J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 48, 2026. (121-134)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Investigation of the effect of spacing between two floating solar platforms on the response amplitude operator under sea waves

Arefeh Emami[1*], Sima Farhoodi[2], Neda Pourjafari[3]

[1*] *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abass, Iran. emami@hormozgan.ac.ir,*
[2] *M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abass, Iran. farhoodisima@gmail.com*
[3] *Department of Engineering Sciences, Faculty of Engineering Sciences, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. nporjafari@tvu.ac.ir,*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 9 Feb 2026
Last modification: 9 May 2026
Accepted: 11 May 2026
Available online: 12 May 2026

Article type:
Research paper

Keywords:
Floating solar platform
Spacing between platforms
Response amplitude operator
Boundary element method
AQWA

ABSTRACT

This study investigates the effect of the spacing between two floating solar platforms on their hydrodynamic behavior under wave excitation. Numerical modeling was conducted using the boundary element software ANSYS AQWA. Following validation of a single-platform model, an arrangement comprising two floating solar platforms equipped with a mooring system was analyzed. The platforms were positioned 13 m and 18 m apart and connected via a ball joint. Hydrodynamic analyses were performed in the frequency domain under nonlinear regular waves with varying heights and headings. The Response Amplitude Operator for each platform was evaluated across six degrees of freedom. The results indicate that, in surge and sway motions, increasing the distance leads to a noticeable shift in the resonance frequencies: at 13 m, the main peaks occur in the range of 0.013–0.015 rad/s, while at 18 m, they shift to 0.015–0.018 rad/s — reflecting an increase in hydrodynamic stiffness and a reduction in coupling effects. In heave motion, although the natural frequency (approximately 1.3 rad/s) remained nearly unchanged, the response amplitude increased at the larger spacing, suggesting reduced hydrodynamic interference between the platforms. In roll and pitch motions, the dominant peaks appear in the range of 1–2 rad/s, and increasing the spacing results in clearer mode separation and more pronounced peaks. For yaw motion, the primary peaks occur at very low frequencies (0.01–0.04 rad/s) for both distances, with spacing affecting the peak magnitudes more significantly than their positions. Overall, the findings demonstrate that the separation distance between floating solar platforms plays a crucial role in governing the degree of hydrodynamic interaction and the system's dynamic response in marine environments.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.48.121

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.121]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۸، ۱۴۰۴، (۱۳۴-۱۲۱)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

بررسی اثر فاصله بین دو پلتفرم خورشیدی شناور بر عملگر دامنه پاسخ آن‌ها تحت امواج دریا

عارفه امامی[۱*]، سیما فرهودی[۲]، ندا پورجعفری[۳]

[۱*] استادیار سازه‌های دریایی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان-بندرعباس، ایران. emami@hormozgan.ac.ir

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان-بندرعباس، ایران. farhoodisima@gmail.com

[۳] گروه علوم مهندسی، دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه ملی و مهارت، تهران، ایران, nporjafari@tvu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۲۲

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

سکوی شناور خورشیدی

فاصله بین دو پلتفرم

عملگر دامنه پاسخ

المان مرزی

AQWA

چکیده

این مطالعه به بررسی اثر فاصله میان دو پلتفرم خورشیدی شناور بر رفتار هیدرودینامیکی آن‌ها تحت تأثیر امواج دریا می‌پردازد. بدین منظور، مدل‌سازی عددی با استفاده از روش المان مرزی در نرم‌افزار AQWA انجام شد. پس از اعتبارسنجی مدل، آرایشی شامل دو پلتفرم خورشیدی شناور مجهز به سیستم مهاربندی در نظر گرفته شد که در فواصل ۱۳ و ۱۸ متر از یکدیگر قرار داشته و از طریق اتصال بال‌جوینت به هم متصل بودند. تحلیل‌های هیدرودینامیکی در حوزه فرکانس و تحت تأثیر امواج منظم با ارتفاع‌ها و جهات مختلف انجام شد و عملگر دامنه پاسخ هر پلتفرم در شش درجه آزادی ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که در حرکات سرج و سوای، افزایش فاصله موجب جابه‌جایی فرکانس‌های تشدید می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در فاصله ۱۳ متر پیک پاسخ در بازه ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۱۵ rad/s قرار دارد، در حالی‌که در فاصله ۱۸ متر به محدوده ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۱۸ rad/s منتقل می‌شود که بیانگر افزایش سختی هیدرودینامیکی و کاهش کوپلینگ بین پلتفرم‌ها است. در حرکت هیو، تغییر محسوسی در فرکانس طبیعی (حدود ۱/۳ rad/s) مشاهده نشد، اما دامنه پاسخ در فاصله بیشتر افزایش یافت که نشان‌دهنده کاهش تداخل هیدرودینامیکی میان پلتفرم‌ها است. در حرکات رول و پیچ نیز پیک پاسخ در بازه ۱ تا ۲ rad/s قرار داشته و افزایش فاصله موجب تفکیک واضح‌تر مودها و برجسته‌تر شدن برخی پیک‌ها می‌شود. در حرکت یاو نیز پیک‌های اصلی در فرکانس‌های بسیار پایین حدود ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ rad/s برای هر دو فاصله دیده شد و تغییر فاصله بر دامنه پاسخ نسبت به موقعیت فرکانسی آن بیشتر اثر گذار است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که فاصله میان پلتفرم‌های خورشیدی شناور می‌تواند نقش مهمی در شدت اندرکنش هیدرودینامیکی و پاسخ دینامیکی سامانه در شرایط دریایی ایفا کند.

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.48.121

ISSN: 2645-8136

حق نشر: © ۲۰۲۶ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY)ارسال شده است.

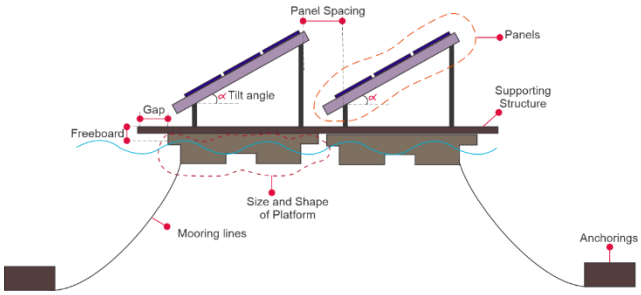
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.121]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر با رشد چشمگیری همراه بوده است. سامانه‌های خورشیدی مستقر بر خشکی به‌دلیل سادگی نصب و دسترسی آسان، در ابتدا سهم قابل‌توجهی در تولید برق خورشیدی به خود اختصاص دادند و معمولاً بر روی زمین‌های وسیع یا پشت‌بام ساختمان‌ها نصب می‌شوند[۱]. با این حال، این سامانه‌ها با محدودیت‌هایی نظیر نیاز به زمین‌های گسترده، تأثیر سایه ساختمان‌ها و پوشش گیاهی بر عملکرد پنل‌ها و همچنین محدودیت فضا در مناطق پرجمعیت مواجه‌اند. به‌منظور غلبه بر این چالش‌ها، استفاده از پنل‌های خورشیدی شناور به‌عنوان یک راهکار نوین مورد توجه قرار گرفته است[۲]. استقرار این سامانه‌ها بر سطح آب دریاچه‌ها، مخازن و حتی آب‌های فراساحلی، علاوه بر بهره‌گیری از فضاهای بلااستفاده، می‌تواند موجب خنک‌سازی طبیعی پنل‌ها و در نتیجه افزایش بازدهی تولید برق شود. همچنین در محیط‌های دریایی، تابش خورشید بدون مانع و انعکاس مناسب از سطح آب می‌تواند شرایط مطلوب‌تری برای تولید انرژی فراهم کند[۳]. در این راستا، کشورهای پیشرفته، به‌ویژه در اروپا، سرمایه‌گذاری‌های گسترده‌ای در توسعه فناوری خورشیدی شناور انجام داده‌اند و بهره‌برداری از این سامانه‌ها را در برنامه‌های توسعه انرژی خود قرار داده‌اند[۴]. ایران نیز با برخورداری از مرزهای آبی در شمال و جنوب، ظرفیت قابل‌توجهی برای استفاده از این فناوری دارد.

در محیط‌های دریایی، سامانه‌های خورشیدی شناور بسته به میزان توان الکتریکی مورد نیاز، که معمولاً در مقیاس کیلووات تا مگاوات تعریف می‌شود، می‌توانند به‌صورت یک واحد منفرد یا مجموعه‌ای از چندین پنل در قالب آرایه‌های بزرگ طراحی شوند. در سامانه‌های با ظرفیت تولید بالا، تعداد زیادی از پنل‌های خورشیدی با فاصله‌ای مشخص در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و مجموعه‌ای موسوم به مزرعه خورشیدی شناور را تشکیل می‌دهند[۳]. در این سامانه‌ها، هر پنل بر روی یک سازه نگهدارنده نصب شده و با زاویه‌ای مشخص نسبت به سطح افق قرار می‌گیرد تا شرایط مناسبی برای دریافت تابش خورشید فراهم شود. این پنل ها در پیکربندی‌های مختلفی طراحی و توسعه یافته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به سامانه‌های انعطاف‌پذیر، سامانه‌های کاملاً مستغرق، سامانه‌های شناور بر سطح آب و سامانه‌های پانتونی اشاره کرد[۵]. هر یک از این سامانه‌ها با توجه به شرایط محیطی، عمق آب و الزامات بهره‌برداری، کاربردهای متفاوتی دارند. در میان این انواع، سامانه‌های پانتونی (شکل ۱) به‌دلیل پایداری مناسب، قابلیت تحمل بارهای سازه‌ای و امکان استقرار در آب‌های با عمق متوسط تا زیاد، یکی از گزینه‌های مناسب برای کاربردهای دریایی به‌شمار می‌روند.



