امکان‌سنجی و تحلیل آزمایشگاهی حرکت انتقالی SPM تحت اثر برخورد موج منظم به روش سیستم پردازش تصویر سه بعدی

سیدمرتضی مرعشیان[۱] ، مهدی عجمی[۲*] ، تقی علی‌اکبری[۳،۴]

[۱] کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود؛ morteza.marashian@shahroodut.ac.ir
[۲] استادیار، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود؛ adjami@shahroodut.ac.ir
[۳] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود ؛aliakbari_taghi@yahoo.com
[۴] آزمایشگاه ملی دریایی ایران؛ aliakbari_taghi@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۵

کلمات کلیدی:
پردازش تصویر
موشن کپچر
SPM
حرکت انتقالی
تست آزمایشگاهی

چکیده

سیستم مهاربند تک نقطه‌ای یا به اختصار SPM همانطور که از نام آن مشخص است، با وجود ابعاد کوچک، امکان مهاربندی شناورهای بزرگ را فراهم می‌کند. این در صورتی است که شناور امکان چرخش ۳۶۰ درجه‌ای به دور SPM را دارد. همچنین SPM به عنوان تاسیسات فراساحلی جهت بارگیری یا تخلیه نفت در دریا استفاده می‌شود. به‌طور کلی تامین ایمنی شناور مهار شده به SPM و امکان اتصال و انتقال نفت به آن حائز اهمیت است. در این مطالعه با امکان‌سنجی روش پردازش تصویر سه‌بعدی به ارزیابی حرکت انتقالی SPM پرداخته می‌شود. این حرکت انتقالی شامل Surge، Sway و Heave می‌باشد. به‌منظور اطمینان از نتایج بررسی حرکت انتقالی SPM ، صحت‌سنجی انجام شده است. در ادامه با ساخت SPM در شرایط موج منظم، حرکت انتقالی آن بدست آمده است. نتایج نشان دهنده کارایی پردازش تصویر، در ارزیابی حرکت انتقالی SPM است.

Feasibility and Experimental Analysis of SPM Translational Motion under the Effect of Regular Wave Using the 3D Image Processing System

Seyed Morteza Marashian[1], Mehdi Adjami[2*], Taghi Aliakbari[3,4]

[1] *MSc, Water and Environmental Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology;* morteza.marashian@shahroodut.ac.ir
[2] *Assistant Professor, Water and Environmental Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology;* adjami@shahroodut.ac.ir
[3] *Ph.D. student, Water and Environmental Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology;* aliakbari_taghi@yahoo.com
[4] *National Iranian Marine Laboratory;* aliakbari_taghi@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 16 Apr. 2019
Accepted: 27 Jul. 2019

Keywords:
Image Processing
Motion Capture
SPM
Translational Motion
Experimental Test

ABSTRACT

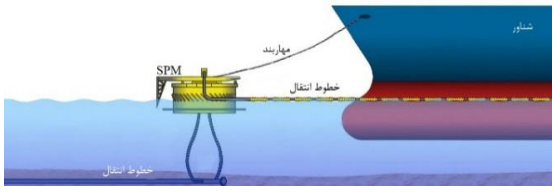
Single point mooring terminals are, as the name implies, facilities of small horizontal dimensions, to which large vessels are moored by means of a bow hawser or by any other means which allows the vessel to rotate 360 around the mooring point. Generally, the single point mooring terminal can have two functions. Primarily, it affords a safe mooring to the vessels. Secondly, it can form a link in the chain for the transport of oil. In this study, with the feasibility of 3D image processing, the SPM translational motion is evaluated. This translational motion includes Surge, Sway, and Heave. In order to ensure the results of the analysis of SPM translational motion, verification is carried out. In the following, by constructing SPM and situating it in reaction condition with regular wave, translational motion is obtained. Finally, the results indicate that image processing is acceptable in translational motion assessment of SPM.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.5.5]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.1]

۱ – مقدمه

شناورها و سازه‌های دریایی به‌طور پیوسته در معرض نیروهای حاصل از باد، امواج، جریان و طوفان‌های سنگین قرار دارند. این عوامل منجر به وارد شدن انواع نیروها به سازه و تغییر مکان آن‌ها می شود. اهمیت نیروهای وارد شده سبب شده است که بسیاری از سازه‌های دریایی با در نظر گرفتن ضرایب ایمنی بالا طراحی شوند که این مو ضوع باعث هدر رفتن سرمایه و زمان می شود. به همین دلیل علاوه بر تحلیل‌های عددی، ساخت مدل آزمایشگاهی برای شناسایی رفتار سازه توصیه می شود.

با اندازه‌گیری دقیق‌تر تغییر مکان ها و نیروهای وارد بر سازه در تستهای فیزیکی تحت بارهای محیطی می‌توان هزینه‌های طراحی و ساخت را کاهش داد. در طول دهه‌های گذشته تحقیقات زیادی در مورد روش های ا ندازه‌گیری دقیق تغییر م کان سازه ها در تست‌های آزمایشگاهی انجام شده است. در گروهی از این تحقیقات، از حس‌گرها مانند حس‌گر شتاب‌سنج، کرنش‌سنج‌ها، و GPS [۱] استفاده شده است. این ابزارها دارای معایبی ازجمله مشکلات نصب، کالیبراسیون، نگه‌داری هستند. در دهه اخیر پردازش تصویر در اکثر ر شته‌ها و علوم ا ستفاده شده ا ست. ازجمله می‌توان به کاربردهای نظامی، پز شکی، صنعتی، ورز شی و ... ا شاره کرد. در این مطالعه با استفاده از پردازش تصویر[۲] به بررسی و تحلیل حرکت انتقالی SPM[۳] شامل Surge، Sway و Heave به وسیله موج منظم در شرایط آزمایشگاهی پرداخته می شود. تغییر مکان اجسام را می‌توان با دو روش مکانیکی و الکتریکی به‌دست آورد. در روش مکانیکی با استفاده از صوت تغییر مکان تشخیص داده می‌شود. در روش الکتریکی با استفاده از اینفرارد[۴]، ابزارهای نوری (دوربین و فیلم برداری)، امواج رادیویی[۵]، ارتعاشات[۶] و مغناطیس[۷] جابجایی به دست آورده می شود. در این مطالعه از روش الکتریکی با استفاده از ابزارهای نوری ا ستفاده شده ا ست. در ادامه به صورت مختصر به تعریف سازه ی SPM و روش پردازش تصویر پرداخته شده ا ست. شکل ۱ نمایی شماتیک از SPM را نشان می‌دهد.



شکل ۱ – نمایی شماتیک از SPM و شناور هنگام انتقال نفت

۱-۱- SPM

سیستم مهاربند تک نقطه ای علاوه بر ابعاد کوچک، شرایط مهاربندی شناور های بزرگ را فراهم می‌کند. این در حالی است که شناور توانایی چرخش ۳۶۰ درجه ای به دور SPM را دارد. همچنین از دیگر کاربردهای SPM می‌توان به تاسیسات فراساحلی جهت بارگیری یا تخلیه نفت در دریا اشاره کرد. با توجه به کاربری بیان شده، تامین ایمنی شناور مهار شده به SPM و امکان اتصال و انتقال نفت به آن حائز اهمیت است [۱]. شکل ۲ نمایی از SPM و شناور را نشان می دهد. در این شکل مهار شناور به SPM و خطوط انتقال نفت مشخص شده است.



