بهبود حرکت هیو سکوی نیمه مغروق اصلاح شده با ورق‌های میراگر تحت اثر امواج دریا

عارفه امامی*[۱] ، احمدرضا مصطفی قره باغی[۲]

[*۱] استادیار، دانشگاه هرمزگان، emami@hormozgan.ac.ir
[۲] استاد، دانشگاه صنعتی سهند، mgharabaghi@sut.ac.ir

اطلاعات مقاله

''تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۵

کلمات کلیدی:
حرکت هیو
سکوی نیمه مغروق
حل تحلیلی
ورق میراگر
مقادیر ویژه
تئوری تفرق

چکیده

در این مطالعه، به منظور بهبود حرکت هیو سکوی نیمه مغروق از ورق‌های میراگر استفاده شد. ابتدا سکوی نیمه مغروق متداول GVA4000 تحت قطار موج خطی تک جهته در آب عمیق در نظر گرفته شد. با استفاده از حل تحلیلی برپایه تئوری تفرق پاسخ حرکت هیو آن محاسبه شد. نتایج بدست آمده از حل تحلیلی با داده‌های آزمایشگاهی در دسترس مقایسه شد. پس از اطمینان از صحت کارایی حل تحلیلی بکار گرفته شده، ورق‌های میراگر به دور پانتون‌های سکوی GVA4000 مورد مطالعه نصب شد. پاسخ حرکت هیو سکوی اصلاح شده با تغییر در تعداد ورق‌ها و عرض آنها تحت ضخامت ثابت در شرایط گوناگون امواج دریا مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش عرض ورق‌های میراگر پاسخ حرکت هیو سکو کاهش می‌یابد. علاوه بر این فرکانس طبیعی حرکت هیو سکو فاصله بیشتری را از فرکانس موج منظم تکی پیدا می‌کند که این امر خطر ایجاد پدیده تشدید را به طور موثری کاهش خواهد داد. جمع‌بندی نتایج نشان می‌دهد که راهکار پیشنهاد شده یک روش ساده، موثر، اقتصادی و قابل اجرا به منظور بهبود حرکت هیو سکوی نیمه مغروق است.

Improvement of the heave motion of a semi-submersible platform with damping sheets subjected to sea waves

Arefeh Emami[1*], Ahmad Reza Mostafa Gharabaghi[2*]
[1] Assistant Professor, University of Hormozgan; emami@hormozgan.ac.ir*
[2] Professor, Sahand University of Technology; mgharabaghi@sut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 19 Oct 2022
Accepted: 24 Feb 2023

Keywords:

Heave motion
Semi-submersible platform
Analytical solution
Damping sheets
Eigenfunction Expansion Method
Diffraction theory

ABSTRACT

In this study, the damping sheets were attached to a semi-submersible platform to mitigate the heave motions. We first examined a typical GVA4000 semi-sub under a monochromatic linear wave train in deep water. An analytical method based on diffraction theory was used to determine the heave motion response. The results revealed that the analytical results show good agreement with available experimental data. Then, the damping sheets were attached to the pontoons of the GVA4000 semi-sub under study. The heave motion response was evaluated with the changing numbers and widths of sheets under constant thickness in different sea waves conditions. The results showed that with increasing damping sheet width, the heave motion response is improved. Moreover, the heave natural frequency of semi-sub is shifted far away from the monochromatic wave frequency, so, the resonant phenomenon significantly decreases. Based on the proposed method, it is concluded that the solution to reducing heave motion response of the semi-submersible platform is simple, effective, economical and practicable.

۱ - مقدمه

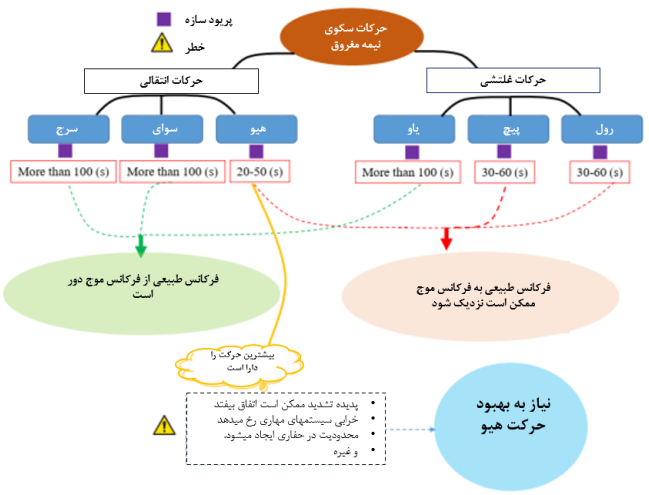
سکوی نیمه‌مغروق زیر گروه سکوهای شناور بوده که به منظور عملیات اکتشاف و بهره برداری نفت در آب‌های متوسط تا فوق عمیق بکار گرفته می‌شود. امروزه این سکوها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که بتوانند با استفاده از یک سیستم تثبیت موقعیت مناسب نیمه مغروق باقی بمانند تا عملیات حفاری یا بهره‌برداری روی آن انجام گیرد. سکوهای نیمه مغروق به‌عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها در عملیات موقت دریایی (مانند حفاری‌های اکتشافی) و کار در میادین کوچک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]

تا متوسط به دلیل قابلیت جابجایی معرفی شده‌اند و در میان تمامی گزینه‌های شناور مطرح شده در جهان به‌عنوان گزینه‌ای شاخص و ممتاز به شمار می‌آیند[۱]. تاکنون ۱۲۶ عدد سکوی نیمه مغروق ساخته شده در جهان موجود است که ۴۷ عدد آن مربوط به آب‌های با عمق متوسط، ۱۲ عدد مربوط به آب‌های عمیق و ۶۷ عدد مربوط به آب‌های فوق عمیق است. در این بین یک سکو مربوط به کشور عزیزمان ایران به نام سکوی حفار ایران امیرکبیر بوده که به منظور حفاری در آب‌های عمیق دریای خزر سفارش شده است[۲].

به لحاظ ساختاری، سکوی نیمه مغروق از سه بخش عرشه، بدنه و سیستم مهاری تشکیل شده است. بدنه سکو شامل ستون‌ها و پانتون‌ها بوده که پانتون پایین‌ترین بخش بدنه سکو است که وظیفه شناوری را بر عهده دارد در حالی که وظیفه ستون اتصال عرشه به پانتون‌هاست. عرشه بالاترین بخش سکو است که تجهیزات لازم از جمله جراثقال‌ها، باند فرود بالگرد و سیستم‌های انتقال مایعات بر روی آن قرار دارد. به منظور نگهداری این نوع سکوها در وضعیت مورد نظر از سیستم‌های مهاری در کف دریا استفاده می‌شود. سکوی نیمه مغروق دارای مزایا و قاعدتا معایبی است که قابلیت جابجایی بالا از مکانی به مکان دیگر، قرارگیری آسان سکو در مکانی که چاه نفتی قرار دارد، سرعت سریع حمل سکو و عرشه نسبتاً بزرگ از مزایای آن به شمار می‌آید. هزینه ساخت بالا، اجرای سخت سیستم-های مهاری و نیاز به حوضچه خشک بزرگ به منظور تعمیر و نگهداری از جمله معایب این نوع سکوها است [۱].

یکی از مهمترین مسائل مربوط به شناخت رفتار سکوی نیمه مغروق جهت و ماهیت حرکاتی است که می‌تواند داشته باشد. این سکو دارای شش درجه آزادی حرکت (سه درجه انتقالی و سه درجه غلتشی) بوده که عبارتند از: حرکت سرج (حرکت در امتداد محور طولی)[۱]، سوای (حرکت در امتداد محور عرضی)[۲]، هیو (حرکت در امتداد محور قائم سکو)[۳]، رول (غلتش حول محور طولی)[۴]، پیچ (غلتش حول محور عرضی)[۵] یاو (غلتش حول محور قائم)[۶][۳]. در این بین حرکت هیو، از حرکات مهم و محدود کننده برای این نوع سکوها است چرا که این حرکت در شرایط طوفانی می‌تواند عملیات بهره‌برداری سکو را دچار اختلال کرده و حتی منجر به خرابی رایزرها و سیستم‌های مهاری؛ بهم خوردن آرامش خدمه و کاهش عمر تجهیزات موجود در آن شود. در شکل ۱ نمودار درختی از حرکات سکو، پریود و خطرات ناشی از حرکت هیو آن به منظور درک بهتر خواننده نشان داده شده است.