شکل ۱- شماتیک پنل خورشیدی شناور پانتونی [۵]

اگرچه توسعه سامانه‌های خورشیدی شناور در سال‌های اخیر رشد قابل توجهی داشته است، اما بخش عمده مطالعات موجود بیشتر بر بازده الکتریکی خود صفحه خورشیدی و رفتار هیدرودینامیکی کلی پلتفرم‌ها متمرکز بوده است. از نظر رفتار هیدرودینامیکی ماریتایم و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۱ به بررسی تحلیلی تعاملات غیرخطی سیال و سازه در فتوولتائیک‌های شناور بزرگ‌مقیاس پرداختند. آن‌ها با ارائه یک مدل هیدروالاستیک غیرخطی مرتبه سوم، رفتار پلتفرم‌های پانتونی و غشایی را در برابر امواج مدل‌سازی کردند. این مطالعه ابزاری دقیق برای تحلیل رفتار غیرخطی این سیستم‌ها فراهم می‌آورد و در بهینه‌سازی طراحی اولیه پلتفرم‌های خورشیدی شناور نقش بسزایی دارد. ایخنچو و همکاران [۷] در سال ۲۰۲۱ در مطالعه‌ای به بررسی طراحی سیستم مهار برای نیروگاه‌های خورشیدی شناور در محیط‌های مختلف شامل دریاچه‌های کوچک، دریاچه‌های بزرگ و دریا پرداختند. در این مطالعه، با استفاده از روش‌های تحلیلی، اثر بارهای محیطی شامل باد، موج و جریان آب بر این سامانه‌ها ارزیابی شد. نتایج نشان داد که بار باد در اغلب موارد عامل غالب در طراحی سیستم مهار است. ایخنچو و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۲ در پژوهشی دیگر به بررسی مدل‌سازی مزرعه‌های خورشیدی شناور چندبخشی تحت‌تأثیر امواج در نرم‌افزار OrcaFlex پرداختند. آنها به بررسی استراتژی‌های مختلف مدل‌سازی برای مزارع شناور چندگانه در امواج منظم و نامنظم پرداختند. جانگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۳ در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد یک آرایه فتوولتائیک شناور مدولار در شرایط مختلف موج پرداختند. آنها با استفاده از مدل‌سازی عددی و انجام آزمایش‌های فیزیکی بر روی یک مدل کوچک‌مقیاس، به تحلیل حرکت پلتفرم ها، نیروهای وارد بر آن‌ها و پایداری کلی سیستم پرداختند. نتایج نشان داد که این نوع آرایه پتانسیل بالایی برای تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر دارد. زهره‌گلرودباری [۱۰] در سال ۲۰۲۳ در مطالعه‌ای به بررسی سیستم‌های فتوولتائیک شناور در دریاهای آزاد پرداخت و عملکرد آن‌ها را در مقایسه با سیستم‌های زمینی ارزیابی کرد. شی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۳ به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.121]

تحلیل هیدروالاستیک پنل‌های خورشیدی شناور در دریا با استفاده از مدل فرکانس - دامنه پرداختند. مدل‌سازی شامل تحلیل ساختاری و هیدرودینامیکی بود و برای تحلیل رفتار ساختار در امواج دریا و اعتبارسنجی مدل، از داده‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شد. نتایج نشان دادند که ماژول‌های محیطی پنل خورشیدی شناور معمولاً پاسخ‌های بزرگ‌تری نسبت به ماژول‌های داخلی داشتند. مگکرویس [۱۲] در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی به بررسی تکنولوژی‌های جدید در سیستم‌های خورشیدی شناور در مناطق نزدیک به ساحل یونان پرداخت. این مطالعه رفتار هیدرودینامیکی سازهای شناور نوع پانتون شکل را تحلیل کرد و از روش‌های المان مرزی برای پیش‌بینی پاسخ‌های آن‌ها به امواج و تأثیرات آن‌ها بر عملکرد انرژی خورشیدی استفاده نمود. نتایج نشان داد که نوسانات ناشی از امواج و بازتاب نور از سطح آب می‌تولند منجر به کاهش تولید انرژی نسبت به سیستم‌های ثابت زمینی شود. دلاسیروکس و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۲۳ با انجام آزمایش در کلنال امواج، رفتار یک آرایه ۱۶ ماژولی فتوولتائیک شناور را بررسی کردند و نشان دادند که در امواج با طول‌موج حدود دو برابر طول شناور، پاسخ‌های تشدیدی و نیروهای بیشتری ایجاد می‌شود. سونگ و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۲۳ نیز با استفاده از نظریه پتانسیل و نرم‌افزار AQWA، ویژگی‌های هیدرودینامیکی سیستم‌های خورشیدی شناور را تحت پارامترهای مختلف موج تحلیل کرده و نشان دادند که امواج مهم‌ترین عامل مؤثر بر پاسخ‌های دینامیکی این سیستم‌ها هستند. در ادامه، ژانگ و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۲۳ با مطالعه آرایه‌های ماژولار سکوی خورشیدی شناور نشان دادند که فاصله بین ماژول‌ها، جهت موج و نوع اتصال بین آن‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر حرکت و پایداری آرایه‌های شناور دارد. ژیبو جیانگ و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۲۴ عملکرد هیدرودینامیکی یک آرایه فتوولتائیک شناور ۱۲×۱۸ شامل ۲۱۶ شناور را تحت امواج منظم به‌صورت آزمایش مدل فیزیکی بررسی کردند. نتایج نشان داد این آرایه با استفاده از شناورهای نیمه‌غوطه‌ور و اتصالات طنابی متقاطع پایداری حرکتی مناسبی داشته و بدون برخورد میان شناورها قادر به حفظ پیکربندی کلی خود است. هانگیو کائو و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۲۴ رفتار هیدرودینامیکی غیرخطی یک سازه فتوولتائیک شناور با آبخور کم را بررسی کردند. نتایج نشان داد به دلیل تغییرات سطح مرطوب شده، استفاده از مدل‌های خطی برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی این سازه‌ها می‌تواند منجر به خطای قابل توجه شود چیانگ فو و همکاران [۱۸] در در سال ۲۰۲۴ به بررسی توسعه پلتفرم‌های فتوولتائیک شناور در آب‌های آزاد و مناطق ساحلی پرداختند و چالش‌های ناشی از باد، موج و جریان را تحلیل کردند. همچنین کاربرد مواد کامپوزیتی نوین مانند کامپوزیت برای کاهش وزن و هزینه سازه‌ها مورد توجه قرار گرفت. فریل و کریمی‌راد [۱۹] در سال ۲۰۲۴ پاسخ دینامیکی یک پلتفرم پانتونی استوانه‌ای شکل را با استفاده از آزمایش‌های فلوم موج و شبیه‌سازی عددی غیرخطی بررسی کردند. نتایج نشان داد پاسخ حرکتی و نیروهای هیدرودینامیکی این سامانه‌ها به شدت به ویژگی‌های موج وابسته است و پدیده‌هایی مانند تشدید حرکات و اندرکنش چندبدنه نقش مهمی در رفتار سیستم دارند. امامی و کریمی‌راد [۵] در سال ۲۰۲۵ در یک مطالعه مروری به بررسی رفتار هیدرودینامیکی و سازه‌ای سکوهای خورشیدی شناور در آب‌های عمیق پرداختند و ضمن شناسایی چالش‌ها و خلأهای پژوهشی، پیشنهادهایی برای بهبود دستورالعمل‌های طراحی ارائه کردند. سارات چاندرا موهاپاترا [۲۰] در سال ۲۰۲۵ رفتار یک سازه شناور بزرگ متشکل از صفحات لولایی مهارشده را تحت اثر موج، جریان و باد با استفاده از نرم‌افزار ANSYS AQWA شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد افزایش سرعت جریان موجب افزایش جابه‌جایی قائم سازه می‌شود، در حالی که اثر باد در محدوده بررسی شده محدود است. امامی و کریمی‌راد [۲۱] در سال ۲۰۲۶ رفتار هیدرودینامیکی آرایه‌های چندبدنه سکوهای خورشیدی شناور را تحت امواج نامنظم در دریای شمال بررسی کردند. نتایج نشان داد اتصال سکوها با تیرهای صلب مفصلی موجب کاهش حرکات نسبی و حفظ فاصله ایمن بین پلتفرم‌ها می‌شود.

همان‌گونه که از بررسی مطالعات پیشین برمی‌آید، در میان پژوهش‌های انجام‌شده تنها در مطالعه ژلنگ و همکاران [۱۵] به بررسی پارامتر فاصله بین پلتفرم‌ها پرداخته اند؛ با این حال، در آن تحقیق نیز تأکید مشخصی بر نقش تغییر فاصله در رفتار هیدرودینامیکی پلتفرم‌ها صورت نگرفته است. در اغلب مطالعات دیگر، رفتار هیدرودینامیکی سامانه با فرض فاصله‌ای ثابت میان پلتفرم‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این درحالی است که فاصله بین پلتفرم‌ها یکی از چالش‌های مهم در طراحی مزارع خورشیدی شناور دریایی به شمار می‌رود، زیرا می‌تواند بر اندرکنش هیدرودینامیکی سازه‌ها، دامنه حرکات نسبی آن‌ها، انتقال بارهای ناشی از امواج و همچنین احتمال برخورد میان پلتفرم‌های مجاور تأثیرگذار باشد. از سوی دیگر، دستورالعمل‌ها و استانداردهای موجود برای سازه‌های شناور یا سازه‌های دریایی، محدوده فاصله مشخصی برای پلتفرم‌های خورشیدی ارائه نمی‌کنند و در بسیاری از موارد این فاصله به‌صورت تجربی یا با رویکردی محافظه‌کارانه انتخاب می‌شود. از این‌رو، بررسی اثر فاصله بین پلتفرم‌های خورشیدی شناور و ارزیابی رفتار هیدرودینامیکی آن‌ها تحت شرایط مختلف موج می‌تواند نقش مهمی در طراحی ایمن و بهینه مزارع خورشیدی دریایی ایفا کند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