شکل ۲ – نمایی از SPM و شناور به همراه خطوط انتقال نفت و مهاربندی [۲]

۲-۱- پردازش تصویر

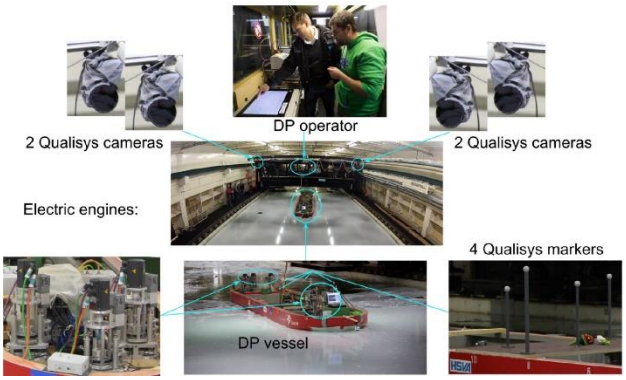
پردازش تصویر به طور کلی، به بررسی تصاویر و استخراج داده از آن گفته می شود. پردازش تصویر بدون توجه به محتوای تصاویر انجام می‌شود و پردازش به صورت پیکسل به پیکسل صورت می‌گیرد. در این مطالعه برای بدست آوردن حرکت انتقالی SPM از موشن کپچر[۸] استفاده شده است که روشی برای پردازش و ارزیابی حرکات شی متحرک[۹] و ارائه آن در مختصات سه بعدی است [۳]. امکان رصد دامنه حرکات نامحدود شی مورد بررسی، از مزایای موشن‌کپچر است. برای ردیابی تحرکات شی، به دو بخش سخت افزاری و نرم افزاری نیاز است. بخش سخت افزاری شامل دوربین و مارکرها می‌باشند و بخش نرم افزاری شامل نرم افزار مورد استفاده است.

۲- مطالعات انجام شده

در این بخش به معرفی مطالعات صورت گرفته در زمینه موشن‌کپچر پرداخته خواهد شد. استفاده از موشن‌کپچر در ارزیابی ورزشی و تحرکات انسانی کاربرد فراوانی دارد. از این رو سعی شده است تا موارد مطرح شده در این قسمت، بیان کننده کاربرد موشن‌کپچر در ارزیابی تحرکات سازه و شناورهای دریایی باشد. کرکنی و همکاران (۲۰۱۴)، شبیه‌سازی حرکت کشتی درون حوضچه به هنگام عبور از یخ را مورد بررسی قرار دادند. در بررسی حرکات کشتی به صورت تحلیل زنده [۱۰] از موشن‌کپچر استفاده شده است. بهره‌مندی از ۴

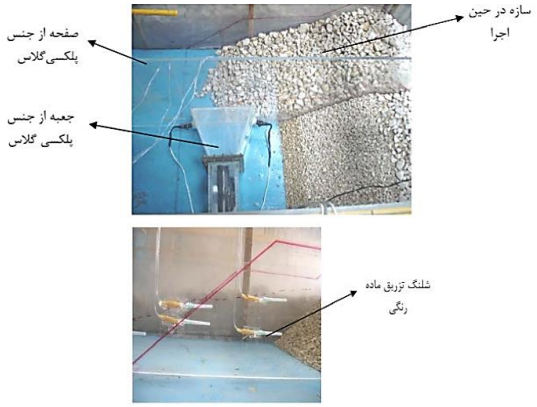
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.5.5]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.1]

دوربین و ۴ مارکر را می‌توان به عنوان بخشی از سخت افزار موشن‌کپچر دانست. شکل ۳ نمایی از شرایط آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. تامین کننده بخش سخت‌افزاری و نرم‌افزاری شرکت کوالیسیس[11] می‌باشد و نتایج حاکی از دقت قابل قبول ارزیابی ۶ درجه آزادی شناور با استفاده از این روش بوده است [۴].



شکل ۳ – چیدمان دوربین‌ها و مارکر برای شبیه سازی حرکت شناور درون یخ [۴]

مقیم و همکاران (۲۰۰۹)، با هدف بررسی مکانیسم جریان در داخل و خارج موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر، دست به انجام آزمایش در فلوم موج مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی زدند. بررسی‌ها در این آزمایشات به صورت مدل دو بعدی با تزریق ماده رنگی و فیلم‌برداری از آن صورت گرفت فیلم برداری از الگوی جریان در داخل و خارج موج شکن سکویی شکل پذیر، توسط دوربین انجام شده است. به منظور تزریق مواد رنگی هنگام آزمایش و همچنین کنترل تزریق حین آزمایش، از شلنگ های تزریق ماده رنگی استفاده گردید. مشاهده گردید که با تزریق ماده سفید رنگ، در طول پایین‌روی موج؛ قسمت عمده جریان تراوشی در پایین‌ترین تراز حین پایین‌روی رخ می دهد [۵]. شکل ۴ نشان دهنده ادوات تصویر برداری حین آزمایش است و شکل ۵ خروج مواد رنگی هنگام آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۴ – موقعیت قرارگیری دوربین ضد آب شده و نمایی از شلنگ های تزریق رنگ حین تست [۵]



شکل ۵ – جهت حرکت ماده تزریقی سفید رنگ در هنگام بیشترین تراز پایین‌روی موج برخوردی به سازه [۵]

توفا و همکاران (۲۰۱۴)، به بررسی گردابه‌های ایجاد شده در اثر حرکات رایزر[12] در حوضچه کشش پرداختند که جریان موجود باعث ایجاد گردابه در اطراف رایزر شد. در این آزمایش از سیستم پردازش تصویر شرکت کوالیسیس برای اندازه‌گیری پارامترهای تست VIV[13] استفاده شد [۶]. در شکل ۶ نمایی از مارکر نصب شده روی رایز آورده شده است.



شکل ۶ – مارکر روی رایزر برای سیستم پردازش تصویر کوالیسیس [۶]

یانگ و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی رشد ترک در پایه‌ی بتن‌آرمه‌ای پل تحت اثر بارهای ناشی از امواج و عبور و مرور وسایل نقلیه پرداختند. با استفاده از دو دوربین و کد نویسی به زبان متلب و سی‌پلاس رشد ترک را در پایه‌های پل اندازه‌گیری کردند و قبل از رسیدن به حالت بحرانی ترک‌خوردگی آن را پیش‌بینی کردند [۷]. در شکل ۷ نمایی از پایه بتن آرمه پل قابل مشاهده است.