شکل ۱. نمودار درختی حرکات سکوی نیمه مغروق

اصولاً هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری از سکوهای نیمه مغروق بسیار بالا است. به‌عنوان نمونه هزینه‌های سرمایه‌گذاری[۷]مربوط به سکوی نیمه مغروق Tesla در دریای شمال که در عمق ۱۱۵ متری قرار داشته و وزن کل بدنه آن ۲۲۸۰۷ تن است در سال ۲۰۱۵، ۲۱۷/۵۷ میلیون دلار آمریکا بوده و هزینه‌های عملیاتی[۸] برای یک روز بهره‌برداری از این سکو حدود ۵۸۴ هزار دلار برآورد شده است [۴]. بنابراین اگر به دلایلی از جمله شرایط نامناسب محیط دریا یا از کارافتادگی سکوی نیمه مغروق، یک روز توقف عملیاتی وجود داشته باشد خسارت قابل‌توجهی به بار خواهد آمد. بنابراین اگر بتوان راهکاری بر روی بهبود عملکرد حرکت هیو سکوی نیمه مغروق اندیشید به‌گونه‌ای که حداکثر بهره‌برداری از سکوی مذکور انجام گیرد کمک شایانی به لحاظ اقتصادی به آن کشور می‌شود. این امر محققین را برای یافتن راهکارهای گوناگونی جهت بهبود پاسخ حرکات سکوی نیمه مغروق بخصوص حرکت هیو آن برانگیخته است از جمله این راهکارها عبارتند از: تغییر در شکل هندسی بدنه سکو، افزایش آبخور سکو با نصب صفحات هیو یا افزایش ارتفاع ستون‌ها و اضافه کردن متریال‌های شکل پذیر به بدنه سکو.

به عنوان نمونه در مورد تغییر در شکل هندسی بدنه سکو، داهان و همکارانش [۵] از ستون‌های شیبدار به جای ستون‌های قائم در سکو استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که راهکار فوق باعث افزایش آبخور سکو شده و در افزایش پایداری؛ افزایش ظرفیت بار عرشه و همینطور ایمنی بیشتر سکو موثر می‌باشد. نیشیمتو و لیتو [۶] مطالعه بر روی پانتون‌هایی که دارای لبه‌های جانبی تیز در اطراف و ستون‌هایی که دارای بیرون زدگی می‌باشند انجام داده و نشان دادند که این شکل هندسی در بهبود عملکرد سکو به ویژه در زمان عملیات حفاری تاثیرگذار است. ویلیام و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۰ شکل

[1] Surging
[2] Swaying
[3] Heave
[4] Rolling
[5] Pitching
[6] Yawing
[7] Capex
[8] Opex

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]

هندسی fourstar dry tree را در نظر گرفتند. ایکس یو [۸] شکل هندسی سکوی نیمه مغروق متعارف را با توزیع در حجم پانتونها، شکل مقطع عرضی پانتون‌ها و ستون‌هایی که دارای بیرون زدگی از پانتون‌ها بوده تغییر داد و نشان داد که حجم پانتون باعث توزیع بار و درنتیجه حداقل شدن حرکت هیو می‌شود. استفاده از ستون‌های دوبل به جای ستون‌های تک یک ثبت اختراعی بود که توسط زو [۹] در سال ۲۰۱۲ انجام شد. ناکو و هاسم [۱۰] شکل بدنه Octabuoy برای سکو در نظر گرفتند و نشان دادند که این شکل هندسی یک حالت بسیار مناسبی برای کاهش حرکات در شرایط محیطی دریای طوفانی است. ونگ و همکاران [۱۱] سکوی نیمه‌مغروق با پانتون‌های نامتقارن را پیشنهاد دادند و نشان دادند که پاسخ حرکت هیو در حالتی که پانتون نامتقارن است نسبت به حالت متقارن آن کمتر خواهد شد.

چن و همکاران [۱۲]، ریجکن [۱۳]، یو و همکاران [۱۴] و همینطور لی و همکاران [۱۵] بر روی افزایش آبخور سکو متمرکز شده و پیشنهاد ستون‌های بلندتر به منظور افزایش آبخور برای سکوی نیمه مغروق را دادند. هالکیارد و همکاران [۱۶]، موری [۱۷]، هاسین و همکاران [۱۸]، منصور [۱۹]، لیو و همکاران [۲۰]، ما و همکارن [۲۱, ۲۲] تماماً به مطالعه بر روی افزایش آبخور با استفاده از صفحات هیو پرداختند و نشان دادند که این صفحات باعث کاهش حرکت هیو سکو خواهد شد. منصور و همکاران [۲۳, ۲۴] یک سکوی نیمه مغروق که ستون‌های آن نقش گروه میراگر را دارند پیشنهاد دادند و با مطالعه عددی بیان کردند که این نوع سکوی جدید پاسخ هیو را از ۷/۲ متر به ۴/۴ متر در شرایط طوفانی هزارساله کاهش خواهد داد. زو و همکاران [۲۵] استفاده ازpaired-column با چهار ستون داخلی، چهار پانتون اصلی و چهار پانتون نصب شده بین ستون‌ها را پیشنهاد دادند و بیان کردند که این نوع سکوها نه تنها حرکت هیو را کاهش می‌دهند بلکه باعث افزایش ایمنی، کاهش حرکت و هزینه سکو شده و برای رایزرها بسیار ایمن و مناسب می‌باشند.

امامی و مصطفی قره باغی [۲۶] استفاده از متریال متخلخل الاستیک نصب شده بر سکوی نیمه مغروق را پیشنهاد دادند. آنها بیان کردند که اگر یک لایه متریال متخلخل شکل پذیر در کف پانتون‌های سکوی نیمه مغروق نصب شود میرایی سکو تحت اثر حرکت هیو افزایش یافته و فرکانس طبیعی سکو فاصله بیشتری را از فرکانس موج تحریک پیدا می‌کند که این امر خطر تشدید را به طور موثری کاهش می‌دهد.

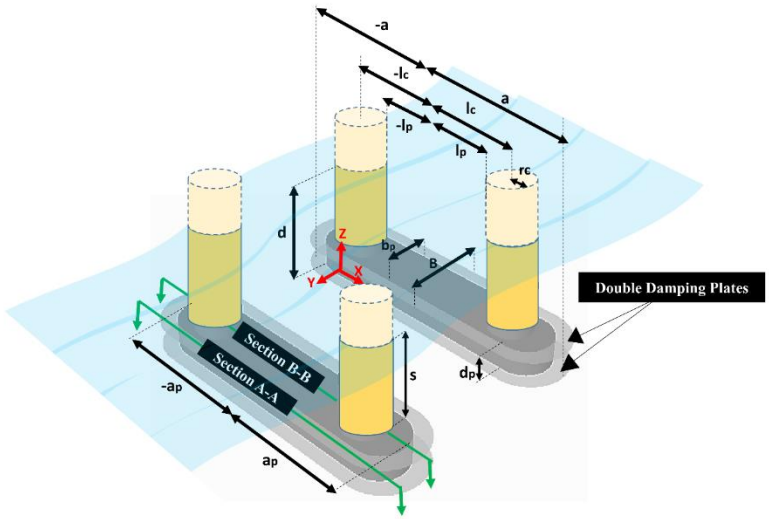
استفاده از ورق در سکوی نیمه مغروق متداول می‌تواند یک راهکار ساده، اقتصادی و قابل نصب حتی بر روی سکوهای ساخته و اجرا شده باشد که با مرور بر تحقیقات گذشته مشاهده شد که مطالعه اندکی روی آن انجام گرفته است از جمله لیپس و همکاران [۲۷] ورق‌هایی به نام Bigfoot در کف چهار ستون یک نوع سکوی نیمه مغروق متصل کردند. این محققین به صورت عددی و آزمایشگاهی نشان دادند که این ورق‌ها در افزایش پریود طبیعی حرکت هیو سکو اثر گذار هستند.