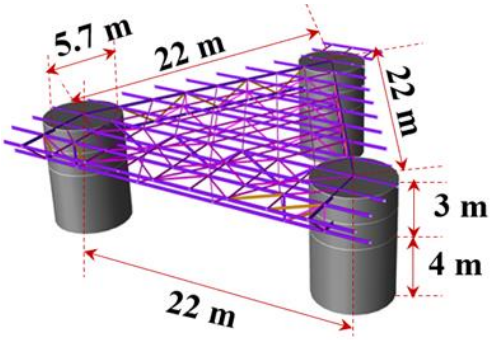
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.121]

بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر، تمرکز بر تحلیل کمی پاسخ هیدرودینامیکی پلتفرم‌های شناور در آرایه چندپلتفرمی و بررسی تغییرات آن در فواصل مختلف میان پلتفرم‌ها تحت شرایط گوناگون امواج در آب‌های با عمق متوسط تا زیاد است. به این منظور، پس از مقدمه‌ی کنونی، در بخش دوم هندسه مدل و معادلات حاکم بر مسئله تشریح می‌شود. بخش سوم به معرفی شرایط محیطی مورد استفاده اختصاص دارد. در بخش چهارم نحوه مدل‌سازی عددی و فرآیند صحت‌سنجی توضیح داده می‌شود. نتایج و بحث در بخش پنجم ارائه شده و در نهایت، جمع‌بندی و پیشنهادها در بخش ششم بیان می‌شوند.

۲- مدل هندسی و معادلات حاکم

۲-۱- هندسه مدل سکوی شناور موردمطالعه

به منظور بررسی اثر فاصله بین پلتفرم ها تحت امواج مختلف؛ مدل هندسه بدنه شناور خورشیدی معرفی شده در مرجع [۲۱] به نام TriFloatSol در نظر گرفته شد (شکل ۲). این سازه دارای وزن ۳/۱۴×۱۰^{۵} کیلوگرم و مرکز جرم (۰/۰۰۱، ۰/۰۱۸، -۰/۳۹-) متر است. ممان اینرسی جرمی حول محور x و y آن برابر با ۱/۷ × ۱۰^{۷} و حول محور z برابر با ۳/۸ × ۱۰^{۷} است. جزئیات کامل این هندسه در مرجع [۲۱] آورده شده است.



شکل ۲- هندسه و ابعاد پلتفرم خورشیدی شناور TriFloatSol [۲۱]

۲-۲- معادلات حاکم بر مسئله

در این مطالعه، سیال به‌صورت تراکم‌ناپذیر، غیرلزج و با جریان غیر چرخشی فرض شده است. در چنین جریان‌هایی، پتانسیل سرعت می‌بایست در سراسر ناحیه سیال معادله لاپلاس را ارضا کند. برای حل این معادله، رویکردهای عددی گوناگونی وجود دارد که در میان آن‌ها، روش پنل به‌عنوان یکی از زیرشاخه‌های روش المان مرزی (Boundary Element Method – BEM) کاربرد گسترده‌ای یافته است.

در این مطالعه مدل‌سازی هیدرودینامیکی با استفاده از روش المان مرزی در نرم‌افزار Ansys AQWA انجام شد. این نرم‌افزار بر پایه حل معادلات پتانسیل جریان و تئوری تفرق امواج برای سازه‌های حجیم توسعه یافته است [۲۲]. تحلیل‌ها در حوزه فرکانس انجام گرفت و برای ارزیابی رفتار دینامیکی سازه از عملگر دامنه پاسخ (RAO)[1] انجام شد. این کمیت که به‌صورت نسبت دامنه پاسخ سازه شناور به دامنه موج تحریک‌کننده تعریف می‌شود، شاخصی مهم در پیش‌بینی پاسخ سازه در شرایط دریایی محسوب می‌شود[۲۳, ۲۴]. مقادیر RAO از طریق حل معادله حرکت سازه در دامنه فرکانس به‌دست می‌آید (معادله ۱) [۲۵, ۲۶].

$$-\omega^2[\mathbf{M}+\mathbf{A}(\omega)]\tilde{\mathbf{X}}+[i\omega\mathbf{A}(\boldsymbol{\omega})+\mathbf{B}(\omega)]i\omega\tilde{\mathbf{X}}+[\mathbf{C}+\mathbf{K}]\tilde{\mathbf{X}}=\tilde{\mathbf{F}} \quad (۱)$$

که دراین‌رابطه **A** ماتریس جرم اضافی، **M** ماتریس جرم، **B** ماتریس میرایی، **C** و **K** ماتریس‌های سختی هستند. همچنین $\tilde{\mathbf{F}}$ بردار نیروهای تحریک موج و $\tilde{\mathbf{X}}$ بردار پاسخ سازه در دامنه فرکانس را نشان می‌دهد. بر این اساس، تابع انتقال سیستم یا عملگر دامنه پاسخ سازه در فرکانس زاویه‌ای ω به‌صورت معادله (۲) بیان می‌شود [۲۷].

$$H(\omega)=\{-\omega^2 M+i\omega B+K\}^{-1} \quad (۲)$$

که دراین‌رابطه $H(\omega)$ بیانگر تابع انتقال پاسخ سازه در حوزه فرکانس است.

۲-۲-۱- معادلات اتصالات بین پلتفرم‌ها

در نرم‌افزار AQWA انواع مختلفی از اتصالات بین پلتفرم‌ها قابل تعریف است که از جمله آن‌ها می‌توان به Locked Joint، Hinged Joint، Universal Joint و Ball and Socket Joint اشاره کرد[۲۲]. هر یک از این اتصالات با توجه به میزان آزادی دوران حول محورها، رفتار متفاوتی ایجاد می‌کنند. به‌طوری‌که اتصال Locked هیچ درجه آزادی ندارد، اتصال Hinged امکان دوران حول یک محور را فراهم می‌کند، اتصال Universal اجازه دوران حول دو محور را می‌دهد و اتصال Ball and Socket امکان دوران کامل حول سه محور را فراهم می‌سازد.

روابط حاکم بر رفتار این اتصالات بر اساس برابری جابه‌جایی‌های نسبی و شرایط مرزی میان پلتفرم‌های متصل شده به یکدیگر تعریف می‌شوند و ماتریس‌های متناظر سختی، میرایی و انتقال نیرو و ممان بین دو پلتفرم نیز بر همین اساس به دست می‌آیند. جزئیات کامل فرمول‌بندی ریاضی، ماتریس‌ها و نحوه استخراج آن‌ها در مرجع اصلی[۲۲] ارائه شده است؛ بنابراین با توجه به محدودیت صفحات مقاله، در اینجا تنها به ارجاع به مرجع اصلی بسنده می‌شود.

[1] Response Amplitude Operator

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.121]

۳- مشخصات محیطی دریا

در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی دقیق رفتار پلتفرم‌ها و لحاظ‌کردن تمامی انواع شرایط محیطی مؤثر، دریای شمال[۲] به‌عنوان محل استقرار پلتفرم انتخاب شده است .برای شبیه‌سازی، سه حالت مختلف شرایط محیطی دریای شمال در عمق ۲۹ متر مطابق با جدول (۱) در نظر گرفته شده‌اند.

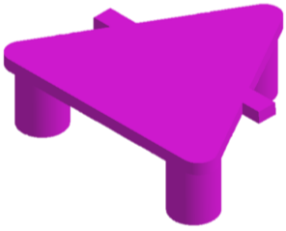
جدول ۱- حالات مختلف امواج دریای شمال [۲۱]

Sea states	H (m)	T (sec)
State 1	۲	۴
State 2	۶	۸
State 3	۸	۱۰

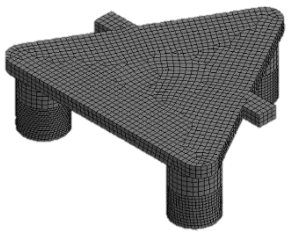
تحلیل در حوزه فرکانس با استفاده از موج منظم غیرخطی و در بازه فرکانسی صفر تا ۳ رادیان بر ثانیه انجام گرفت. تئوری استفاده شده برای موج منظم، تئوری استوکس مرتبه ۵ بوده که باتوجه‌به اطلاعات شرایط محیطی از نمودار تعریف شده در مرجع[۲۸] انتخاب شده است.

۴- مدل‌سازی هندسه TriFloatSol همراه با صحت سنجی

ابتدا به‌منظور صحت مدل‌سازی، هندسه یک TriFloatSol باتوجه‌به ابعاد مطرح شده در محیط نرم‌افزاری Ansys-AQWA در بخش Geometry ترسیم شد (شکل ۳). هندسه مدل شده در بخش Model فراخوانی شده و اطلاعات مربوط به شرایط محیطی دریا از جمله عمق، چگالی، شتاب گرانش، وزن سازه، مرکز ثقل و ممان اینرسی جرمی به مدل اعمال شد. سپس مش‌بندی با ابعاد ۰/۴ متر در بخش آبخور و ۰/۶ متر در بالای سطح آب صورت گرفت (شکل ۴).



شکل ۳- هندسه مدل‌سازی TriFloatSol در AQWA



شکل ۴- مش‌بندی پلتفرم TriFloatSol

سپس به منظور صحت مدلسازی، فرکانس طبیعی و پریود طبیعی پلتفرم در حرکات هیو (Heave)، پیچ (Pitch)، رول (Roll) استخراج شده از مدلسازی عددی در AQWA با نتایج حاصل از حل تحلیلی و مدلسازی عددی در SIMA مطابق مرجع [۲۱] با یکدیگر مقایسه شد (جدول ۲). همانطور که از جدول (۲) مشاهده می‌شود نتایج همخوانی قابل قبولی دارند.