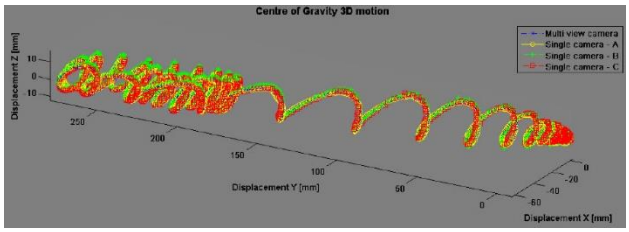
شکل ۷ – تصاویر دو دوربین نصب‌شده برای بررسی رشد ترک [۷]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.5.5]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.1]

نوکرینو و همکاران (۲۰۱۵)، به بررسی و مقایسه شش درجه‌ی آزادی به دست آمده بر روی شناور صیادی در حوضچه کشش با استفاده از سه دوربین پرداختند. در این آزمایش از دوربین سونی و نرم‌افزار شرکت آستارلیس[۱۴] برای به دست آوردن شش درجه آزادی استفاده شد [۸]. شکل ۸ موقعیت دوربین ها شناور را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۹ نشان دهنده نتایج ارائه شده از جابجایی مرکز ثقل شناور در سه راستای x، y و z است.

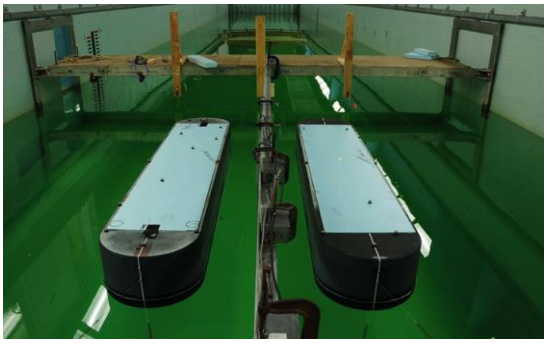


شکل۸ - قرارگیری دوربین ها نسبت به شناور در آزمایش Nocerino و همکاران [۸]



شکل ۹– نتایج جابجایی مرکز ثقل شناور صیادی در سه راستای x، y و z [۸]

ژاو و همکاران (۲۰۱۵)، به بررسی اندرکنش دو جسم شناور نزدیک به هم پرداختند. دو جسم صلب شناور با فاصله متغیر از هم در برابر امواج مختلف قرار داده شده و ROA [۱۵] مربوط به تاثیرات اندرکنش هیدرودینامیکی میان آن‌ها با استفاده از موشن‌کپچر به دست آمد. برای تحلیل تصاویر از سیستم پردازش تصویر شرکت کوالیسیس استفاده شد [۹]. شکل ۱۰ نمایی از موقعیت دو شناور را در حوضچه کشش نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ – نمایی از دو جسم صلب در نزدیکی یکدیگر دو حوضچه کشش [۹]

هی و همکاران (۲۰۱۷)، تولید برق با استفاده از امواج در موج – شکن‌های شناور را بررسی کردند. در این تحقیق برای به دست آوردن سه درجه آزادی موج شکن شناور در اثر امواج، از دو دوربین اینفرارد و سیستم پردازش تصویر شرکت کوالیسیس استفاده شد [۱۰]. در شکل ۱۱ نمایی از موج‌شکن شناور و مارکرهای نصب شده بر روی آن قابل مشاهده است.



شکل ۱۱ – نمایی از موج‌شکن شناور به همراه مارکرها و دوربین اینفرارد [۱۰]

توجه به مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که با استفاده از موشن‌کپچر می‌توان تحرکات سازه‌ها و شناورهای دریایی را ارزیابی کرد. این ارزیابی در تعیین دامنه مجاز تحرکات شئ و بررسی جابجایی آن در شرایط آزمایشگاهی مختلف کاربرد دارد. در این مطالعه با بدست آوردن حرکات انتقالی SPM تحت امواج منظم به تفسیر، تحلیل و امکان سنجی این روش پرداخته می شود. همچنین در ادامه شرایط سخت‌افزاری و نرم‌افزاری در موشن‌کپچر بیان خواهد شد.

۲- روش‌شناسی مطالعات

عکس دیجیتال را می‌توان با سیگنال دوبعدی I(x,y) نمایش داد، به طوری‌که x و y مقادیر گسسته مربوط به تعداد سلول‌های عمودی و افقی است که از عکس حقیقی ساخته می‌شود. هر سلول درون عکس از یک نقطه که پیکسل نامیده می‌شود، تشکیل می‌شود. هر پیکسل نشان دهنده‌ی کوچک‌ترین واحد همگن[۱۶] عکس دیجیتال است. وقتی گفته می‌شود یک عکس دیجیتال M پیکسل عرضی و N پیکسل طولی دارد به این معناست که عکس دارای M ستون و N ردیف از سلول‌ها با تعداد کل M × N سلول است. هر پیسکل درون عکس دیجیتال یک مقدار گسسته‌ای را ارائه می‌دهد که نشان دهنده مقدار روشنایی دریافت شده توسط سنسور دوربین است [۱۱].

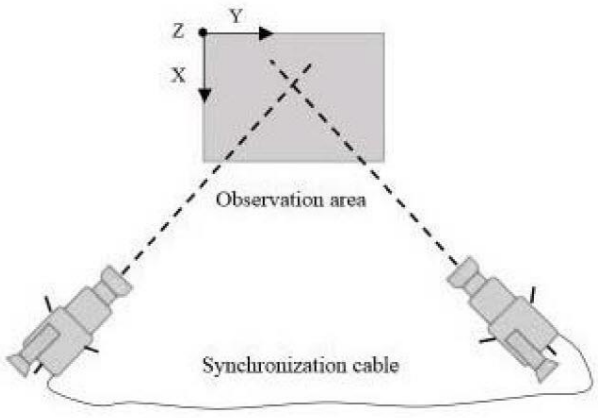
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.5.5]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.1]

برای تحلیل حرکت اجسام، دنبال کردن و پیدا کردن شش درجه آزادی اجسام در حال حرکت، نرم افزارهای متفاوتی به صورت تجاری تولید شده‌اند. هریک از شرکت‌های ارائه دهنده این خدمات علاوه بر ارائه بسته نرم‌افزاری، خدماتی همچون فروش دوربین‌های مناسب، المان کالیبراسیون و مارکرها را نیز انجام می‌دهند. متداول‌ترین روش مورد استفاده در بازسازی سه بعدی تصاویر، استفاده از روش تبدیل خطی مستقیم (DLT)[۱۷] است. این روش به مکان دوربین ها و وضعیت قرارگیری که نسبت به هم دارند، وابسته نیست. به همین دلیل در انتخاب مکان دوربین ها انعطاف پذیری بالایی وجود دارد. همچنین این روش رابطه‌ی خطی بین تصاویر دوبعدی را مشخص می‌کند [۱۲].

در این مطالعه برای ردیابی تحرکات SPM بر روی آن سه مارکر نصب شده است. این مارکرها به رنگ سفید و در زمینه مشکی انتخاب شده‌اند. برای ارزیابی سه بعدی تحرکات حداقل به دو دوربین نیاز است. به‌طوری که محورهای نوری دوربین‌ها به صورت متقاطع با زاویه ۹۰ درجه عمود بر یکدیگر باشند. از دیگر ملزومات فیلم‌برداری، همزمان سازی تصاویر است که این کار بوسیله کنترل دوربین و کابل متصل به دو آن‌ها قابل انجام است [۱۳].