تاکنون مطالعه جامعی در مورد عرض، تعداد و نحوه بکارگیری این ورق‌ها در سکوهای نیمه مغروق صورت نگرفته است. لذا در این مطالعه به منظور کاهش حرکت هیو، از ورق‌های میراگر به دور پانتون‌های سکوی نیمه مغروق استفاده شد و به بررسی پاسخ حرکت هیو سکو با تغییر در تعداد و ابعاد ورق‌ها پرداخته شد. در نگارش مقاله فوق، پس از مقدمه حاضر، در بخش دوم در مورد سکوی نیمه مغروق متداول به کار گرفته شده در این مطالعه و نحوه نصب ورق‌ها بر روی آن صحبت می‌شود. بخش سوم به معرفی راه حل به کار گرفته شده برای حل مسئله می‌پردازد. صحت روش حل مسئله با داده‌های آزمایشگاهی در دسترس در بخش چهارم مقایسه خواهد شد. بخش پنجم به بررسی پارامتری ابعاد و تعداد ورق‌ها و نتایج حاصل شده از آن اختصاص دارد. همچنین ارزیابی پاسخ حرکت هیو سکو تحت اثر شرایط گوناگون امواج دریا در این بخش صحبت خواهد شد. در نهایت بخش ششم به جمع‌بندی مقاله اختصاص دارد.

۲- مدل سکوی نیمه مغروق

سکوی نیمه مغروق حفار متداول GVA4000 در آب عمیق با عمق h_1 تحت امواج منظم در نظر گرفته شد. همانطور که در شکل ۲ به صورت شماتیک نشان داده شده است، ورق‌هایی با ضخامت ورق معادل با ضخامت پلیت بدنه پانتون که ۱۵ میلیمتر است به صورت سرتاسری به دور پانتون‌های سکوی مورد نظر نصب شد. سیستم مختصات کارتزین روی سطح آزاد آب در مرکز سکو لحاظ شد. فرض شد که محور z عمود به سمت بالا، محور x افقی در طول پانتون‌ها و محور y عمود بر پانتون‌ها هستند. سیال به صورت تراکم ناپذیر، غیر لزج و جریان به صورت غیرچرخشی در نظر گرفته شد. فرض شد که سکوی نیمه مغروق اصلاح شده با ورق‌های میراگر تحت موج غالب تک جهته دامنه کوتاه در راستای محور x (به موازات پانتون‌ها) با زاویه صفر درجه قرار دارد. مطالعه پاسخ سکو به صورت تحلیلی بر پایه تئوری تفرق انجام گرفت که در ادامه بیان می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]



شکل ۲. شکل شماتیک سکوی نیمه مغروق اصلاح شده با ورق‌های میراگر

۳- مدل ریاضی سکوی نیمه مغروق اصلاح شده

در بحث اندرکنش موج با سکو، زمانی که سکوی شناور تحت موج پیش‌رونده دامنه کوتاه خطی قرار دارد، قطار موج برخوردی به سکوی شناور متفرق خواهد شد. از اصل جمع آثار می‌توان مسئله پتانسیل سرعت را به دو مسئله میدان موج پراکنده شده[9] و میدان تشعشع[10] تقسیم‌بندی کرد. در حل مسئله میدان موج پراکنده فرض می‌شود که سکو تحت اثر امواج ثابت نگه داشته شده است در نتیجه مجموع موج برخوردی[11] و موج تفرق یافته[12] میدان موج پراکنده شده را تشکیل می‌دهد. در حالی که میدان تشعشع یافته ناشی از حرکت سکو در آب ساکن بوده و در همه جهات از سکو دور می‌شود. بنابراین پتانسیل کلی سرعت به‌صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود [۲۸].

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_D + \sum_{L=1}^{6} \Phi_R^L \qquad (۱)$$

که در آن Φ_I پتانسیل موج برخوردی، Φ_D پتانسیل موج تفرق یافته و Φ_R^L پتانسیل موج تشعشعی است. اندیس L بیان‌کننده حرکات سکو در شش درجه آزادی است.

به دلیل غالب بودن موج در راستای پانتون‌ها، هندسه سکو در راستای y تحت اثر موج قرار نمی‌گیرد لذا می‌توان مسئله سه بعدی را به صورت دو بعدی حل کرد. در این صورت پتانسیل موج برخوردی به کمک تئوری موج خطی ایری و شرایط مرزی دینامیکی و سینماتیکی و در غیاب سکو به‌صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\Phi_I = -i\frac{Ag}{\omega}\frac{cosh(k(z+h_1))}{cosh(kh_1)}exp(ikx) \qquad (۲)$$

که در این رابطه، A دامنه موج، ω فرکانس موج و k عدد موج است.

با فرض هارمونیک بودن موج دامنه کوتاه، پتانسیل تشعشعی به‌صورت رابطه (۳) بیان می‌شود.

$$\Phi_R^{(L)} = Re\left[-i\omega A_R^{(L)}\phi_R^{(L)}(x,z)\right] \qquad (۳)$$

$A_R^{(L)}$ میزان نوسانات سکو در مودهای اول تا ششم است و $\phi_R^{(L)}$ پتانسیل سرعت ویژه تشعشعی در همان مود مربوطه است.

خطی بودن مسئله و وجود یک صفحه تقارن طولی در قسمت زیر آبی سکو باعث می‌شود که حرکت هیو از سایر درجات آزادی مستقل شود در نتیجه می‌توان این حرکت را مانند یک سیستم یک درجه آزادی در نظر گرفت.

دراین مقاله مدل ریاضی سکوی نیمه مغروق اصلاح شده با دو ورق میراگر که پیچیده تر از یک ورق است به صورت پارامتری آورده شده است. برای این منظور فرض شد دو ورق در بالا و پایین پانتون-های سکوی فوق نصب شده است (شکل۲). سپس به منظور مشخص شدن شرایط مرزی، سکوی نیمه مغروق اصلاح شده به ۱۲ ناحیه مختلف تقسیم‌بندی شد و شرایط مرزی افقی و قائم آن مطابق با اشکال ۳ تا ۶ مشخص شد. توجه شود که در اشکال (۳) تا (۶)، ناحیه ۴ با ناحیه ۵ و ناحیه ۷ با ناحیه ۸ به دلیل متقارن بودن سکوی فوق برابر هستند و به همین دلیل در شکل نشان داده نشده است. به کمک معادله لاپلاس و روش جداسازی متغیرها و شرط مرزی افقی و قائم، معادلات هر بخش به دست آورده شد (معادلات ۴-۱۴).

- **ناحیه ۱**

$$\phi_{R1} = \sum_{n=1}^{\infty} A_{1n}e^{\alpha_n(x+a)}\cos\alpha_n(z+h_1) \qquad (۴)$$

- **ناحیه ۲**

$$\phi_{R2} = \frac{(z+h_1)^2 - x^2}{2h_2} + A_{21}x + B_{21} + \sum_{n=2}^{\infty}\left(A_{2n}e^{\beta_n(x+a)} + B_{2n}e^{-\beta_n(x-a)}\right)\cos\beta_n(z+h_1) \qquad (۵)$$

- **ناحیه ۳**

[1] Incident wave
[1] Diffracted wave
[1] 2
[9] Scattered wave field
[1] Radiated field
[1] 0

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]

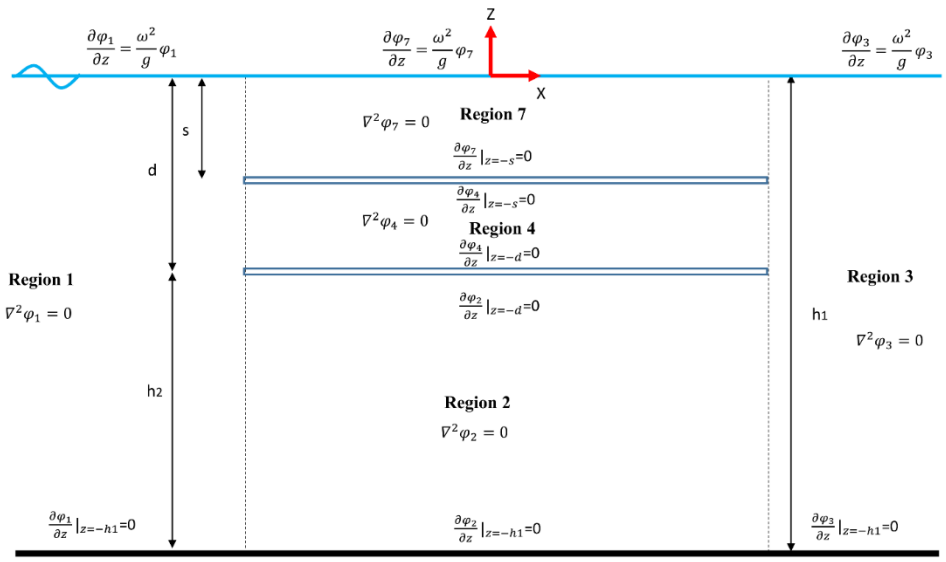
$$\phi_{R3} = \sum_{n=1}^{\infty} A_{3n} e^{-\alpha_n (x-a)} \cos \alpha_n (z + h_1) \quad (۶)$$