جدول ۲- مقایسه پریود و فرکانس طبیعی مرجع با نرم‌افزار AQWA

Ansys-AQWA		SIMA-SIMO		حل تحلیلی	
فرکانس طبیعی (rad/s)	پریود طبیعی (sec)	فرکانس طبیعی (rad/s)	پریود طبیعی (sec)	فرکانس طبیعی (rad/s)	پریود طبیعی (sec)	نوع
۱/۳۰	۴/۸۳	۱/۳۰	۴/۸۳	۱/۲۹	۴/۸۷	هیو
۱/۴۵	۴/۳۳	۱/۴۷	۴/۲۷	۱/۴۷	۴/۲۷	پیچ
۱/۴۶	۴/۳۱	۱/۴۷	۴/۲۷	۱/۴۷	۴/۲۷	رول

پس از اطمینان از صحت مدل‌سازی، به‌منظور بررسی تأثیر فاصله بر رفتار هیدرودینامیکی پلتفرم‌های خورشیدی، سامانه‌ی TriFloatSol به دو پلتفرم مجزا تقسیم شد که در فواصل مختلف از یکدیگر قرار گرفتند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که در فواصل کمتر از ۱۱ متر، به دلیل افزایش دامنه حرکات نسبی، خطر برخورد میان پلتفرم‌ها وجود داشته و فرآیند حل عددی متوقف می‌شود. ازاین‌رو، فاصله‌ی ۱۳ متر به‌عنوان فاصله‌ی ایمن در شروع طراحی برای انجام تحلیل‌ها انتخاب شد. در مقابل، در فاصله‌ی ۱۸ متر خطر برخورد مشاهده نگردید؛ بااین‌حال، افزایش فاصله بیش از این مقدار منجر به کاهش محسوس اندرکنش هیدرودینامیکی و نزدیک‌شدن رفتار هر پلتفرم به حالت مستقل می‌شود. علاوه بر این، افزایش بیش از حد فاصله می‌تواند در عمل چالش‌های اجرایی مرتبط با اتصالات سازه‌ای را نیز به همراه داشته باشد. براین‌اساس، فواصل ۱۳ و ۱۸ متر به‌عنوان دو حالت مرزی مناسب برای ارزیابی رفتار هیدرودینامیکی سامانه در نظر گرفته شدند.

سپس این دو پلتفرم مطابق شکل (۵) از طریق اتصال Ball and Socket به یکدیگر متصل شدند. همچنین چهار سیستم مهاربندی مطابق شکل (۵) و با مشخصات مطابق جدول (۳) برای دو پلتفرم خورشیدی در نظر گرفته شد. سختی و جرم سیستم‌های مهاربندی به‌گونه‌ای انتخاب شد که فرکانس‌های طبیعی حرکات سرج، سوای و یاو در محدوده فرکانس‌های پایین (Low Frequency) قرار گیرند. نتایج استخراج‌شده از RAO حرکت سرج به‌عنوان نمونه در شکل (۶) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، فرکانس طبیعی سیستم در محدوده فرکانس‌های پایین قرار گرفته و با فرض مسئله همخوانی دارد.

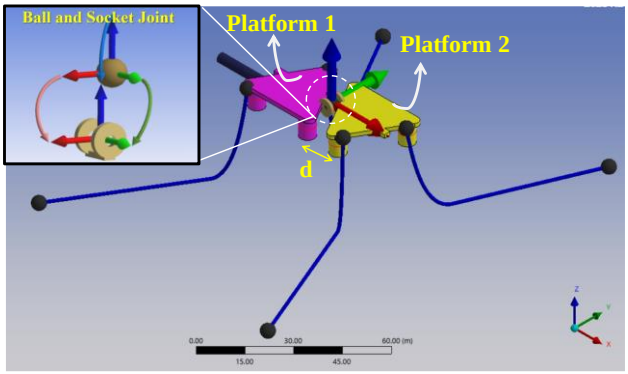
۵- نتایج و بحث

پس از مدل‌سازی و اعمال اطلاعات به مدل، هر دو مدل در فاصله ۱۳ و ۱۸ متری به‌صورت جدا در حوزه فرکانس اجرا شدند. نتایج حاصل از عملگر دامنه پاسخ برای هر شش درجه آزادی هیو، سرج، سوای، پیچ، رول و یاو استخراج، تجزیه‌وتحلیل شد. شکل (۷) و (۸) به ترتیب نمودار عملگر دامنه پاسخ هر دو پلتفرم برای دو فاصله ۱۳ و ۱۸ متری در درجات آزادی انتقالی و دورانی نشان می‌دهد. هر یک از نمودارهای فوق در ادامه مورد بحث قرار گرفته است.

[2] North Sea Center

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

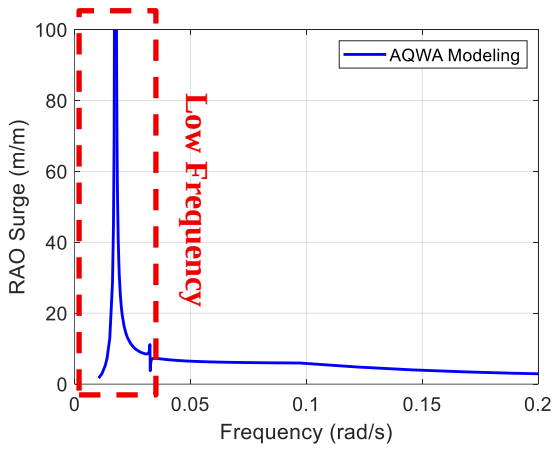
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.121]



شکل ۵- دو پلتفرم همراه با اتصال بال جوینت و سیستم مهاری

جدول ۳- مشخصات سیستم مهاری در نظر گرفته شده

مشخصات	مقدار
جرم بر واحد طول	۲۰/۱۲۹
سختی EA (N)	۹۳۷۲۵۰۰۰
ماکزیمم کشش (N)	۱۱۲۵۴۰۰
ضریب جرم اضافی	۲
ضریب درگ	۱/۵
قطر (متر)	۰/۰۲
طول (متر)	۹۰



شکل ۶- عملگر دامنه پاسخ حرکت سرج با درنظرگرفتن سیستم مهاری

۵-۱- نتایج عملگر دامنه پاسخ سرج، سوای و هیو

شکل (۷) RAO دو پلتفرم (Platform 1 و Platform 2) را در سه درجه آزادی انتقالی سرج، سوای و هیو برای دو فاصله D13 و D18، در سه حالت محیط دریایی مختلف statet 1 تا state3 و در سه جهت موج سفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نشان می‌دهد. در نمودارهای مربوط به حرکت سرج چند پیک برجسته در محدوده فرکانسی پایین (تقریباً در بازه حدود ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ رادیان بر ثانیه) مشاهده می‌شود. در این فرکانس‌ها، نیروی تحریک موج و فرکانس طبیعی سازه باعث ایجاد شرایط تشدید شده و دامنه پاسخ افزایش می‌یابد.

علاوه بر این، پیک‌های ثانویه‌ای که در فرکانس‌های کمی بالاتر مشاهده می‌شوند (حدود ۰/۰۲۲ تا ۰/۰۳۵ رادیان بر ثانیه) می‌توانند ناشی از کوپلینگ بین حرکت سرج با هیو و پیچ باشند. در برخی منحنی‌ها، به‌ویژه در آرایش D18 ، یک پیک ضعیف‌تر نیز در حدود ۰/۰۳۲ تا ۰/۰۳۶ rad/s قابل‌مشاهده است که احتمالاً به مودهای اندرکنش هیدرودینامیکی بین دو پلتفرم مربوط می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در جهت موج ۹۰ درجه نیز برای حرکت سرج پیک‌هایی در همان محدوده تقریباً ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۱۷ rad/sظاهر شده‌اند، درحالی‌که انتظار می‌رود در این جهت تحریک اصلی مربوط به حرکات سوای و رول باشد. این پاسخ می‌تواند ناشی از انتقال انرژی از حرکات عرضی به حرکت طولی از طریق مؤلفه‌های غیردیاگونال ماتریس‌های جرم افزوده و میرایی تشعشعی و نیز اندرکنش هیدرودینامیکی بین دوبدنه باشد.

در نمودار Sway RAO اولین پیک در پایین‌ترین فرکانس‌ها در محدوده حدود ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۱۷ rad/s ظاهر می‌شود که معمولاً مربوط به فرکانس طبیعی حرکت جانبی سازه است. پیک دوم که در فرکانس کمی بالاتردر حدود ۰/۰۲۰ تا ۰/۰۲۵ rad/s مشاهده می‌شود که اغلب ناشی از کوپلینگ بین حرکات سوای و رول است. پیک سوم در بسیاری از منحنی‌ها در محدوده حدود ۰/۰۲۸ تا ۰/۰۳۴ rad/s دیده می‌شود که می‌تواند ناشی از کوپلینگ سوای با هیو باشد. در برخی موارد نیز یک پیک ضعیف‌تر در حوالی ۰/۰۳۵تا ۰/۰۳۸ rad/s مشاهده می‌شود که به احتمال زیاد ناشی از مودهای اندرکنش هیدرودینامیکی بین دو پلتفرم و تغییر در جرم افزوده مؤثر در فضای بین بدنه‌ها است. برای تفسیر پاسخ سوای در جهت موج صفر درجه نیز مشاهده می‌شود که با وجود عدم وجود تحریک جانبی مستقیم، چند پیک تشدیدی در حدود ۰/۰۱۵، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۳۰ rad/s ظاهر می‌شوند که ناشی از کوپلینگ بین درجات آزادی و همچنین اندرکنش هیدرودینامیکی بین دو پلتفرم هستند.