روش استاندارد برای تحلیل سه‌بعدی، ثابت بودن دوربین‌ها در طول تصویربرداری است. به این منظور لازم است از پایه و یا وسایلی دیگر برای ثابت نگه‌داشتن دوربین‌ها استفاده نمود. باید دقت شود که مارکرها حتما در طول تصویربرداری حداقل از دو دوربین دیده شوند. قرارگیری نامناسب دوربین‌ها و دیده نشدن مارکرها باعث بروز خطا و یا از دست رفتن اطلاعات خواهد شد [۱۲].

همچنین در این مطالعه از تصویر ضبط شده[۱۸] برای تحلیل و برای همزمان سازی فیلم‌برداری از کنترل استفاده شده است. شکل ۱۲ نشان دهنده موقعیت دوربین‌ها نسبت به یکدیگر و محدوده مورد بررسی است.



شکل ۱۲ - نمایی از نحوه قرارگیری دوربین‌ها نسبت به یکدیگر در بررسی سه بعدی تحرکات [۱۳]

مارکرهای قرار داده شده بر روی شئ، باید در تمامی فرآیند تصویربرداری توسط دو دوربین قابل رصد باشند. برای تامین نور محیط فیلم‌برداری از دو نورافکن استفاده شده است. تعداد نورافکن بستگی به شرایط محیطی و تعداد مارکرها دارد. تصویر برداری بوسیله دوربین Gopro (Hero5) انجام گرفته است. این دوربین با مشخصات حداکثر رزولیشن ۴۰۰۰ × ۳۰۰۰ ، اندازه سنسور ۶/۱۷ × ۴/۵۵ میلی‌متر، نوع سنسور CMOS، سرعت عکاسی تا ۳۰ فریم بر ثانیه، کیفیت فیلم برداری 4k تا ۳۰ فریم بر ثانیه می‌باشد و قابلیت تثبیت کنندگی فیلم را داراست. در این مطالعه به منظور پیدا کردن حرکات انتقالی SPM از نرم افزار اسکیل اسپکتور[۱۹] (Video4coach) استفاده شده است. که به وسیله آنالیز تصاویر SPM حین آزمایش و دنبال کردن تحرکات مارکرهای نصب شده بر روی آن، میزان جابجایی در سه راستای x، y و z را به عنوان خروجی ارائه می‌دهد. به‌منظور اطمینان از نتایج بدست آمده از نرم افزار، ابتدا صحت‌سنجی نرم افزار انجام شده است. برای صحت سنجی نیاز به ساخت المان کالیبراسیون است. در ادامه روند ساخت المان کالیبراسیون و صحت‌سنجی نرم‌افزار توضیح داده شده است.

۳- برپایی مدل آزمایشگاهی

پردازش تصویر SPM در آزمایشگاه ملی دریایی ایران با فلوم موج مجهز به موجساز پیستونی، انجام شده است. عمق آب فلوم برابر با ۴ متر و دستگاه موج‌ساز توانایی ایجاد موج تا ارتفاع ۵۰ سانتی متر را داراست. طول فلوم موج ۴۰۰ متر و عرض آن برابر ۶ متر است. باتوجه به استقرار صفحات مشبک جاذب موج در انتهای فلوم، بخش قابل توجهی از انرژی موج در بخش انتهایی مستهلک خواهد شد. شکل ۱۳ نمایی از موج منظم تولید شده در فلوم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ - موج منظم تولید شده توسط موجساز در فلوم آزمایشگاهی

ابعاد مدل آزمایشگاهی SPM از نوع Centenary Anchor Leg Mooring (CALM) با مقیاس ۱:۱۰، برابر قطر ۱/۳۶ متر و ارتفاع

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.5.5]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.1]

مخزن ۰/۳۵ متر می باشد. متریال ساخت SPM شامل ورق فولادی به ضخامت ۱ میلی‌متر و لوله پلی اتیلن با دانسیته بالا[۲۰] می‌باشد. حجم مخزن سازه برابر با ۵۰۰ لیتر و وزن SPM پس از ساخت ۱۲۰ کیلوگرم می باشد و مدت زمان آزمایش ها ۶۰ ثانیه می باشد. تعداد ۶ کابل از جنس سیم بوکسل فولادی به قطر ۲ میلی‌متر به کف SPM (پایین تر از تراز آب) متصل شده است. طول هر کابل از محل اتصال تا کف فلوم آزمایشگاه ۶ متر می‌باشد. لازم به ذکر است که درفت[۲۱] ۱۰ سانتی‌متر و فری‌برد[۲۲] ۲۵ سانتی‌متر است. همچنین SPM در فاصله ۱۰۰ متری از موج ساز واقع شده است و شرایط مربوط به موج آزمایش در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ – مشخصات موج در شرایط آزمایشگاهی

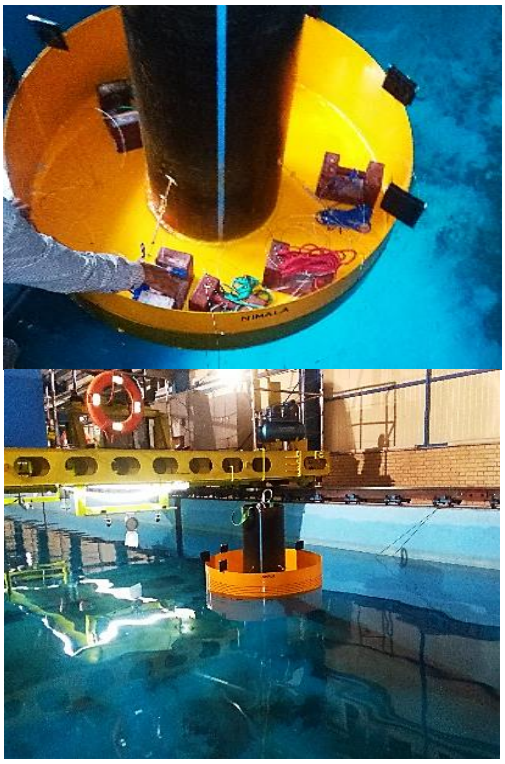
پریود [s]	ارتفاع موج [m]	موج
۰/۶۶	۰/۱۵	منظم

شکل ۱۴، SPM به همراه مارکر سفید رنگ که با یک زمینه‌ی مشکی روی آن نصب شده‌اند را نشان می‌دهد. علت نصب مارکرها بر روی زمینه مشکی این است که علاوه بر تمایز رنگی بین سفید و مشکی، هنگام ردیابی مارکرها توسط دوربین‌ها گم نشوند. برای این منظور از پنج مارکر سفید با زمینه مشکی استفاده شده است. لازم به ذکر است، تنها سه مارکر در میدان دید دو دوربین قرار داشتند و در نتیجه جابه‌جایی مربوط به سه مارکر مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است.



شکل۱۴- نقاط مارکر سفید رنگ با زمینه تیره نصب شده بر برروی SPM (تصویر بالا) و نمایی از قرارگیری دو دوربین و پروژکتور هنگام تصویر برداری از SPM (تصویر پایین)

در شکل ۱۵ نحوه‌ی مهار کردن SPM توسط ۶ وزنه بیست کیلوگرمی و به آب‌اندازی SPM به همراه موقعیت دوربین‌ها نشان داده شده است. مهاربندی مدل آزمایشگاهی از نوع کاتانری است که این وزنه ها به وسیله ۶ سیم بکسل به کف فلوم فرستاده شدند تا از حرکت های بیش از اندازه SPM هنگام آزمایش جلوگیری شود.