- **ناحیه ۴ و ۵**

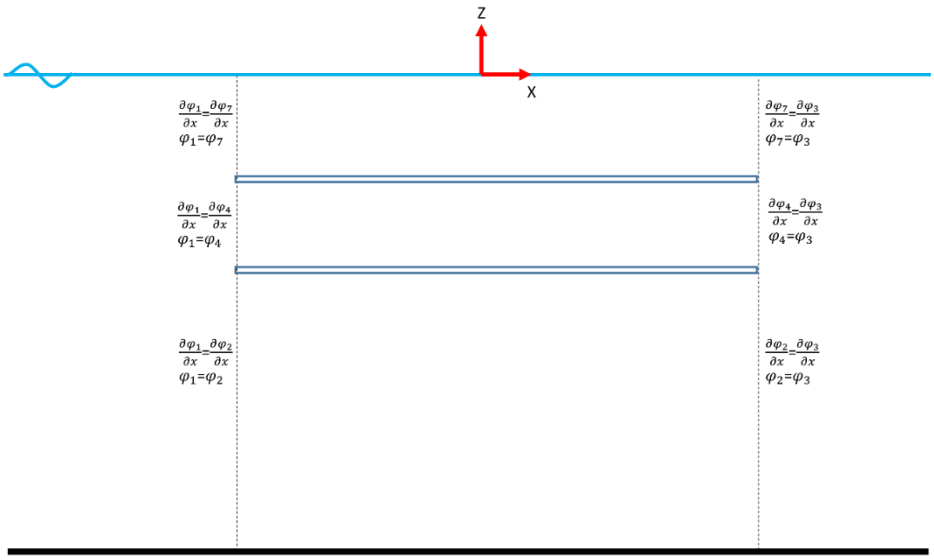
$$\phi_{R4/5} = \frac{(z+d)^2 - (z+s)^2}{2(d-s)} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_{4/5n} e^{\lambda_n (x+a)} + B_{4/5n} e^{-\lambda_n (x-a)}\right) \cos \lambda_n (z + d) \quad (۷)$$

- **ناحیه ۶**

$$\phi_{R6} = \left(z + {}^{g}/_{\omega^2}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_{6n} e^{\gamma_n (x+l_p)} + B_{6n} e^{-\gamma_n (x-l_p)}\right) \cos \gamma_n (z + s) \quad (۸)$$

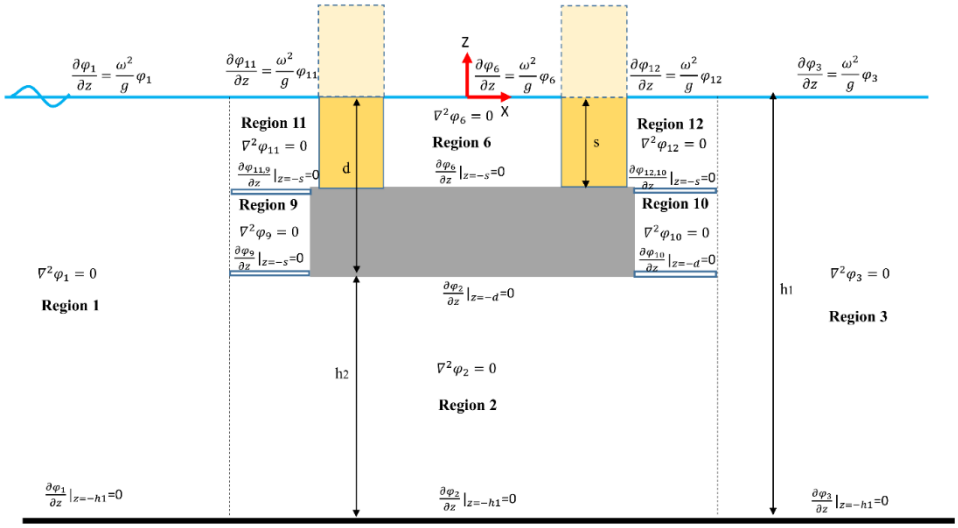


شکل ۳. شرط مرزی افقی مقطع A-A سکوی نیمه مغروق اصلاح شده با ورق میراگر دوبل

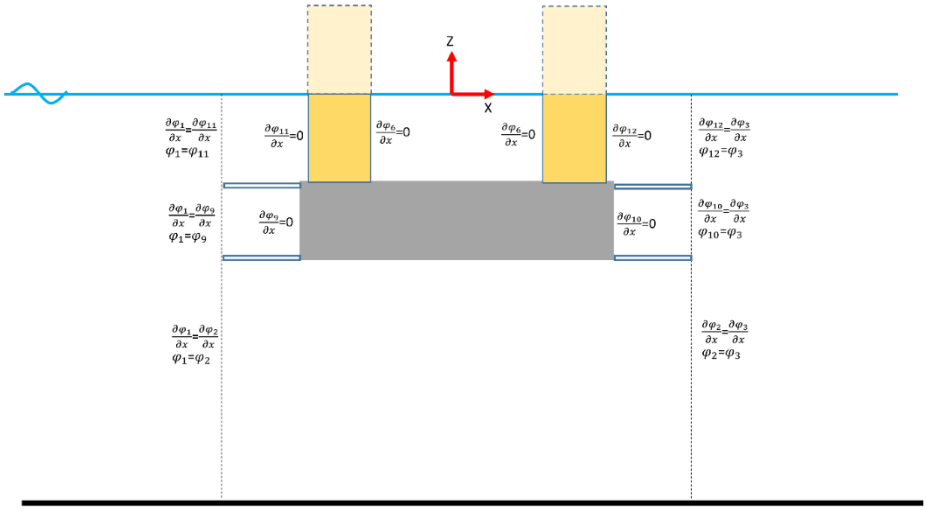


شکل ۴. شرط مرزی قائم مقطع A-A سکوی نیمه مغروق اصلاح شده با ورق میراگر دوبل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]



شکل ۵. شرط مرزی قائم مقطع B-B سکوی نیمه مغروق اصلاح شده با ورق میراگر دوبل



شکل ۶. شرط مرزی قائم مقطع B-B سکوی نیمه مغروق اصلاح شده با ورق میراگر دوبل

- **ناحیه ۷ و ۸**

$$\phi_{R7/8} = \left(z + {}^{g}/_{\omega^2}\right) + \sum_{n=1}^{\infty}\left(A_{7/8n}e^{\gamma_n(x+a)} + B_{7/8n}e^{-\gamma_n(x-a)}\right)\cos\gamma_n(z+s) \quad (۹)$$

- **ناحیه ۹**

$$\phi_{R9} = \frac{(z+d)^2-(z+s)^2}{2(d-s)} + \sum_{n=1}^{\infty}\left(A_{9n}e^{\lambda_n(x+a)} + B_{9n}e^{-\lambda_n(x+l_c+r_c)}\right)\cos\lambda_n(z+d) \quad (۱۰)$$

- **ناحیه ۱۰**

$$\phi_{R10} = \frac{(z+d)^2-(z+s)^2}{2(d-s)} + \sum_{n=1}^{\infty}\left(A_{10n}e^{\lambda_n(x-l_c-r_c)} + B_{10n}e^{-\lambda_n(x-a)}\right)\cos\lambda_n(z+d) \quad (۱۱)$$

- **ناحیه ۱۱**

$$\phi_{R11} = \left(z + {}^{g}/_{\omega^2}\right) + \sum_{n=1}^{\infty}\left(A_{11n}e^{\gamma_n(x+a)} + B_{11n}e^{-\gamma_n(x+l_c+r_c)}\right)\cos\gamma_n(z+s) \quad (۱۲)$$

- **ناحیه ۱۲**

$$\phi_{R12} = \left(z + {}^{g}/_{\omega^2}\right) + \sum_{n=1}^{\infty}\left(A_{12n}e^{\gamma_n(x-l_c-r_c)} + B_{12n}e^{-\gamma_n(x-a)}\right)\cos\gamma_n(z+s) \quad (۱۳)$$

که در این روابط α ، β ، γ و λ مقادیر ویژه هستند که بصورت روابط (۱۴) نوشته می‌شوند. لازم به ذکر است این مقادیر با کمک شرایط مرزی و حل معادلات لاپلاس بدست آمده‌اند.

$$\begin{aligned}
&\alpha_1 = -ik, k\tanh k\,h_1 = \frac{\omega^2}{g}, n = 1,\\
&\alpha_n \tan\alpha_n h_1 = -\frac{\omega^2}{g}, n = 2,3,4,\ldots\\
&\beta_n = \frac{(n-1)\pi}{h_1 - d}, n = 1,2,3,\ldots\\
&\gamma_1 = -ik, k\tanh k\,s = \frac{\omega^2}{g}, n = 1,\\
&\gamma_n \tan\gamma_n s = -\frac{\omega^2}{g}, n = 2,3,4,\ldots
\end{aligned} \quad (۱۴)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]

$$\lambda_n = \frac{(n-1)\pi}{d-s}, n = 1,2,3,\ldots$$

روند حل معادلات پارامتری سکوی اصلاح شده با یک ورق نیز به همین منوال است و تنها تفاوت آن در شرایط مرزی و تقسیم بندی مرزها است که به دلیل طولانی شدن مقاله از آوردن معادلات آن صرفنظر شد.