در نمودارهای Heave RAO پیک‌های مشخصی در فرکانس‌های بالاتر نسبت به سرج و سوای مشاهده می‌شود. مهم‌ترین پیک‌ها معمولاً در محدوده حدود ۱/۲ تا ۱/۴ rad/s قرار دارند که می‌توان آن‌ها را نزدیک به فرکانس طبیعی حرکت عمودی سازه در نظر گرفت. علاوه بر این، در برخی جهت‌های موج یک پیک ثانویه نیز در حدود ۱/۶ تا ۱/۸ rad/s مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از اثرات کوپلینگ بین هیو و حرکات دورانی یا مودهای هیدرودینامیکی ثانویه باشد. موقعیت این پیک‌ها در هر دو آرایش فاصله تقریباً مشابه باقی می‌ماند که نشان می‌دهد فرکانس طبیعی هیو بیشتر توسط سختی هیدرواستاتیکی و جرم سازه کنترل می‌شود. قابل‌توجه است که حرکت هیو معمولاً

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.121]

تحت‌تأثیر سختی هیدرواستاتیکی و جرم افزوده سیال قرار دارد، بنابراین فرکانس طبیعی آن معمولاً بزرگ‌تر از حرکات انتقالی افقی است. افزایش ناگهانی دامنه پاسخ در این نقاط نشان می‌دهد که انرژی موج به طور مؤثری به حرکت عمودی سازه منتقل می‌شود.

از مقایسه بین Platform 1 و Platform 2 در نمودار Heave RAO نشان می‌دهد که اگرچه رفتار کلی دو سکو مشابه است، اما اختلاف‌هایی در ارتفاع و موقعیت پیک‌ها وجود دارد که می‌تواند ناشی از تفاوت در مشخصات هیدرودینامیکی، اندرکنش سازه‌ای یا اثرات کوپلینگ بین حرکات باشد. همچنین اختلاف اندک در ارتفاع پیک‌ها بین Platform1 و Platform2 برای هر دو حرکت سرج و سوای نیز نشان‌دهنده سختی مؤثر بال جوینت بوده که دو پلتفرم را به هم متصل کرده است.

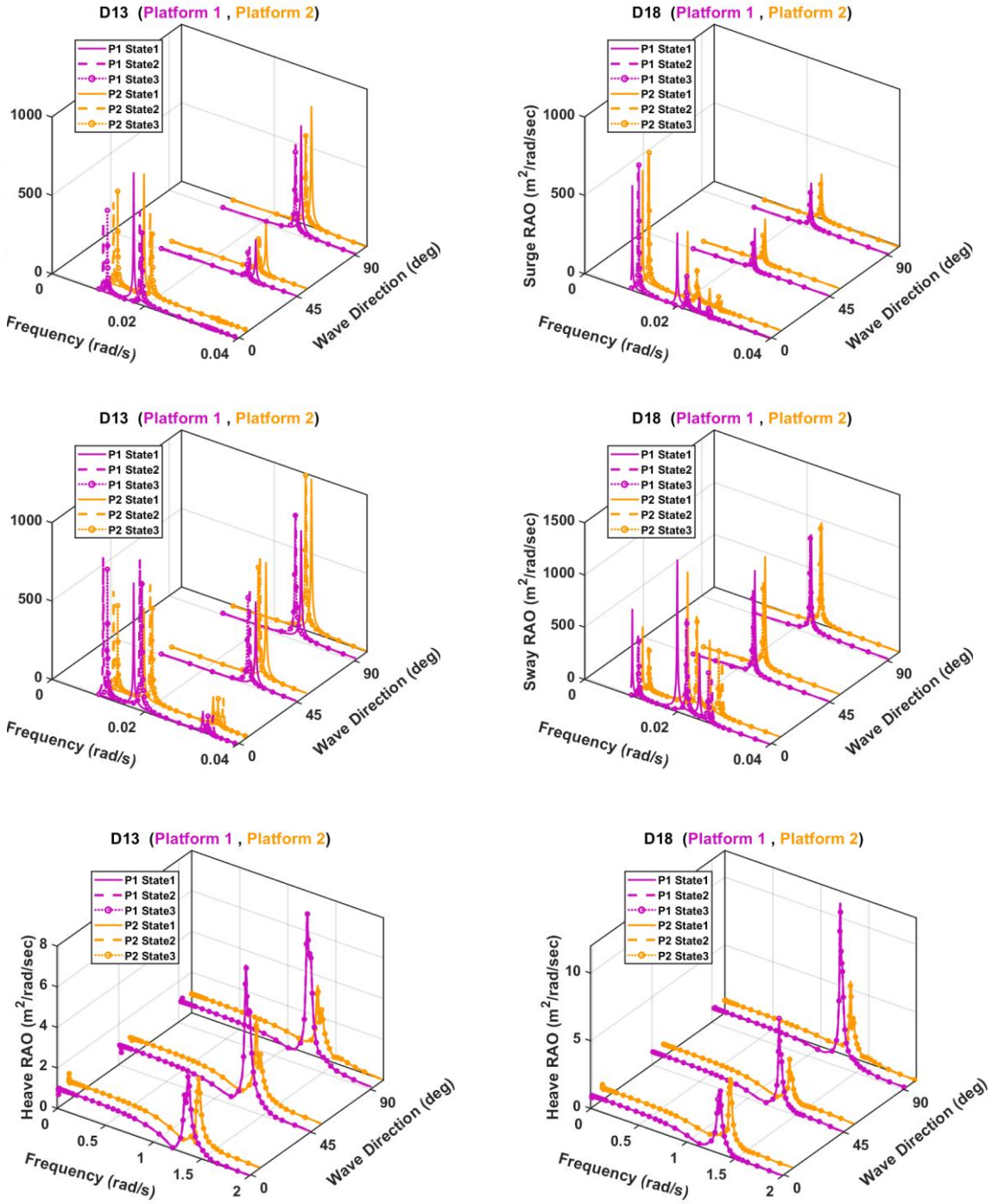
برای تفسیر نقش فاصله در پاسخ‌های RAO؛ در حرکات انتقالی سرج و سوای مشاهده می‌شود که تغییر فاصله بین پلتفرم‌ها بیشتر باعث جابه‌جایی فرکانس‌های تشدید و تغییر تعداد مودهای شده است تا تغییر شدید در دامنه پاسخ‌ها. در حرکت سرج، با افزایش فاصله از ۱۳ به ۱۸ متر، فرکانس پیک‌ها دچار جابه‌جایی به سمت فرکانس‌های بیشتر شده است. به‌عنوان نمونه در حرکت سرج در آرایش D13 پیک اصلی معمولاً در حدود ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۱۵ rad/sدیده می‌شود، درحالی‌که در آرایش D18 این پیک اندکی به سمت فرکانس‌های بالاتر و در حدود ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۱۸ rad/s جابه‌جا شده است. این امر نشان‌دهنده تغییر در جرم افزوده مؤثر و کوپلینگ هیدرودینامیکی بین پلتفرم‌ها است. همچنین در جهت صفر درجه در فاصله بیشتر تعداد پیک‌های بیشتری نسبت به فاصله کمتر مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از تفکیک مودهای تشدیدی سیستم باشد؛ به این معنا که با افزایش فاصله، اندرکنش قوی بین بدنه‌ها کاهش‌یافته و مودهای دینامیکی که در فاصله کمتر به‌صورت ترکیبی ظاهر شده‌اند، به شکل پیک‌های جداگانه قابل‌مشاهده شده‌اند. در شکل (۷) از نظر اندازه دامنه عملگر پاسخ برای حرکت سرج با تغییر فاصله، تغییر قابل‌توجهی دیده نمی‌شود، مگر در جهت ۹۰ درجه که در آن دامنه پیک‌های سرج در فاصله ۱۸ متری بزرگ‌تر از فاصله ۱۳ متری است که می‌تواند ناشی از تغییر در نحوه انتقال انرژی موج به حرکت طولی از طریق کوپلینگ حرکات جانبی و دورانی باشد. در حرکت سوای نیز تغییر اصلی با تغییر فاصله مربوط به جابه‌جایی فرکانس‌های تشدید است؛ به‌طوری که فرکانس پیک‌ها در آرایش D13 بزرگ‌تر از D18 مشاهده می‌شود، درحالی‌که دامنه پیک‌ها تفاوت قابل‌توجهی نشان نمی‌دهد. در مقابل، در حرکت هیو با تغییر فاصله فرکانس پیک تقریباً همان ۱/۳ رادیان بر ثانیه باقی‌ملنده است، اما دامنه پیک در آرایش D18 بزرگ‌تر از D13 است. این رفتار نشان می‌دهد که فاصله بین پلتفرم‌ها تأثیر زیادی بر فرکانس طبیعی حرکت قائم ندارد، زیرا این فرکانس عمدتاً توسط جرم سازه و سختی هیدرواستاتیکی تعیین می‌شود؛ بااین‌حال افزایش فاصله می‌تواند باعث کاهش تداخل هیدرودینامیکی بین بدنه‌ها و در نتیجه افزایش دامنه پاسخ در نزدیکی فرکانس تشدید شود./بررسی شکل (۷) از نظر Sea States نشان می‌دهد که در حرکت هیو، تغییرات Sea State به طور مستقیم در شکل منحنی دیده نمی‌شود. زیرا معادلات حرکت در تحلیل خطی بر پایه اصل برهم‌نهی نوشته می‌شوند و پاسخ سازه متناسب با دامنه موج است؛ بنابراین با تغییر ارتفاع موج که مشخصه اصلی Sea State است هر دو کمیت صورت و مخرج به یک نسبت مقیاس می‌شوند و در نتیجه مقدار RAO مستقل از ارتفاع موج باقی می‌ماند. به همین دلیل، تغییر Sea State در تحلیل خطی صرفاً باعث تغییر دامنه مطلق پاسخ‌ها می‌شود، اما موقعیت فرکانس‌های تشدید و شکل کلی منحنی RAO را تغییر نمی‌دهد. در مقابل، در حرکات سرج و سوای پاسخ سیستم در محدوده فرکانس‌های بسیار پایین یعنی تقریباً ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ rad/sمتمرکز است که این رفتار می‌تولند با اثر نیروهای رانش موج (wave drift forces) و مودهای فرکانس پایین سیستم مرتبط باشد. به همین دلیل حتی در Sea State پایین نیز پیک‌های اصلی در همین محدوده فرکانسی مشاهده می‌شوند و موقعیت آن‌ها تغییر محسوسی نمی‌کند، اگرچه شکل منحنی پاسخ ممکن است اندکی تغییر کند.