شکل ۱۵ - نحوه‌ی مهار کردن SPM (تصویر بالا) و وضعیت قرارگیری دوربین‌ها نسبت به SPM (تصویر پایین)

۳-۱- کالیبراسیون

در این بخش ابتدا به معرفی و بیان نحوه ساخت المان کالیبراسیون پرداخته می شود. پس از تشریح روند ساخت المان کالیبراسیون به معرفی ادوات صحت سنجی و نتایج بدست آمده از آن پرداخته می شود.

۳-۲- ساخت المان کالیبراسیون سه بعدی

برای به دست آوردن رابطه‌ای بین مبدا مختصات دو بعدی تصاویر با مبدا مختصات سه‌بعدی دنیای حقیقی، باید یک جسم سه بعدی با مجموعه‌ای از نقاط کنترلی که مختصات آن‌ها در مبدا حقیقی مشخص است، انتخاب شوند. برای این موضوع معمولا از المان کالیبراسیون[۲۳] با ابعاد مشخص که روی آن از مارکرها قابل رویت هستند، استفاده می‌شود. حداقل تعداد نقاط کنترلی لازم برای باز سازی مبدا مختصات سه‌بعدی حقیقی، ۶ نقطه غیر هم صفحه می‌باشد [۱۲]. در این بخش ابتدا نحوه‌ی ساخت المان کالیبراسیون

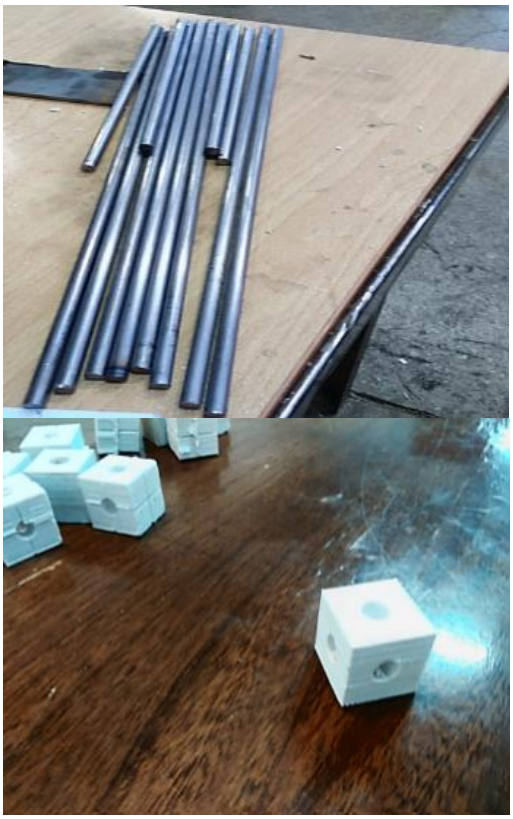
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.5.5]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.1]

توضـــیح داده می‌شـــود. ســـپس نحوه‌ی چ ید مان دوربین ها و صحت‌سنجی نتایج پرداخته شده است. هرچقدر المان کالیبراسیون به فضای حرکتی و شیء موردنظر شبیه‌تر باشد، نتایج بدست آمده از دقت بالاتری برخوردار است. به منظور صحت سنجی از مکعب تو خالی ۴۰×۴۰×۲۰ سانتی‌متری با گوی‌هایی با فاصله ۱۰ سانتی‌متر به عنوان نقاط کنترلی استفاده شده است. برای اضلاع این مکعب از میله فلزی به قطر ۶ میلی‌متر اســتفاده شــده اســت. اضــلاع المان کالیبراسیون با استفاده از دستگاه برش، نشان داده شده در شکل ۹ برش داده شـــده‌اند. بعد از برش میله‌های فلزی با دقت میلی‌متر توسط این دستگاه، نیاز به وصل کردن اضلاع است. برای اتصال این میله‌ها از مکعب‌هایی با ابعاد ۲/۵×۲/۵×۲/۵ سانتی‌متر استفاده شده است. این مکعب‌ها با استفاده از پرینتر سه بعدی شکل ۱۶ تهیه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می شود برای اتصال میله‌ها بر روی قطعه سه حفره با قطر ۶ میلی‌متر و عمق یک سانتی‌متر ایجاد شده است.



شکل ۱۶ - دستگاه برش مورد استفاده برای برش میله های المان کالیبراسیون سه بعدی (تصویر بالا) و پرینتر سه بعدی در حال پرینت اتصالات اصلی المان کالیبراسیون سه بعدی (تصویر پایین)

همچنین در شکل ۱۷ می توان میله‌های برش داده شده به همراه اتصالات تهیه شده را مشاهده کرد.



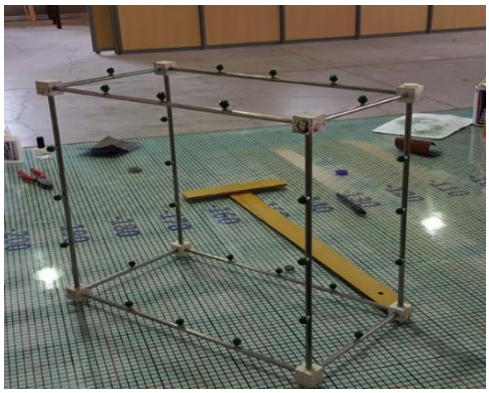
شکل ۱۷ - نمایی از میله های مورد استفاده در ساخت المان صحت سنجی سه بعدی پس از برش (تصویر بالا) و قطعات پرینت شده برای اتصالات المان کالیبراسیون سه بعدی (تصویر پایین)

برای اتصـــال میله‌ها به صـــورت قائم در محل مکعب ابتدا یک تخته ابزار چوبی برای گونیا کردن میله‌ها ساخته شد. همان‌طوری که در شـــکل ۱۸ دیده می‌شـــود؛ در هر ســـه جهت، چوب‌هایی به صـــورت عمود بر هم قرار داده شده‌اند. با استفاده از این موضوع می‌توان در هر سه راستای فضایی از عمود بودن میله‌ها برهم، اطمینان حاصل نمود. به منظور مدرج کردن اضـــلاع المان کالیبراســـیون از نقاط کنترلی به صـــورت گوی‌های فلزی رنگ شـــده به قطر ۱۲ میلی‌متر استفاده شده است. این گوی‌ها با استفاده از آهن ربا با فاصله‌های ثابت ۱۰ ســـانتی متر به میله وصـــل شـــدند. ســـاختار نهایی المان کالیبراسیون در شکل ۱۹ نمایش داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.5.5]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.1]



شکل ۱۸ - ابزار ساخته شده برای گونیا کردن میله های المان کالیبراسیون سه بعدی در سه جهت



شکل ۱۹ - ساختار نهایی المان کالیبراسیون سه بعدی به همراه گوی های آهنربایی رنگ شده

۳-۳- صحت سنجی

بعد از نهایی شدن ساختار المان کالیبراسیون از آن برای صحت‌سنجی سه‌بعدی استفاده شده است. برای صحت‌سنجی نرم افزار، ابتدا دو مکعب فومی با (۱۵۶×۲۳۸×۳۷۷) میلی‌متر و (۱۳۰×۳۸۳×۵۱۸) میلی‌متر تهیه شده است. ابعاد دو مکعب فومی در نرم‌افزار به دست خواهد آمد و با مقدار حقیقی آن مقایسه می‌گردد. در انتها خطای صحت‌سنجی سه‌بعدی به دست آمده است. در ادامه نحوه‌ی چیدمان، ارائه شده است.