۳-۱. حل ضرایب ناشناخته به روش مقادیر ویژه

معادلات (۴) تا (۱۴) دارای ۱۸ ضریب ناشناخته بوده که این ضرایب با روش Eigenfunction Expansion Method (EEM) و به کمک شرایط مرزی قائم نشان داده شده در اشکال ۴ و۶ حل می‌شوند. EEM یک تکنیک برای حل مسائل تشعشع و پراکندگی امواج است که با انتگرال فوریه و سری‌های نامحدود در ارتباط است. به این ترتیب با نوشتن معادلات ماتریسی از ضرایب معلوم و مجهول، معادلات شکل گرفته و در نهایت به روش عددی پایین مثلثی حل می‌گردد.

$$[r_{ij}^n][A_{1n}, A_{2n}, \ldots, A_{12n}, B_{1n}, B_{2n}, \ldots, B_{12n}]^{-1} = [N_i^n], \quad (۱۵)$$
$$i,j = 1,2,3,\ldots,18, \qquad and \;\; n = 1,2,\ldots,\infty$$

که در آن $[r_{ij}^n]$ ماتریس ۱۸ در ۱۸ و $[N_i^n]$ بردار ۱۸ در ۱ با ضرایب معلوم هستند.

۳-۲. معادله حرکت هیو حاکم بر مسئله

معادله یک درجه آزادی حرکت هیو سکو به صورت معادله (۱۶) نوشته می‌شود.

$$(M + m_a)\ddot{z} + (C + C_v)\dot{z} + Kz = F_e \quad (۱۶)$$

که در این رابطه C_v میرایی ویسکوز است و مقدار ضریب میرایی خطی ویسکوز از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$C_v = \frac{1}{2} C_D \rho_w A_g \frac{8}{3\pi} V_{max} \quad (۱۷)$$

در این رابطه C_D ضریب درگ که از آیین نامه DNV می‌توان تعیین کرد، A_g سطح مقطع ورق‌ها، V_{max} برابر با دامنه سرعت خطی است که معادل با $A\omega$ می باشد و A دامنه موج است.

محاسبه حرکت هیو سکو نیازمند جرم اضافی، ضریب میرایی، سفتی، و نیروی تحریک ناشی از موج است. با استفاده از رابطه ریاضی Haskind (معادله ۱۸) می‌توان نیروی تحریک موج را با تقریب پتانسیل تشعشع یافته در میدان دور بدون حل مسئله تفرق بدست آورد [۲۹].

$$F = \rho_w i\omega \left[\int_{S_0} (\Phi_I + \Phi_D) n_L ds = \int_{S_0} \left(\Phi_I \frac{\partial \phi_R}{\partial n_L} \right) ds + \int_{S_0} \phi_R \left(\underbrace{\frac{\partial \Phi_D}{\partial n_L}}_{-\frac{\partial \Phi_I}{\partial n}} \right) ds = \int_{S_0} \Phi_I n_L ds - \int_{S_0} \phi_R \left(\frac{\partial \Phi_I}{\partial n_L} \right) ds \right] \quad (۱۸)$$

مقدار ضریب میرایی و جرم اضافی به کمک پتانسیل تشعشعی به صورت معادلات (۱۹) و (۲۰) محاسبه میشوند که در این معادلات $\wp$ به صورت رابطه (۲۱) می‌باشد.

$$m_a = \rho \int_{S_0} Re[\phi_R^{(L)}] n_j ds = \rho \, Re(\wp) \quad (۱۹)$$

$$C = \rho \int_{S_0} \mathrm{Im}[\phi_R^{(L)}] n_j ds = \rho\omega \, Im(\wp) \quad (۲۰)$$

با جایگذاری معادلات (۱۸ تا۲۱) و حل معادله (۱۶) عملگر دامنه پاسخ (RAO)[۳] برای حرکت هیو می‌توان استخراج نمود. عملگر دامنه پاسخ، در حقیقت نسبت دامنه پاسخ سکو شناور به ارتفاع موج برخوردی است. از این عملگر برای محاسبه طیف پاسخ سکوی شناور $(S_s(\omega))$ استفاده می‌شود. طیف پاسخ سکو شناور از ضرب طیف موج مورد نظر در توان دوم RAO بدست می‌آید (معادله ۲۲).

$$S_s(\omega) = RAO^2 \times S_\xi(\omega). \quad (۲۲)$$

طیف موج بکار برده شده در این مطالعه طیف جانسواپ می‌باشد که از رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود.

$$S_\xi(\omega) = \hat{a} H_s^2 \frac{\omega^{-5}}{\omega_p^{-4}} exp\left[-1.25(\omega/\omega_p)^{-4}\right] \gamma^{exp\left[-\frac{(\omega-\omega_p)^2}{2\tau^2\omega_p^2}\right]} \quad (۲۳)$$

که در این رابطه H_s ارتفاع موج مشخصه، ω_p فرکانس پیک موج، τپارامتر شکل است که مقدار این پارامتر اگر و$\omega \le \omega_p \Rightarrow \tau =$ $\tau_a = 0.07$ در غیر این صورت $\tau = \tau_b = 0.09,$ است و مقدار $\hat{a}$ برابر با رابطه (۲۴) است.

$$\hat{a} = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \quad (۲۴)$$

γ پارامتر پیک طیف است.

با معلوم بودن طیف امواج و همچنین عملگر دامنه پاسخ سکو می‌توان طیف پاسخ سکوی نیمه مغروق را بدست آورد و در نتیجه با انتگرال‌گیری از سطح زیر نمودار طیف پاسخ سکو با استفاده از قائده ذوزنقه‌ای، مقدار پاسخ سکو مطابق بر اساس روابط (۲۵) و (۲۶) محاسبه می‌شود.

[1] Response Amplitude Operator [3]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]

$$\wp = 2\times\left[\begin{array}{l}\int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}}\int_{-a-\ell_d}^{a+\ell_d}\phi_{R2}|_{z=-d}dx\,dy-\int_{-\frac{B-b_p}{2}}^{\frac{B-b_p}{2}}\int_{-a-\ell_d}^{a+\ell_d}\phi_{R4/5}|_{z=-d}dxdy+\int_{-\frac{B-b_p}{2}}^{\frac{B-b_p}{2}}\int_{-a-\ell_d}^{a+\ell_d}\phi_{R4/5}|_{z=-s}dx\,dy\\ -\int_{-\frac{B-b_p}{2}}^{\frac{B-b_p}{2}}\int_{-a-\ell_d}^{a+\ell_d}\phi_{R7/8}|_{z=-s}dx\,dy-\int_{-\frac{b_p}{2}}^{\frac{b_p}{2}}\int_{-a-\ell_d}^{-l_c-r_c}\phi_{R9}|_{z=-d}dxdy-\int_{-\frac{b_p}{2}}^{\frac{b_p}{2}}\int_{l_c+r_c}^{a+\ell_d}\phi_{R10}|_{z=-d}dx\,dy\\ +\int_{-\frac{b_p}{2}}^{\frac{b_p}{2}}\int_{-a-\ell_d}^{-l_c-r_c}\phi_{R9}|_{z=-s}dx\,dy+\int_{-\frac{b_p}{2}}^{\frac{b_p}{2}}\int_{l_c+r_c}^{a+\ell_d}\phi_{R10}|_{z=-s}dx-\int_{-\frac{b_p}{2}}^{\frac{b_p}{2}}\int_{-a-\ell_d}^{-l_c-r_c}\phi_{R11}|_{z=-s}dx\,dy-\\ \int_{-\frac{b_p}{2}}^{\frac{b_p}{2}}\int_{l_c+r_c}^{a+\ell_d}\phi_{R12}|_{z=-s}dx\,dy-\int_{-\frac{b_p}{2}}^{\frac{b_p}{2}}\int_{-l_p}^{l_p}\phi_{R6}|_{z=-s}dx\,dy\end{array}\right] \quad (۲۱)$$

$$m_{0s}=\int_0^{\infty}S_s(\omega)d\omega\,,\qquad (2S)_s=4\sqrt{m_{0s}}. \quad (۲۵)$$

$$\int_a^b S_s(\omega)d\omega\approx\frac{\Delta\omega}{3}[S_0+4S_1+2S_2+4S_3+2S_4+\ldots+4S_{n-1}+S_n];\ \Delta\omega=\frac{b-a}{n} \quad (۲۶)$$