۵-۲- نتایج عملگر دامنه پاسخ پیچ، رول و یاو

شکل (۸) منحنی عملگر دامنه پاسخ برای حرکات دورانی رول، پیچ و یاو را نشان می‌دهد. در نمودارهای پیچ و رول مشاهده می‌شود که یک پیک مشخص در فرکانس‌های بسیار پایین حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ rad/s ظاهر شده است که ناشی از کوپل حرکات انتقالی با حرکات دورانی پیچ و رول است. در بازه فرکانسی تقریباً ۱ تا ۲ rad/s در جهت‌های موج ۰ و ۴۵ درجه چند پیک مجزا در پاسخ رول و پیچ مشاهده می‌شود. ظهور این پیک‌ها بیانگر وجود چند مود تشدید در سیستم چند پلتفرمی است. این پیک‌ها معمولاً به مودهای هم‌فاز و ناهم‌فاز حرکت پلتفرم‌ها و همچنین مودهای ترکیبی ناشی از کوپلینگ با حرکات انتقالی طولی و جانبی مربوط هستند. همچنین پیک مشاهده‌شده در محدوده تقریباً ۲/۲ تا ۲/۸ rad/s در جهت‌های ۴۵ و ۹۰ درجه را می‌توان به یک مود هیدرودینامیکی با فرکانس بالاتر یا اثرات اندرکنش موج و بدنه در سیستم دو پلتفرمی نسبت داد که موجب تقویت پاسخ حرکات دورانی در این محدوده فرکانسی می‌شود. در شکل (۸) همچنین مشاهده می‌شود که روند تغییرات Yaw RAO تا حد زیادی مشابه روند حرکات انتقالی سرج و سوای در شکل (۷) است. این شباهت نشان‌دهنده وجود کوپلینگ هیدرودینامیکی میان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.121]

حرکات انتقالی طولی و حرکت دورانی حول محور عمودی اســـت. در ســـیســـتم‌های چند پلتفرمی، نیروهای موج که باعث ایجاد جابه‌جایی‌های افقی در راستای سرج و سوای می‌شوند، می‌توانند به دلیل توزیع نامتقارن نیروها و فاصـــله میان بدنه‌ها، گشـــتاور پیچشی نیز ایجاد کنند و در نتیجه حرکت یاو را تحریک نمایند.



شکل ۷- منحنی RAO پلتفرم‌های خورشیدی برای حرکات Surge, Sway , Heave در فاصله D18 , D13 در سه جهت موج ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه

شکل (۸) منحنی عملگر دامنه پاسخ برای حرکات دورانی رول، پیچ و یاو را نشـــان می‌دهد. در نمودارهای پیچ و رول مشـــاهده می‌شود که یک پیک مشخص در فرکانس‌های بسیار پایین حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ rad/s ظاهر شـده اسـت که ناشـی از کوپل حرکات انتقالی با حرکات دورانی پیچ و رول اسـت. در بازه فرکانسـی تقریباً ۱ تا ۲ rad/s در جهت‌های موج ۰ و ۴۵ درجه چند پیک مجزا در پاسخ رول و پیچ مشـاهده می‌شـود. ظهور این پیک‌ها بیانگر وجود چند مود تشـدید در سـیسـتم چند پلتفرمی اسـت. این پیک‌ها

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.121]

معمولاً به مودهای هم‌فاز و ناهم‌فاز حرکت پلتفرم‌ها و همچنین مودهای ترکیبی ناشی از کوپلینگ با حرکات انتقالی طولی و جانبی مربوط هستند. همچنین پیک مشاهده‌شده در محدوده تقریباً ۲/۲ تا ۲/۸ rad/s در جهت‌های ۴۵ و ۹۰ درجه را می‌توان به یک مود هیدرودینامیکی با فرکانس بالاتر یا اثرات اندرکنش موج و بدنه در سیستم دو پلتفرمی نسبت داد که موجب تقویت پاسخ حرکات دورانی در این محدوده فرکانسی می‌شود. در شکل (۸) همچنین مشاهده می‌شود که روند تغییرات Yaw RAO تا حد زیادی مشابه روند حرکات انتقالی سرج و سوای در شکل (۷) است. این شباهت نشان‌دهنده وجود کوپلینگ هیدرودینامیکی میان حرکات انتقالی طولی و حرکت دورانی حول محور عمودی است. در سیستم‌های چند پلتفرمی، نیروهای موج که باعث ایجاد جابه‌جایی‌های افقی در راستای سرج و سوای می‌شوند، می‌توانند به دلیل توزیع نامتقارن نیروها و فاصله میان بدنه‌ها، گشتاور پیچشی نیز ایجاد کنند و در نتیجه حرکت یاو را تحریک نمایند.

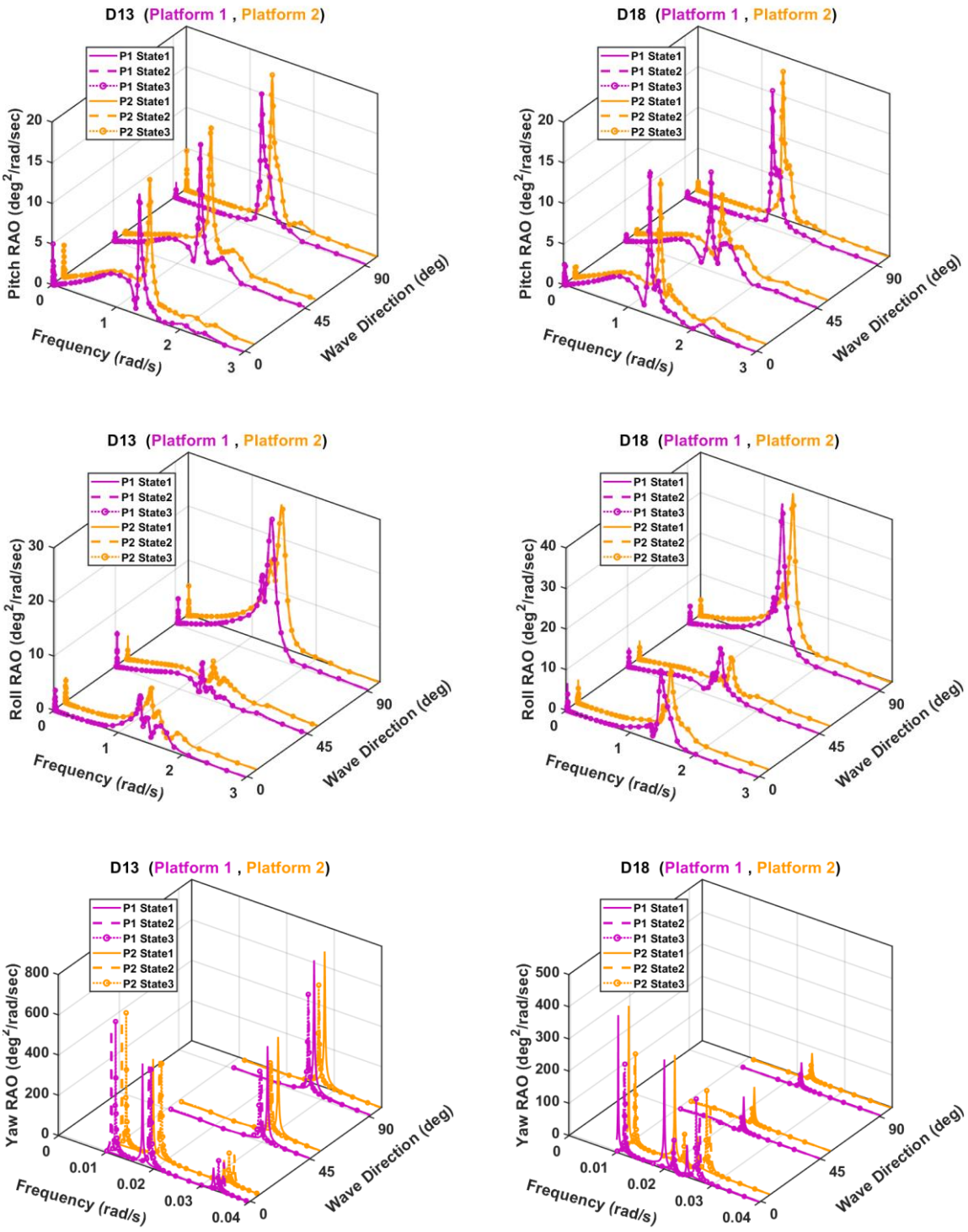
از نظر نقش فاصله، مشاهده می‌شود که تغییر فاصله‌ی بین دو پلتفرم تأثیر محسوسی بر ویژگی‌های مودهای تشدیدی سیستم دارد. در حرکت پیچ مشاهده می‌شود که در فاصله‌ی ۱۸ متر، مقدار پاسخ پیک دوم در بازه‌ی حدود ۱ تا ۲ rad/s نسبت به فاصله‌ی ۱۳ متر شدیدتر و برجسته‌تر شده است. این رفتار نشان می‌دهد که با افزایش فاصله، مودهای کوپل شده‌ی بین دو پلتفرم تا حدی از یکدیگر تفکیک فرکانسی پیدا می‌کنند و انرژی پاسخ در برخی مودها متمرکزتر می‌شود. در نتیجه دامنه‌ی پاسخ در پیک دوم افزایش‌یافته و نمودار تشدید واضح‌تری را نشان می‌دهد. در حرکت رول نیز روند مشابهی از نظر تقویت پیک دوم در فاصله‌ی ۱۸ متر مشاهده می‌شود، با این تفاوت که تعداد پیک‌های تشدیدی در این فاصله کمتر شده است. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده‌ی آن باشد که در فاصله‌ی کمتر (D13) به دلیل اندرکنش قوی‌تر هیدرودینامیکی و کوپلینگ بین حرکات جانبی و دورانی، چندین مود ترکیبی در بازه‌ی فرکانسی نزدیک به هم (تقریباً در همان بازه‌ی ۱ تا ۲ rad/s) فعال می‌شوند و در نتیجه چند پیک مجزا در نمودار ظاهر می‌گردد. اما با افزایش فاصله به ۱۸ متر، این کوپلینگ‌ها ضعیف‌تر شده و برخی از این مودهای ترکیبی با یکدیگر ادغام شده یا شدت آن‌ها کاهش می‌یابد که در نهایت باعث کاهش تعداد پیک‌ها و درعین‌حال تقویت برخی مودهای غالب می‌شود. در مورد حرکت یاو، روند تغییرات پیک‌ها در فاصله‌های ۱۳ و ۱۸ متر بسیار شبیه به رفتار مشاهده شده در حرکت سوای است؛ به‌طوری‌که در نمودارهای یاو، پیک‌های اصلی در محدوده‌ی فرکانسی بسیار پایین حدود ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ rad/s برای هر دو فاصله دیده می‌شوند و تغییر فاصله بیشتر بر دامنه‌ی این پیک‌ها اثر می‌گذارد تا بر موقعیت فرکانسی آن‌ها. زیرا نیروهای جانبی موج که باعث ایجاد حرکت سوای می‌شوند، معمولاً گشتاورهایی حول محور قائم نیز ایجاد می‌کنند و در نتیجه این دو حرکت به‌صورت هم‌زمان تحریک می‌شوند.