برای تحلیل تحرکات شی در سه بعد، حداقل نیاز به دو دوربین می‌باشد. در این تست از دو دوربین Hero5 استفاده شده است و تمام ویژگی‌ها و پارامترهای دو دوربین عیناً مشابه هم هستند. همچنین مشخصات فیلم‌برداری برای هر دو دوربین شامل رزولوشن ۱۰۸۰، سرعت فیلم‌برداری ۱۲۰ فریم بر ثانیه، نور، ایزو و شاتر به‌صورت خودکار می‌باشد. نحوه قرارگیری دو دوربین بستگی به المان کالیبراسیون و شیء مورد تحلیل دارد. زیرا باید تمام نقاط کنترلی المان کالیبراسیون، توسط دو دوربین‌ها دیده شوند و همه‌ی تحرکات جسم نیز از ابتدا تا انتها در میدان دید دو دوربین باشد. برای ضبط همزمان دو دوربین از کنترل دوربین ها که قابلیت تصویربرداری هم زمان را ایجاد می‌کند، استفاده شده است. به منظور ایجاد روشنایی کافی هنگام فیلم‌برداری از سه پروژکتور استفاده شده است. چیدمان دوربین ها، پروژکتور و المان کالیبراسیون در شکل ۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۲۰- تصویر برداری از المان کالیبراسیون سه بعدی در فرآیند صحت سنجی (تصویر بالا) و نمایی از کنترل دوربین‌ها به‌منظور هم زمانی در تصویر برداری (تصویر پایین)

همان‌طور که در شکل ۲۰ مشهود است، دوربین ها با استفاده از پایه، ثابت شده‌اند و از ابتدا تا انتها هیچ‌گونه حرکتی نداشتند. ابتدا المان کالیبراسیون در مقابل هر دو دوربین قرار گرفت و سپس مکعب‌ها، مطابق شکل ۲۱ جایگزین آن شدند. در جدول ۲ و جدول ۳ نتایج حاصل از صحت‌سنجی نرم افزار آورده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.5.5]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.1]



شکل ۲۱ - نمایی از مکعب فومی بزرگت (سمت راست) و مکعب فومی کوچک (سمت چپ)

جدول۲ - نتایج صحت سنجی و خطای مربوط به آن در مکعب کوچک

راستا	مقدار حقیقی[mm]	مقدار تحلیلی[mm]	خطا[mm]	خطای نسبی [درصد]
x	۳۷۷	۳۷۴/۵۳	۲/۴	۰/۶۵
y	۲۳۸	۲۳۴/۲۳	۳/۷	۱/۵۸
z	۱۵۶	۱۵۲/۱۵	۳/۸۵	۲/۴۶

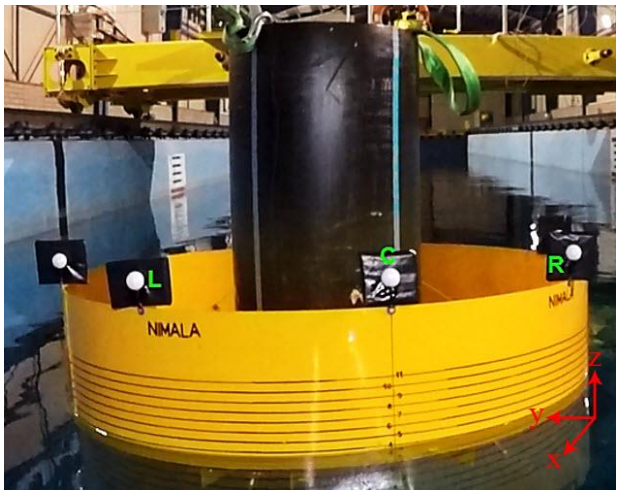
جدول ۳ - نتایج صحت سنجی و خطای مربوط به آن در مکعب بزرگ

راستا	مقدار حقیقی[mm]	مقدار تحلیلی[mm]	خطا[mm]	خطای نسبی [درصد]
x	۵۱۸	۵۲۱/۱۴	۳/۴	۰/۶۶
y	۳۸۳	۳۸۴/۴۵	۱/۸	۰/۴۸
z	۱۳۰	۱۳۱/۸۲	۱/۴	۱/۴

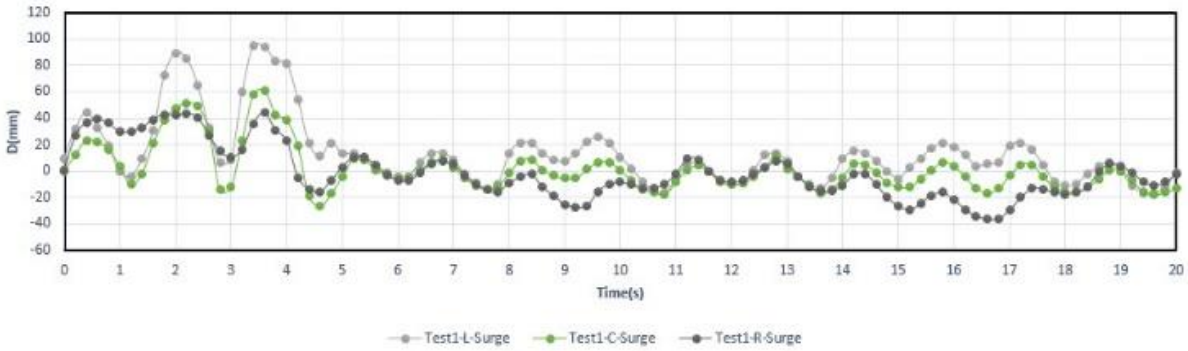
همان‌گونه که در جداول ۳ و ۴ دیده می‌شود بیش‌ترین خطا در راستای عمق تصویر (راستای z) اتفاق افتاده است، میزان این خطای نسبی ۲/۴۶ درصد است. این راستا مربوط به مکعب کوچک، با بیشتر مقدار z است. با اطمینان از عملکرد نرم افزار در ادامه به بررسی تحرکات SPM در اثر موج منظم پرداخته می‌شود.

۴- بیان و تحلیل نتایج

با قراردادن سه مارکر بر روی SPM که در تمام طول آزمایش توسط دو دوربین قابل ردیابی هستند، به بیان نتایج پرداخته می‌شود. در این مطالعه به اختصار از سه حرف اول Right (راست) ، Left (چپ) و Center (مرکز) برای نشان دادن موقعیت سه مارکر نصب شده بر روی SPM استفاده شده است. همچنین با در نظرگیری موج منظم برای انجام آزمایش‌ها به دلیل تکرار شد سیکل رفتاری و جابجایی مارکرها در طول ۶۰ ثانیه، پردازش تحرکات سه مارکر L، C و R در ۲۰ ثانیه ابتدایی صورت گرفته است. در شکل ۲۳، شکل ۲۴ و شکل ۲۵ این بررسی‌ها برای سه مارکر قرار گرفته بر روی SPM؛ به صورت مجزا در سه راستای x، y و z انجام شده است. لازم به ذکر است حرکت انتقالی SPM مربوط به راستای x در راستای طول فلوم؛ معرف Surge، y در راستای عرضی فلوم آزمایشگاه معرف Sway و z راستای عمود بر سطح تراز آب معرف Heave می باشد. شکل ۲۲ نشان دهنده نام گذاری مارکر ها بر روی SPM است.