۴- صحت سنجی معادلات استخراج شده

قبل از استفاده از روابط استخراج شده، بایستی همگرایی و صحت معادلات توسعه داده‌شده بررسی شود. برای این منظور، سکوی نیمه مغروق GVA4000 که یک سکوی حفاری متداول در جهان است و اطلاعات آزمایشگاهی حرکت هیو آن در دسترس است بدون وجود ورق‌های میراگر موردمطالعه قرار گرفت. در ابتدا همگرایی مدل کنترل‌شده سپس عملگر دامنه پاسخ آن محاسبه و با داده‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه شد. به منظور کنترل صحت معادلات توسعه داده شده برای سکوی اصلاح شده با ورق، به دلیل عدم وجود داده آزمایشگاهی از مدل عددی استفاده شد. مقایسه بین حل تحلیلی و عددی صورت گرفت که در ادامه بیان می‌شود.

۴-۱. ارزیابی همگرایی مدل

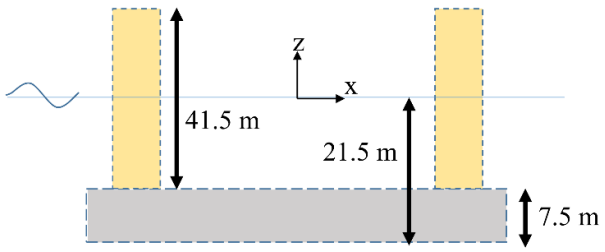
به‌منظور ارزیابی همگرایی مدل، ابتدا ابعاد سکوی نیمه مغروق GVA4000 (شکل ۷ و ۸) در معادلات توسعه داده‌شده بدون وجود ورق‌های میراگر جایگذاری شد. مقدار متغیرهای جرم اضافی و میرایی به ازای دو فرکانس ۰/۳۹ و ۰/۲۷ رادیان بر ثانیه (فرکانس‌های پیک موج منحنی RAO)، برای حرکت هیو به ازای مدهای مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ محاسبه گردید (جدول ۱). این مدها جمع ۱۰ تا ۶۰ جمله‌ی اول سری توابع ویژه می‌باشند. همان‌گونه که از جدول ملاحظه می‌شود، همگرایی برای حرکت هیو از مد ۴۰ به بعد اتفاق می‌افتد.

جدول ۱. ارزیابی همگرایی مدل بر اساس جرم اضافی و میرایی بی بعد شده

تعداد مود	فرکانس ۰/۲۷ رادیان بر ثانیه		فرکانس ۰/۳۹ رادیان بر ثانیه	
	جرم اضافی بی‌بعد شده	میرایی بی‌بعد شده	جرم اضافی بی‌بعد شده	میرایی بی‌بعد شده
۱۰	۲/۱۷۹	۰/۰۷۴	۹/۳۸	۰/۰۱۷۲
۲۰	۱/۵۰۵	/۰۷۴۴ ۰	۸/۷۳	۰/۰۱۷۲
۳۰	۱/۴۰۷	۰/۰۷۴	۸/۶۳۳	۰/۰۱۷۲
۴۰	۱/۳۷۹	۰/۰۷۴	۸/۶۰۵	۰/۰۱۷۲
۵۰	۱/۳۷۷	۰/۰۷۴	۸/۶۰۵	۰/۰۱۷۲
۶۰	۱/۳۷۴	۰/۰۷۴	۸/۶۰۵	۰/۰۱۷۸

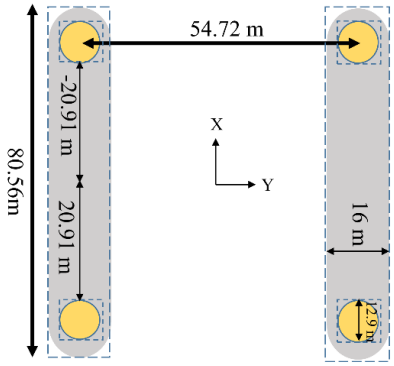
۴-۲. صحت سنجی معادلات با فرض عدم وجود ورق

پس از مشخص شدن همگرایی مدل، منحنی RAO حرکت هیو سکوی نیمه مغروق GVA4000 با کمک معادلات نوشته‌شده به‌صورت تحلیلی بدون در نظر گرفتن ورق‌ها محاسبه شد. نتایج حاصل از حل تحلیلی با داده‌های آزمایشگاهی که بر روی یک مدل GVA4000 با مقیاس ۱:۸۱ در فلوم موجی با طول ۸۰ متر، عرض ۴ متر و عمق ۱/۵ متر تحت امواج تک جهته و طوفانی توسط کلاوس و همکاران [۳۰] انجام شده بود مقایسه گردید. شکل ۹ مقایسه بین نتایج تحلیلی با داده آزمایشگاهی موجود را نشان می‌دهد. همین‌طور که مشاهده می‌شود توافق قابل قبولی بین هر دو نتایج وجود دارد که نشان از صحت معادلات توسعه داده شده با حل تحلیلی سکوی نیمه مغروق است.

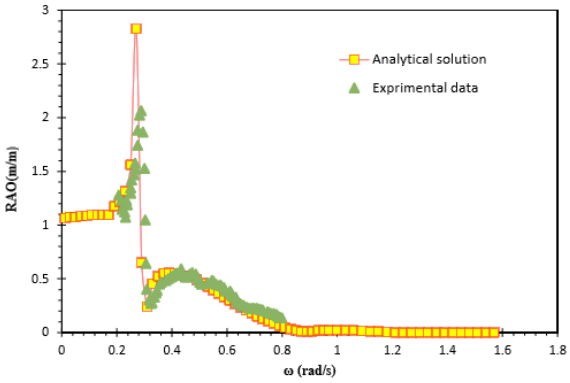


شکل ۷. نما از روبروی بدنه سکوی نیمه مغروق حفاری GVA4000 مورد مطالعه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]



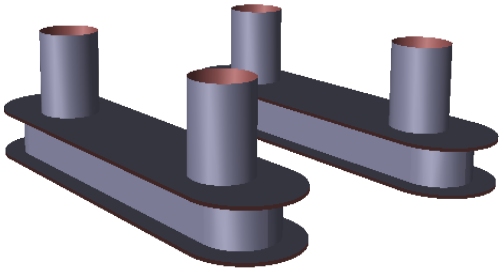
شکل ۸. نما از بالای پانتون‌ها و ستون‌های بدنه سکوی حفار GVA4000 مورد مطالعه



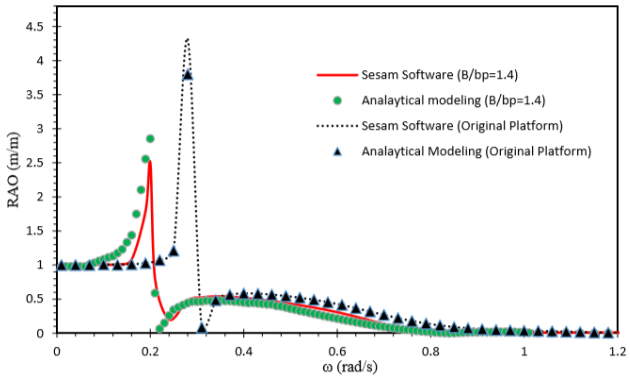
شکل ۹. مقایسه حرکت هیو سکوی نیمه مغروق GVA4000 با روش تحلیلی و داده‌های آزمایشگاهی

۴-۳. صحت سنجی معادلات توسعه داده شده سکوی اصلاح شده با ورق

قبل از بررسی و ارزیابی پاسخ حرکت هیو سکوی اصلاح شده با ورق میراگر، لازم است صحت معادلات توسعه داده شده برای سکوی اصلاح شده نیز بررسی شود. به دلیل عدم وجود داده آزمایشگاهی یا میدانی در این مورد، از حل عددی اجزا محدود برای صحت سنجی معادلات بهره گرفته شد. برای این منظور فرض شد ورق‌های میراگر دوبل با عرض ۱/۴ متر و ضخامت ۱۵ میلیمتر به سکوی نیمه مغروق GVA4000 متصل شده است. با استفاده از معادلات تحلیلی توسعه داده شده RAO آن بدست آمد. سپس سکوی اصلاح شده فوق در محیط نرم افزار اجزا محدود Sesam-Geni مدلسازی شد (شکل ۱۰). مدل شبیه سازی شده در ماژول Sesam-HydroD فراخوانی و با اعمال مشخصات موج، منحنی RAO هیو آن پردازش گردید. نتایج استخراج شده از مدل عددی با نتایج حاصل از حل تحلیلی مقایسه گردید. همانگونه که از شکل ۱۱ مشاهده می شود دقت قابل قبولی بین حل تحلیلی و مدلسازی عددی وجود دارد بنابراین معادلات توسعه داده شده قابلیت اطمینان کافی را دارا هستند.



