجه افزایش طول عمر آن‌ها می‌شود.

برای محاسبه نیروی وارد شده بر مانع مورد نظر، ابتدا حجم کنترلی در اطراف مانع در نظر گرفته می‌شود. مطابق رابطه (۴) مجموع نیروهای حجمی (F_{Bx}) و سطحی (F_{Sx}) وارد شده بر مانع برابر نرخ تغییرات تولید اندازه حرکت در حجم کنترل ($\frac{\partial}{\partial t} \int \rho u dv$) و انتگرال اندازه حرکت در سطوح کنترل ($\int \rho u \cdot u dA$) است. قسمت اول از سمت راست رابطه (۴) نشان دهنده تغییرات تولید اندازه حرکت در حجم کنترل بوده و قسمت دوم آن انتگرال اندازه حرکت در سطوح کنترل می‌باشد. با توجه به رابطه (۵)، نیروهای سطحی وارد شده به مانع عبارت‌اند از: نیروی فشار (F_{px}) وارد به سطوح حجم کنترل، نیروی ناشی از تنش برشی ($F_{\tau x}$) و نیروی پسا (F_{Dx}). از نیروی تنش برشی به علت ناچیز بودن در برابر سایر جملات صرف‌نظر شده است. با در اختیار داشتن میدان سرعت، می‌توان گرادین فشار در سطوح کنترل را با حل معادله دیفرانسیلی اندازه حرکت که با رابطه (۶) نشان داده شده محاسبه نمود. نهایتاً نیروی پسا از رابطه (۷) قابل محاسبه است.

$$F_{Sx} + F_{Bx} = \frac{\partial}{\partial t} \int \rho u dv + \int \rho u \cdot u dA \quad (4)$$

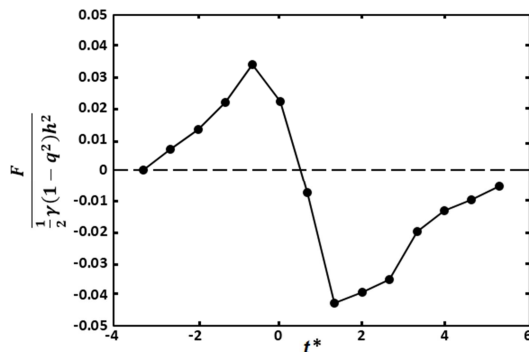
$$F_{Sx} = F_{px} + F_{\tau x} + F_{Dx} \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = gy - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

$$F_D = - \int p \cdot dA + \frac{\partial}{\partial t} \int \rho u dv + \int \rho u \cdot u dA \quad (7)$$

پس از حل معادلات فوق، روند تغییرات نیروی پسا مطابق شکل ۱۲ بدست می‌آید که روند تغییرات آن مشابه حل‌های عددی مرجع [۱۰] است. مطابق این شکل، در لحظه نزدیک شدن تک موج

به مانع و افزایش اندازه حرکت جریان، نیروی وارد شده به مانع در راستای محور افقی افزایش یافته و تقریباً در لحظه عبور قله تک موج از روی مانع به بیشترین مقدار خود می‌رسد. با عبور تک موج از روی مانع و کاهش اندازه حرکت جریان مقدار این نیرو کاهش می‌یابد و با گسترش گردابه در پشت مانع و شکل‌گیری جریان برگشتی بر روی مانع، جهت این نیرو عکس شده و مقدار آن افزایش می‌یابد. درنهایت، با عبور کامل موج از روی مانع و رسیدن گردابه در پشت مانع به سطح آزاد مقدار نیروی پسا کاهش یافته و به مقدار صفر نزدیک می‌شود.



شکل ۱۲- تغییرات نیروی پسی وارد شده به مانع

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از تکنیک PIV ساختار جریان تک موج عبوری از روی یک مانع مستطیلی مورد بررسی قرار گرفت. ساختار جریان در اطراف مانع نشان داد با نزدیک شدن موج به مانع، به علت جدایش جریان دو گردابه در اطراف لبه ابتدایی و انتهایی مانع تشکیل می‌شود. با نزدیک‌تر شدن موج به مانع این گردابه‌ها گسترش بیشتری یافته و اندازه آن‌ها بزرگ‌تر می‌شود. با رسیدن گردابه لبه ابتدایی به انتهای مانع، این دو گردابه با یکدیگر ترکیب شده و گردابه بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند. با عبور کامل موج از روی مانع گردابه تشکیل شده در لبه انتهایی مانع (۲)، به سطح آزاد حرکت کرده و باعث تشکیل شدن گردابه پادساعتگرد در لبه انتهایی مانع (۲) می‌شود. همچنین قدرت گردابه‌ی تشکیل شده در لبه ابتدایی و انتهایی مانع به دست آورده شد و نتایج نشان داد تا لحظه رسیدن گردابه به مانع قدرت گردابه افزایش یافته و با عبور موج از روی مانع، قدرت آن کاهش می‌یابد. بعلاوه نتایج نشان داد مقدار بیشینه ورتیسیته در مرکز گردابه لبه ابتدایی مانع بیشتر از لبه انتهایی مانع است. میزان تغییر ارتفاع موج قبل و بعد مانع با استفاده از حسگر ارتفاع موج به دست آمد و مشاهده شد مانع باعث کاهش ۳٪ از ارتفاع موج می‌شود. در نهایت، با محاسبه انتگرال فشار و شار اندازه حرکت از نتایج PIV حول مانع، میزان نیروی پسا وارد شده به مانع به دست می‌آید.