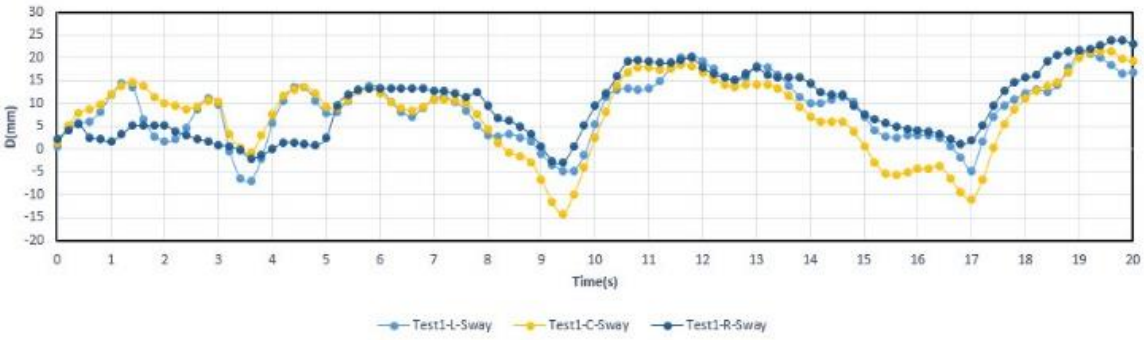


شکل ۲۲ - نام‌گذاری مارکرهای بر روی SPM جهت تحلیل تحرکات

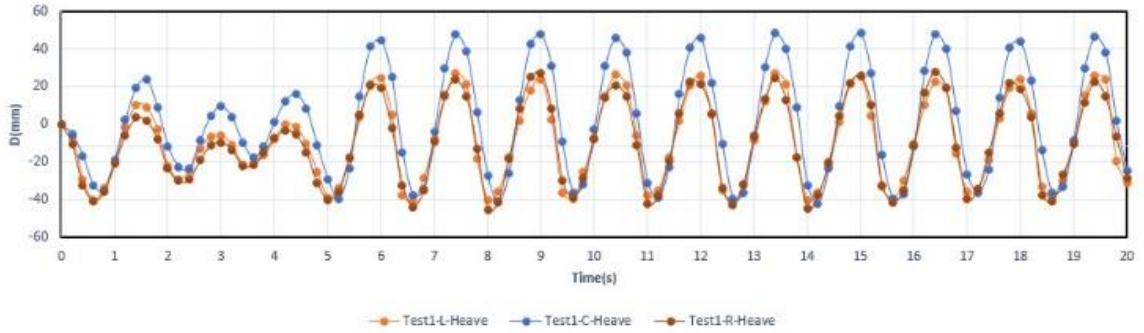


شکل ۲۳- جابجایی مارکر L-C-R در موقعیت Surge

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.5.5]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.1]

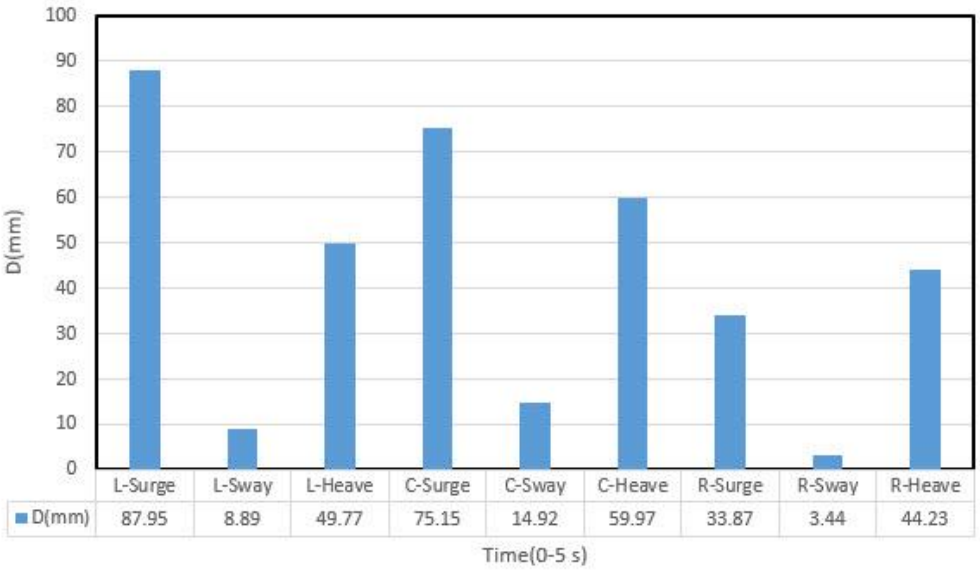


شکل ۲۴- جابجایی مارکر L-C-R در موقعیت Sway



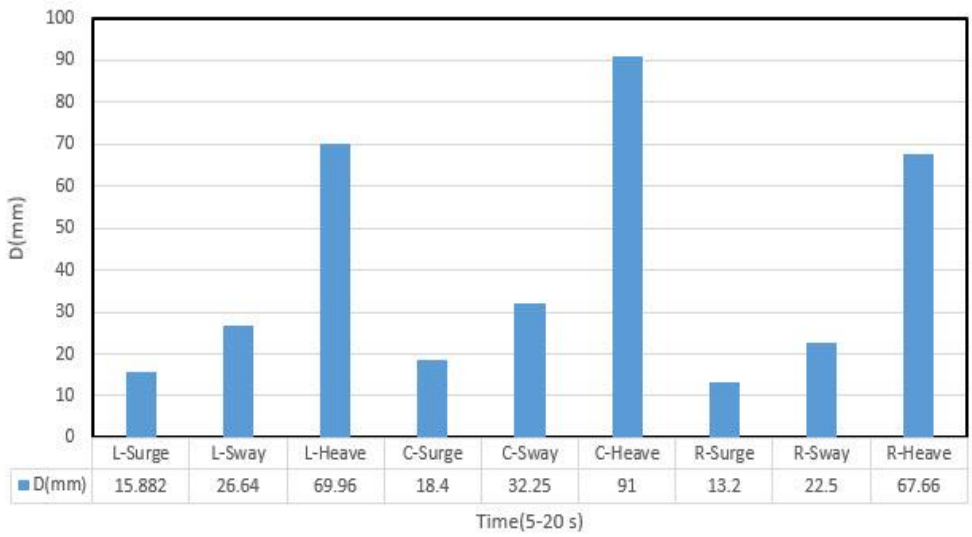
شکل ۲۵- جابجایی مارکر L-C-R در موقعیت Heave