شکل ۱۰. مدلسازی سکوی نیمه مغروق GVA4000 اصلاح شده با صفحات میراگر دوبل در نرم افزار GeniE



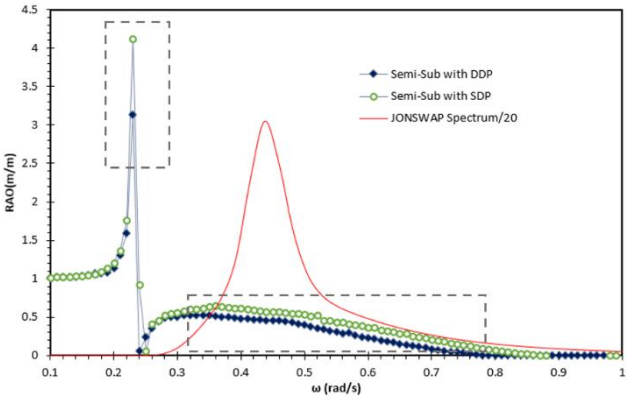
شکل ۱۱. مقایسه یک نمونه از مدلسازی عددی با نرم افزار Sesam برای سکوی نیمه مغروق مجهز شده به ورق‌های میراگر با حل تحلیلی

۵- نتایج و بررسی

۵-۱. ارزیابی تعداد ورق ها در رفتار هیو سکوی نیمه مغروق

پس از اطمینان از روابط تحلیلی توسعه داده شده، به منظور مقایسه بین تعداد ورق‌ها، دو حالت در نظر گرفته شد: (۱) ورق SDP که از یک ورق متصل شده به کف پانتون‌های سکوی نیمه مغروق تشکیل شده است، (۲) ورق DDP که از دو ورق یکی در بالا و دیگری در پایین پانتون تشکیل شده است. فرض شد که نسبت عرض ورق به عرض اولیه پانتون برابر ۱/۲ است و باقی پارامترها از جمله ابعاد بدنه سکوی فوق ثابت هستند. با استفاده از روابط تحلیلی مقادیر RAO هیو برای هر دو حالت محاسبه و به صورت شکل ۱۲ با هم مقایسه شد. همانگونه که از شکل مشاهده می‌شود استفاده از دو ورق مقدار کاهش RAO بیشتری نسبت به یک ورق نشان می‌دهد. علاوه بر این پاسخ سکو در هر دو حالت تحت طیف جانسواپ با ارتفاع موج شاخص ۱۱/۹۲ متر و پریود پیک ۱۰/۸ ثانیه محاسبه شد و میزان بهبود پاسخ مطابق با جدول ۲ مقایسه شد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]



شکل ۱۲. مقایسه استفاده از یک ورق و دو ورق میراگر به دور پانتون-های سکوی نیمه مغروق

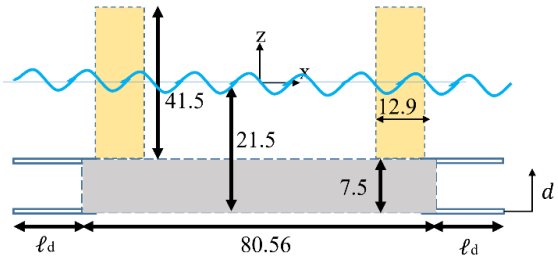
جدول ۲. مقایسه پاسخ هیو سکوی اصلاح شده با یک ورق و دو ورق

	مقدار پیک RAO	درصد کاهش پیک RAO	پاسخ حرکت هیو (متر)	درصد کاهش پاسخ حرکت هیو
سکوی مرجع	۴/۲۵	-	۳/۰۱	-
SDP	۴/۱۸	۱/۶۵	۲/۶۹	۱۰/۶۳
DDP	۳/۱۴	۲۶/۱۲	۲/۳۱	۲۳/۲۵

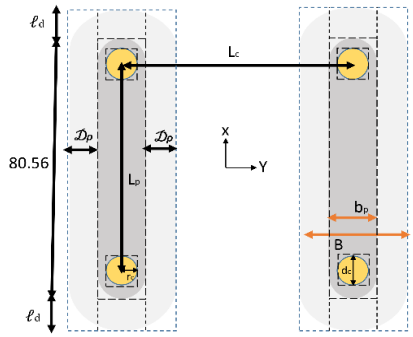
همانگونه که از جدول ۲ مشاهده می‌شود استفاده از دو ورق درصد کاهش بیشتری را نسبت به یک ورق نشان می‌دهد که این امر را می‌توان به دلیل افزایش جرم اضافی و در نتیجه به دام افتادن بیشتر آب دانست. لذا در ادامه تمرکز روی سکوی نیمه مغروق اصلاح شده با دو ورق بوده و نتایج حاصل از آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۵-۲. ارزیابی ابعاد ورق های دو بل میراگر در رفتار هیو سکوی نیمه مغروق اصلاح شده

به منظور ارزیابی ابعاد ورق‌های میراگر در پاسخ هیو سکوی نیمه مغروق اصلاح شده، فرض شد ابعاد اولیه سکو ثابت است و پارامترهای متغیر مربوط به ورق سکوی اصلاح شده مطابق با شکل ۱۳ و ۱۴ می‌باشد. علاوه بر این فرض بر این شد که مرکز جرم، مرکز شناوری و مساحت عرشه همواره ثابت بوده و این سکو پس از نصب ورق‌ها نیز پایدار باقی می‌ماند. به منظور بررسی پارامتری ابعاد ورق، نسبت‌های پارامتری مطابق با جدول ۳ در نظر گرفته شد. چهار حالت DDP1 تا DDP4 با عرض‌های نسبی، طول‌های نسبی و در نتیجه وزن نسبی تحت ضخامت ثابت بررسی شد (جدول ۴). از جدول ۴ مشاهده می‌شود که در نهایت وزن سکو حدود ۲ درصد افزایش یافته است توجه شود که در محاسبات وزن اثر استیفنرهای تقویتی لحاظ نشده است. با محاسبه جرم اضافی، میرایی، نیروی تحریک موج و عملگر پاسخ حرکت هیو سکوی نیمه مغروق اصلاح شده برای هر ۴ حالت، مقدار پاسخ سکو تحت شرایط موج گوناگون بدست آمد که در ادامه بیان می‌شود.