مقایسه عملگر دامنه پاسخ‌های دو پلتفرم Platform1 و Platform2 در نمودارها نشان می‌دهد که در حرکات پیچ و رول در بسیاری از فرکانس‌ها، به‌ویژه در حوالی فرکانس‌های تشدید ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ rad/s و ۱ تا ۲ rad/s و همچنین در محدوده‌ی فرکانسی بالاتر حدود ۲/۲ تا ۲/۸ rad/s، پیک‌های دو پلتفرم در موقعیت‌های فرکانسی تقریباً مشابهی رخ می‌دهند که نشان‌دهنده آن است که هر دو سازه تحت‌تأثیر مودهای تشدیدی مشترک سیستم دو پلتفرمی قرار دارند. بااین‌حال، دامنه‌ی این پیک‌ها معمولاً برای یکی از پلتفرم‌ها بزرگ‌تر است که می‌تواند ناشی از تفاوت در موقعیت نسبی آن‌ها نسبت به جهت انتشار موج و اثر سایه‌اندازی هیدرودینامیکی باشد. در مورد حرکت یاو، همانند حرکت سوای، رفتار دو پلتفرم تا حد زیادی مشابه است و پیک‌های اصلی تقریباً در همان محدوده‌های فرکانسی بسیار پایین ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ rad/s ظاهر می‌شوند. بااین‌حال، تفاوت در دامنه پاسخ‌ها نشان می‌دهد که توزیع نیروهای جانبی و گشتاورهای ایجاد شده بر هر پلتفرم یکسان نیست.

رفتار RAO از نظر Sea State نشان می‌دهد که تغییر Sea State در رول و پیچ، نقش قابل‌توجهی در روند عملگر دامنه پاسخ ندارد. در واقع، همانند حرکت هیو، منحنی RAO برای رول و پیچ با تغییر Sea State تقریباً شکل یکسانی را حفظ کرده و تفاوت محسوسی در روند آن ظاهر نمی‌شود؛ به‌گونه‌ای که موقعیت پیک‌های اصلی در حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۶rad/s (پیک فرکانس پایین) و ۱ تا ۲ rad/s (پیک‌های تشدید اصلی) تقریباً ثابت باقی می‌ماند و تغییر Sea State بیشتر روی دامنه این پیک‌ها اثر می‌گذارد تا روی مکان آن‌ها. اما در مورد یاو، رفتار متفاوتی مشاهده می‌شود و Sea State می‌تواند بر روند پاسخ اثرگذار باشد، مشابه آنچه در حرکات سرج و سوای دیده شد؛ به‌طوری‌که با افزایش Sea State، دامنه‌ی پیک‌های اصلی در محدوده‌ی فرکانسی ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ rad/s برای هر دو پلتفرم افزایش‌یافته و تغییرات پاسخ حساس‌تر به شرایط دریا می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.121]



شکل ۸- منحنی RAO پلتفرم‌های خورشیدی برای حرکات Pitch, Roll, Yaw در فاصله D18 , D13 در سه جهت موج ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با افزایش فاصله میان دو پلتفرم، میزان لندرکنش هیدرودینامیکی بین آن‌ها کاهش یافته و پاسخ دینامیکی هر پلتفرم به رفتار مستقل نزدیک می‌شود. این روند با اصول شناخته‌شده اندرکنش سازه‌های شناور چندبدنه سازگار است، به‌طوری که در فواصل کوچک‌تر، کوپلینگ هیدرودینامیکی ناشی از میدان موج پراکنده و تابشی موجب افزایش اثر متقابل میان سازه‌ها می‌شود، در حالی که با افزایش فاصله، شدت این اثرات به‌تدریج کاهش می‌یابد[۲۹]. همچنین پیک‌های مشاهده‌شده در منحنی‌های RAO در نزدیکی فرکانس طبیعی سیستم رخ می‌دهند که با رفتار تشدیدی متداول در تحلیل خطی سازه‌های دریایی همخوانی دارد[۳۰]. روند کلی نتایج نیز با الگوی گزارش‌شده در مطالعات پیشین نویسندگان در زمینه رفتار دینامیکی پلتفرم‌های خورشیدی شناور مطابقت دارد[۲۱].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.121]

۶- جمع‌بندی و پیشنهادات

با افزایش توجه جهانی به منابع انرژی تجدیدپذیر، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین برای تولید انرژی پایدار اهمیت فزاینده‌ای یافته است. در این میان، سامانه‌های خورشیدی شناور به‌عنوان یکی از گزینه‌های نوظهور برای تولید انرژی در محیط‌های آبی مطرح شده‌اند و در سال‌های اخیر توجه قابل‌توجهی را به خود جلب کرده‌اند. باتوجه‌به ظرفیت‌های قابل‌توجه ایران از نظر دسترسی به پهنه‌های آبی، توسعه و به‌کارگیری این فناوری در محیط‌های دریایی می‌تواند نقش مؤثری در تنوع‌بخشی به سبد انرژی کشور ایفا کند. با توجه به اهمیت این مسئله؛ این مطالعه به بررسی نقش فاصله میان پلتفرم‌های خورشیدی شناور تحت‌تأثیر امواج دریا پرداخت. هدف اصلی مطالعه، درک اثر فاصله بین دو پلتفرم خورشیدی از نظر رفتار هیدرودینامیکی آن بود.

برای دستیابی به این هدف، مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار المان مرزی AQWA انجام شد. پس از مرحله اعتبارسنجی، آرایشی شامل دو پلتفرم خورشیدی شناور به همراه سیستم مهاربندی در نظر گرفته شد. دو پلتفرم در دو فاصله ۱۳ و ۱۸ متر به‌صورت مجزا مدل‌سازی شده و از طریق اتصال بال جوینت با سه درجه آزادی دورانی به یکدیگر متصل شدند. سپس مدل فوق تحت امواج دریای شمال در حوزه فرکانس اجرا شد. نتایج حاصل از عملگر دامنه پاسخ نشان داد که:

(۱) فاصله بین پلتفرم‌ها می‌تواند بر اندرکنش هیدرودینامیکی، موقعیت فرکانس‌های تشدید و نحوه کوپلینگ مودهای حرکتی تأثیرگذار باشد.

(۲) تغییر فاصله در بازه بررسی‌شده تأثیر چشمگیری بر دامنه کلی پاسخ‌ها ندارد و بیشتر موجب جابه‌جایی فرکانس‌های تشدید و تفکیک مودهای حرکتی می‌شود.

(۳) در حرکت سرج با افزایش فاصله از ۱۳ به ۱۸ متر، فرکانس برخی پیک‌های تشدید به سمت فرکانس‌های بالاتر جابه‌جا شده‌اند که نشان‌دهنده تغییر در جرم افزوده مؤثر و میزان کوپلینگ هیدرودینامیکی بین دو پلتفرم است.

(۴) در جهت موج صفر درجه مشاهده شد که در فاصله ۱۸ متری تعداد پیک‌های بیشتری نسبت به ۱۳ متری ظاهر شده است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش فاصله، مودهای تشدیدی که در فاصله کمتر به‌صورت ترکیبی ظاهر می‌شدند از یکدیگر تفکیک شده‌اند.

(۵) در جهت موج ۹۰ درجه دامنه پیک‌های سرج در فاصله ۱۸ متر بزرگ‌تر از فاصله ۱۳ متر است که می‌تواند ناشی از تغییر در انتقال انرژی موج از حرکات جانبی و دورانی به حرکت طولی باشد.

(۶) در حرکت سوای تفاوت اصلی بین دو فاصله مربوط به جابه‌جایی فرکانس‌های تشدید است؛ به‌طوری که در فاصله ۱۳ متری فرکانس پیک‌ها بزرگ‌تر از ۱۸ متری مشاهده شد که بیانگر افزایش سختی هیدرودینامیکی مؤثر در فاصله کمتر است.