در شکل ۲۳ برای ۵ ثانیه ابتدایی Surge بیشترین مقدار جابجایی در مارکر L برابر ۸۷/۹۵ میلی‌متر است. همچنین برای مارکر C و R نیز مقادیر بدست آمده به ترتیب برابر ۷۵/۱۵ و ۳۳/۸۷ میلی‌متر است. دلیل این افزایش مقادیر Surge در ۵ ثانیه ابتدایی را می‌توان برخود جبهه موج با SPM دانست. به نحوی که بیشترین تاثیر برخورد جبهه موج با SPM در حرکت انتقالی، مربوط به Surge است. به دلیل استوانه‌ای بودن مقطع SPM، در لحظه برخورد جبهه موج می‌تواند باعث ایجاد Yaw (چرخش بدنه حول محور Z) در SMP شود و باعث افزایش مقادیر Surge در مارکر های L و R شود. همچنین بیشترین میزان جابه‌جایی مربوط به Sway و Heave به ترتیب با مقدار ۱۴/۹۲ میلی‌متر و ۵۹/۹۷ میلیمتر، مربوط به مارکر C می باشد. شکل ۲۶ نشان دهنده مقادیر بیشینه حرکات انتقالی SPM در ۵ ثانیه ابتدایی آزمایش اول است. مشاهده می‌شود که از ثانیه ۵ به بعد در آزمایش، سیکل رفتاری مارکرها به صورت متناوب و منظم در می‌آید. در شکل ۲۷ مقادیر بیشینه حرکات انتقالی برای سه مارکر آورده شده است.



شکل ۲۶ – مقادیر بیشینه حرکات انتقالی SPM در ۵ ثانیه ابتدایی آزمایش اول

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.5.5]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.1]



شکل ۲۷ - مقادیر بیشینه حرکات انتقالی SPM از ثانیه ۵ تا ۲۰

بیشـــترین حرکات انتقالی مربوط به مارکر C اســـت. این مارکر بیشترین جابه‌جایی را در Heave با میزان ۹۱ میلیمتر داشته است. همچنین در Surge و Sway به ترتیب ۱۸/۴ میلیمتر و ۳۲/۲۵ میلیمتر جابه‌جا شده است.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه به منظور بررســـی تحرکات SPM در اثر موج منظم برخوردی، اقدام به ساخت المان کالیبرا سیون سه بعدی و ت صویر برداری از سه مارکر به وسیله دو دوربین شده است. با تفاسیر عنوان شده روش پردازش تصویر سه بعدی با هدف امکان‌سنجی در ارزیابی حرکات انتقالی SPM شـــامل Surge، Sway و Heave روشـــی کارامد می‌باشد.

- در ۵ ثانیه ابتدایی با برخورد موج منظم با SPM حرکت انتقالی Surge با میانگین ۶۵/۶۵ میلی‌متر در ســـه مارکر بیشـــترین حرکت انتقالی ثبت شـــده می‌باشـــد. که این افزایش به دلیل برخورد اولیه جبهه موج تابشی است.
- با توجه به نتایج به دســـت آمده از تحلیل تحرکات مربوط به ســـه مارکر L، C و R بیشـــترین جابه‌جایی مربوط به مارکر C ، قرار گرفته در جلوی SMP می‌باشد.
- همچنین حرکـت انتقـالی Heave بـا میـانگین ۷۶/۲۰ میلی‌متر بیشـــترین جابه‌جایی را به خود اختصـــاص داده است.
- لازم به ذکر از بین حرکات انتقالی شامل Surge، Sway و Heave برای مارکر C، حرکت انتقالی Heave با ۹۱ میلی‌متر بیشـــترین جابه‌جایی ثبت شـــده در ســـه مارکر را دارا می‌باشد.

۶- تقدیر و تشکر

تمامی تســـت‌های آزمایشـــگاهی در آزمایشـــگاه ملی دریایی ایران (شهدای خلیج فارس – NIMALA) صورت گرفته است. همچنین از مدیریت آزمایشـــگاه و تمامی کارشـــناســـان این مجموعه کمال سپاس و تشکر به عمل آورده می‌شود.

کلید واژگان

1- Global Positioning Systems
2- Image Processing
3- Single Point Mooring
4- Infrared
5- Radio Frequency Energy
6- Vibration
7- Magnetism
8- Motion Capture
9- Tracking
10- Real Time
11- Qualisys
12- Riser
13- Vortex-Induced Vibration
14- Australis (Photometrix)
15- Response Amplitude Operators
16- Homogeneous
17- Direct Linear Transform
18- Offline
19- Skill Spector
20- High Density Polyethylene (HDPE)
21- Draft
22- Freeboard
23- Calibration Frame

۷- منابع

1. Pinkster, J. A., & Remery, G. F. M., (1975), *The role of model tests in the design of single point mooring*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.5.5]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.1]

terminals. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference.
2. Van Bruggen, T., (2018), *Mooring Line Failure Detection of a Single Point Mooring System: a Model-Based Approach*.
3. Guerra-Filho, G., (2005), *Optical Motion Capture: Theory and Implementation*. RITA, 12(2), p. 61-90.
4. Kerkeni, S., Dal Santo, X., Doucy, O., Jochmann, P., Haase, A., Metrikin, I., ... & Moslet, P. O., (2014), *DYPIC project: Technological and scientific progress opening new perspectives.* In OTC Arctic Technology Conference. Offshore Technology Conference.
5. Moghim, M. N., (2009), *Experimental study of hydraulic stability of reshaping berm breakwaters* (Doctoral dissertation, PhD thesis, Tarbiat Modares University). (In Persian).
6. Tofa, M. M. B., Maimun, A., Ahmed, Y. M., Jamei, S., & Abyn, H., (2013), *Two Degree of Freedom Vortex Induced Vibration Tests of a Riser Model Using Spring Bars*. Applied Mechanics and Materials, *465*, 1339.
7. Yang, Y. S., Yang, C. M., & Huang, C. W., (2015), *Thin crack observation in a reinforced concrete bridge pier test using image processing and analysis*. Advances in Engineering Software, 83, p. 99-108.
8. Nocerino, E., Menna, F., & Remondino, F., (2015), *Comparison between single and multi-camera view videogrammetry for estimating 6DOF of a rigid body*. In Videometrics, Range Imaging, and Applications XIII (Vol. 9528, p. 95280K). International Society for Optics and Photonics.
9. Zhou, Q., Liu, M., Peng, H., & Qiu, W., (2015), *Experimental studies of hydrodynamic interaction of two bodies in waves*. In ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (pp. V011T12A011-V011T12A011). American Society of Mechanical Engineers.
10. He, F., Leng, J., & Zhao, X., (2017), *An experimental investigation into the wave power extraction of a floating box-type breakwater with dual pneumatic chambers*. Applied Ocean Research, *67*, p. 21-30.
11. Rodríguez, J. L. R., (2017), *Segmentation of molars in noisy pantomograms using digital image processing techniques.*
12. Payton, C., & Bartlett, R. (Eds.)., (2007), *Biomechanical evaluation of movement in sport and exercise: the British Association of Sport and Exercise Sciences guide. Routledge.*
13. Polak, E., Kulasa, J., VencesBrito, A., Castro, M. A., & Fernandes, O., (2016), *Motion analysis systems as optimization training tools in combat sports and martial arts*. Revista de Artes Marciales Asiáticas, 10(2), p. 105-123.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.5.5]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.1]