۵- فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
b	پهنای مانع (cm)

- a bottom cavity, Computers and Fluids, Vol. 53, pp. 79–92, 2012.
- [14] Wu Y. T., Hsiao S. C., Huang Z. C., and Hwang K. S., Propagation of solitary waves over a bottom-mounted barrier, Coastal Engineering, Vol. 62, pp. 31–47, 2012.
- [15] Xiao H., Huang W., Tao J., and Liu C., Numerical modeling of wave–current forces acting on horizontal cylinder of marine structures by VOF method, Ocean Engineering, Vol. 67, pp. 58–67, 2013.
- [16] Mo W., Jensen A., and Liu P. L., Plunging solitary wave and its interaction with a slender cylinder on a sloping beach, Ocean Engineering, Vol. 74, pp. 48–60, 2013.
- [17] Zhou Q., Zhan J. M., and Li Y. S., Numerical study of interaction between solitary wave and two submerged obstacles in tandem, Journal of Coastal Research, Vol. 30 (5), pp. 975–992, 2014.

d	ارتفاع مانع (cm)
c	سرعت موج
F_{Bx}	نیروی حجمی در راستای محور x (N)
F_{Dx}	نیروی پسا (N)
F_{px}	نیروی ناشی از فشار در راستای محور x (N)
F_{sx}	نیروی سطحی در راستای محور x (N)
F_{tx}	نیروی ناشی از تنش برشی در راستای محور x (N)
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
h	ارتفاع سطح آزاد (cm)
H	ارتفاع موج (cm)
P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
t	زمان (s)
t^*	زمان بی بعد
u	سرعت افقی (ms^{-1})

علائم یونانی

θ	لرزش سینماتیکی (m^2s^{-1})
ρ	چگالی (kgm^{-3})
τ	تنش برشی
η	پروفیل سطح موج

۶- مراجع

- [1] Ting F. C., and Kim Y. K., Vortex generation in water waves propagating over a submerged obstacle, Coastal Engineering, Vol. 24, pp. 23–49, 1994.
- [2] Ohya T., Kioka W., and Tada A., Applicability of numerical models to nonlinear dispersive waves, Coastal Engineering, Vol. 24(3–4), pp. 297–313, 1995.
- [3] Zhuang F., and Lee J. J., A viscous rotational model for wave overtopping over marine structure, 25th Int Conf Coastal Eng ASCE, pp. 2178–2191, 1996.
- [4] Tang C. J., and Chang J. H., Flow separation during solitary wave passing over submerged obstacle, Journal of Hydraul Engineering, Vol. 124, pp. 742–749, 1998.
- [5] Decheng W., and Guoxiong W., Numerical simulation of a solitary wave interaction with submerged multi-bodies, Acta Mechanica Sinica, Vol. 14, issue. 4, pp. 297–305, 1998.
- [6] Huang C. J., and Dong C. M., On the interaction of a solitary wave and a submerged dike, Coastal Engineering, Vol. 43, pp. 265–286, 2001.
- [7] Chang K. A., Hsu T. J., and Liu P. L., Vortex generation and evolution in water waves propagating over a submerged rectangular obstacle, Coastal Engineering, Vol. 44, pp. 13–36, 2001.
- [8] Lin p., A numerical study of solitary wave interaction with rectangular obstacles, Coastal Engineering, Vol. 51, pp. 35–51, 2004.
- [9] Chang K. A., Hsu T. J., and Liu P. L., Vortex generation and evolution in water waves propagating over a submerged rectangular obstacle part II: Cnoidal waves, Coastal Engineering, Vol. 52, pp. 257–283, 2005.
- [10] Pinto F. T., Regular water wave measurements near submerged breakwaters, Meas Sci Technol, vol. 16, pp. 1883–1888, 2005.
- [11] Lin C., Chang S. C., Ho T. C., and Chang K. A., Laboratory Observation of Solitary Wave Propagating over a Submerged Rectangular Dike, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 132, No. 5, May 1, 2006.
- [12] Lin M. Y., and Huang L. H., Vortex shedding from a submerged rectangular obstacle attacked by a solitary wave, Journal of Fluid Mech, Vol. 651, pp. 503–518, 2010.
- [13] Chang C. H., Tang C. T., and Lin C., Vortex generation and flow pattern development after a solitary wave passing over