(۷) در حرکت هیو تغییر فاصله تأثیر محسوسی بر فرکانس طبیعی نداشت، اما در فاصله ۱۸ متری دامنه پیک‌ها بزرگ‌تر از ۱۳ متری بود که نشان‌دهنده کاهش تداخل هیدرودینامیکی بین دو پلتفرم با افزایش فاصله است.

(۸) در حرکات رول و پیچ با افزایش فاصله به ۱۸ متر برخی پیک‌های تشدیدی، به‌ویژه پیک دوم پاسخ، برجسته‌تر شدند که نشان می‌دهد با کاهش اندرکنش مستقیم بین دو سازه، مودهای کوپل شده تا حدی از یکدیگر تفکیک فرکانسی پیدا می‌کنند.

(۹) مقایسه پاسخ‌های Platform 1 و Platform 2 نشان داد که هر دو پلتفرم تحت‌تأثیر مودهای تشدیدی مشترک سیستم قرار دارند، اما اختلاف در دامنه پیک‌ها بیانگر تفاوت در توزیع نیروهای موج، موقعیت نسبی نسبت به جهت موج و اثرات سایه‌اندازی هیدرودینامیکی است.

باتوجه‌به نتایج حاصل شده، مشاهده می‌شود که در طراحی مزارع خورشیدی شناور توجه به فاصله مناسب بین پلتفرم‌ها برای کاهش اندرکنش هیدرودینامیکی، جلوگیری از تشدید مودهای ترکیبی و کاهش احتمال برخورد بین سازه‌ها ضروری است.

- ارائه پیشنهادات برای کارهای آتی

همچنان زمینه‌های متعددی برای توسعه و تکمیل این مطالعه وجود دارد. برخی از فرضیات در این تحقیق باهدف ساده‌سازی مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند و بررسی آن‌ها در شرایط واقعی‌تر می‌تواند به درک دقیق‌تر رفتار هیدرودینامیکی و سازه‌ای سامانه‌های خورشیدی شناور منجر شود. در ادامه، برخی از مهم‌ترین پیشنهادات برای مطالعات آینده ارائه شده است:

- ☑ بررسی اثر فاصله بین دو پلتفرم تحت امواج نامنظم دریا
- ☑ تبدیل دو پلتفرم خورشیدی به مزرعه‌ای از پلتفرم‌های خورشیدی شناور و بررسی نقش فاصله بین آنها.
- ☑ بررسی تأثیر فاصله بر رفتار هیدرودینامیکی آرایه خورشیدی شناور تحت اثر امواج و باد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.121]

۷- مراجع

1- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., (2013), *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781118671603

2- Sahu, A., Yadav, N., and Sudhakar, K., (2016), *Floating photovoltaic power plant: A review*, Renewable and sustainable energy reviews, vol. 66, pp. 815-824. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.051

3-Water, W. S. M., (2019), *Floating Solar Handbook for Practitioners*, World Bank Group, ESMAP & SERIS.

4- Kakoulaki, G., Sanchez, R. G., Amillo, A. G., Szabó, S., De Felice, M., Farinosi, F., De Felice, L., Bisselink, B., Seliger, R., and Kougias, I., (2023), *Benefits of pairing floating solar photovoltaics with hydropower reservoirs in Europe*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 171, p. 112989. https://doi.org/10.2139/ssrn.4074448

5- Emami, A. and Karimirad, M., (2025), *Further development of offshore floating solar and its design requirements*, Marine Structures, vol. 100, p. 103730.

https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2024.103730

6- Xu, P. and Wellens, P. R., (2022), *Fully nonlinear hydroelastic modeling and analytic solution of large-scale floating photovoltaics in waves*, Journal of Fluids and Structures, vol. 109, p. 103446. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2021.103446

7- Ikhennicheu, M., Danglade, B., Pascal, R., Arramounet, V., Trébaol, Q., and Gorintin, F., (2021), *Analytical method for loads determination on floating solar farms in three typical environments*, Solar Energy, vol. 219, pp. 34-41. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.078

8- Ikhennicheu, M., Blanc, A., Danglade, B., and Gilloteaux, J.-C., (2022), *OrcaFlex modelling of a multi-body floating solar island subjected to waves*, Energies, vol. 15, no. 23, p. 9260. https://doi.org/10.3390/en15239260

9- Jiang, Z., Dai, J., Saettone, S., Tørå, G., He, Z., Bashir, M., and Souto-Iglesias, A., (2023), *Design and model test of a soft-connected lattice-structured floating solar photovoltaic concept for harsh offshore conditions*, Marine Structures, vol. 90, p. 103426. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103426

10- Golroodbari, S. Z., Ayyad, A. W., and van Sark, W., (2023), *Offshore floating photovoltaics system assessment in worldwide perspective*, *Progress in Photovoltaics*, Research and Applications, vol. 31, no. 11, pp. 1061-1077. https://doi.org/10.1002/pip.3723

11- Shi, Y., Wei, Y., Tay, Z. Y., and Chen, Z., (2023), *Hydroelastic analysis of offshore floating photovoltaic based on frequency-domain model*, Ocean Engineering, vol. 289, p. 116213. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116213

12- Magkouris, A., Rusu, E., Rusu, L., and Belibassakis, K., (2023), *Floating Solar Systems with Application to Nearshore Sites in the Greek Sea Region*, Journal of Marine Science and Engineering, vol. 11, no. 4, p. 722. https://doi.org/10.3390/jmse11040722

13- Delacroix, S., Bourdier, S., Soulard, T., Elzaabalawy, H., and Vasilenko, P., (2023), *Experimental modelling of a floating solar power plant array under wave forcing*, Energies, vol. 16, no. 13, p. 5198. https://doi.org/10.3390/en16135198

14- Song, J., Imani, H., Yue, J., and Yang, S., (2023), *Hydrodynamic Characteristics of Floating Photovoltaic Systems under Ocean Loads*, Journal of Marine Science and Engineering, vol. 11, no. 9, p. 1813.https://doi.org/10.3390/jmse11091813

15- Zhang, D., Du, J., Yuan, Z., Yu, S., and Li, H., (2023), *Motion characteristics of large arrays of modularized floating bodies with hinge connections*, Physics of Fluids, vol. 35, no. 7. https://doi.org/10.1063/5.0153317

16- Jiang, Z., Dai, J., Saettone, S., and Souto-Iglesias, A., (2024), *Model Tests of a 12 by 18 Floating Solar Array Under Regular Wave Conditions*, in International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2024, vol. 87851: American Society of Mechanical Engineers, p. V007T09A094. https://doi.org/10.1115/omae2024-125822

17- Cao, H., Du, J., Zhao, S., Zhang, D., and Chang, A., (2024), *Analysis of Nonlinear Hydrodynamic Properties of Shallow-Draft Floating Photovoltaic Structure*, in International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, vol. 87851: American Society of Mechanical Engineers, p. V007T09A097. https://doi.org/10.1115/omae2024-127917

18- Fu, Q., Wang, W., Li, D., Li, S., Chen, K., Zheng, L., Wang, C., and Chen, P., (2024), *Development Review of Open Water*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.121]

Economical Floating Photovoltaic Platform, in International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, vol. 87851: American Society of Mechanical Engineers, p. V007T09A091. https://doi.org/10.1115/omae2024-122928
19- Friel, D., (2024), *Dynamic responses of floating photovoltaic arrays under wave loads*, Queen's University Belfast.
20- Mohapatra, S. C., Amouzadrad, P., Bispo, I. B. d. S., and Guedes Soares, C., (2025), *Hydrodynamic response to current and wind on a large floating interconnected structure*, Journal of Marine Science and Engineering, vol. 13, no. 1, p. 63. https://doi.org/10.3390/jmse13010063
21- Emami, A. and Karimirad, M., (2026), *Platform dynamics and hydrodynamic assessment of TriFloatSol offshore floating solar*, Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, vol. 12, no. 1, pp. 327-357. https://doi.org/10.1007/s40722-025-00444-3
22- Aqwa Users Manual, A., "inc. (July 2024). In.,"
23- Emami, A. and Gharabaghi, A. R. M., (2023), *Improvement of the heave motion of a semi-submersible platform with damping sheets subjected to sea waves*, Journal Of Marine Engineering, vol. 19, no. 38, pp. 62-76. https://doi.org/10.61186/marineeng.19.38.62
24- Mousavi Sardari, S. S. and Emami, A., (2025), *Improvement of Hydrodynamic Response of a Semi-submersible Wind Turbine with Damping Sheets*, Journal Of Marine Engineering, vol. 21, no. 45, pp. 67-78. https://doi.org/10.61186/marineeng.21.45.67
25- Emami, A. and Gharabaghi, A. R. M., (2020), *Application of poroelastic layers in a semi-submersible platform: Devising an efficient heave motion response reduction method*, Ocean engineering, vol. 201, p. 107148. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107148
26- Emami, A., Pourjafari, N., and Parghi, A., (2024), *Effect of porous SBR composites on mitigating the heave motion response of a semi-submersible platform*, Ocean Engineering, vol. 295, p. 116856. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116856
27- Mohammadi, P., Emami, A., Gharabaghi, A. R. M., Tahmooresi, S., Chenaghlou, M. R., and Ghavifekr, H. B., (2023), *Evaluation of RAOs of a semi-submersible platform using field measurements: A full-scale model in Caspian sea environmental conditions*, Marine Structures, vol. 91, p. 103467. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103467
28- Barstow, S., Mørk, G., Mollison, D., and Cruz, J., (2008), *The wave energy resource, in Ocean wave energy: current status and future prespectives*, Springer, pp. 93-132. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74895-3_4
29- Faltinsen, O., (1993), *Sea loads on ships and offshore structures*, Cambridge university press. https://doi.org/10.4043/7142-ms
30- Edition, F., Journée, J., and Massie, W., (2001), *Offshore hydromechanics*, Delft University of Technology, vol. 523.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.121]