شکل ۱۳. نما از روبروی پانتون‌ها و ستون‌های بدنه سکوی نیمه مغروق حفاری GVA4000 اصلاح شده با ورق ها



شکل ۱۴. نما از بالای پانتون‌ها و ستون‌های بدنه سکوی نیمه مغروق حفاری GVA4000 اصلاح شده با ورق‌ها

جدول ۳. پارامترهای نسبی تعریف شده

پارامترها	معرفی	No
$\zeta = \frac{l_d}{2a}$	نسبت طول ورق به طول پانتون	۱
$\tau = \frac{B}{b_p}$	نسبت عرض ورق به عرض پانتون	۲
$W = \frac{W_{MSSP}}{W_{SSP}}$	نسبت وزن سکوی اصلاح شده به وزن سکوی اصلی	۳

جدول ۴. حالات در نظر گرفته شده

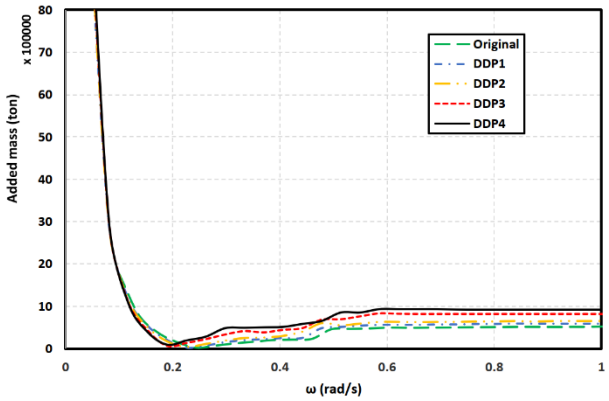
No	ζ	τ	W	درصد افزایش وزن (%)
DDP1	1.02	1.1	1.0035	0.35
DDP2	1.04	1.2	1.0071	0.705
DDP3	1.06	1.4	1.0145	1.43
DDP4	1.08	1.6	1.022	2.153

۵-۲-۱. ارزیابی جرم اضافی، میرایی و نیروی تحریک

به منظور درک رفتار جرم اضافی، میرایی و نیروی تحریک موج وارد بر سکوی اصلاح شده، نمودارهای آن مطابق با اشکال ۱۵ تا ۱۷ بر حسب فرکانس موج زاویه‌ای (با گام فرکانسی ۰/۰۳ رادیان بر ثانیه) برای حالات DDP1 تا DDP4 استخراج شد.

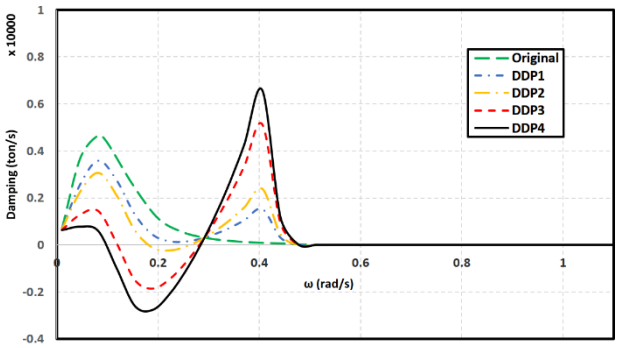
شکل ۱۵ نمودار جرم اضافی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش عرض ورق‌ها مقدار جرم اضافی به ازای فرکانس زاویه-ای بیشتر از ۰/۱۸ تا ۰/۲۴ رادیان بر ثانیه افزایش می‌یابد که این امر را می‌توان به دلیل به دام افتادن بیشتر آب در بین ورق‌ها دانست.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]



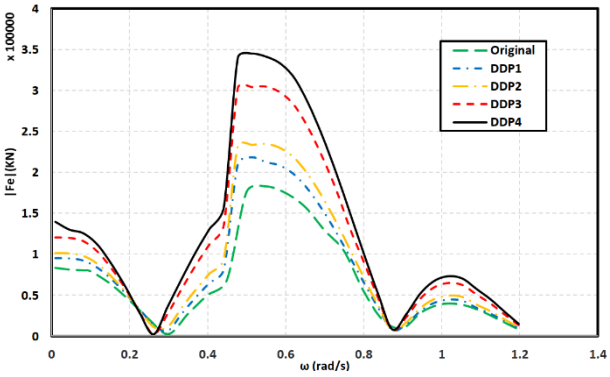
شکل ۱۵. جرم اضافی سکو برحسب فرکانس موج

شکل ۱۶ روند میرایی سکوی اصلاح شده با ورق را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش عرض، مقدار میرایی به ازای فرکانس‌های بیشتر از ۰/۳ رادیان بر ثانیه بیشتر می‌شود اما برای فرکانس‌های کمتر از ۰/۳ رادیان بر ثانیه روند میرایی متفاوتی است. همچنین مطابق با شکل فوق، وجود ورق‌های میراگر بر روی امواجی با فرکانس‌های کمتر از ۰/۵ ثانیه اثرگذار است.



شکل ۱۶. میرایی سکو برحسب فرکانس موج

در شکل ۱۷ نیروی تحریک موج وارد بر سکو نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش عرض، نیروی تحریک برای فرکانس بیشتر از ۰/۲ تا ۰/۳ رادیان بر ثانیه افزایش می‌یابد اما برای فرکانس‌های کمتر از این مقدار، افزایش عرض باعث کاهش نیروی تحریک خواهد شد. همچنین مشاهده می‌شود که نیروی تحریک موج روند نوسانی داشته و در بازه فرکانسی ۰/۲ تا ۰/۸۵ رادیان بر ثانیه پیک آن شکل می‌گیرد.

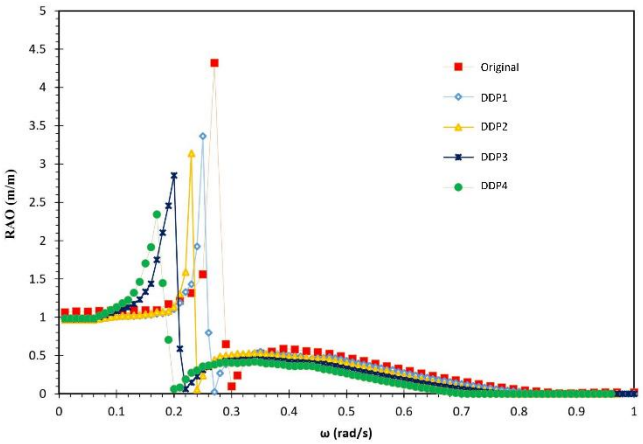


شکل ۱۷. نیروی تحریک موج وارد بر سکو برحسب فرکانس موج

ارزیابی سه پارامتر نشان می‌دهد وجود ورق‌های میراگر به دور پانتون‌ها در روند هیدرودینامیکی امواج با فرکانس‌های کمتر از۰/۵ رادیان بر ثانیه بیشترین اثرگذاری را دارد. از آنجایی که فرکانس سکوی نیمه مغروق بین ۰/۱۲ تا ۰/۳ رادیان بر ثانیه است لذا وجود این ورق‌ها می‌تواند در بهبود حرکت آن تاثیر گذار باشند.

۵-۲-۲. ارزیابی RAO هیو سکوی نیمه مغروق اصلاح شده

نمودار RAO هیو سکوی نیمه مغروق اصلاح‌شده به ازای ورق‌های میراگر دوبل با ابعاد مختلف برای حالات DDP1 تا DDP4 مطابق با شکل (۱۸) است. از مقایسه این نمودارها با حالت اولیه سکوی نیمه مغروق، مشاهده می‌شود که نصب ورق‌های میراگر نه‌تنها باعث کاهش مقدار ماکزیمم RAO می‌شود بلکه باعث جابجایی منحنی RAO به سمت فرکانس‌های موج کمتر می‌شود. همچنین در این نمودار دو تا پیک مشاهده می‌شود که پیک اول به دلیل نزدیک بودن فرکانس طبیعی سکو به فرکانس تحریک موج است اما پیک دوم به دلیل وجود پیک نیروی تحریک موج وارد بر سکو در بازه فرکانسی ۰/۲ تا ۰/۸۵ رادیان بر ثانیه (شکل ۱۷) می‌باشد.



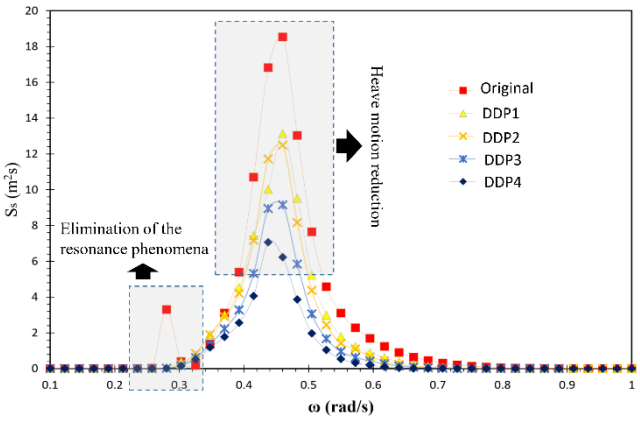
شکل ۱۸. مقایسه پاسخ حرکت هیو برحسب سرعت زاویه‌ای برای سکوی نیمه مغروق اصلاح‌شده با سکوی نیمه مغروق اولیه.

۵-۲-۳. ارزیابی پاسخ سکوی اصلاح شده تحت شرایط گوناگون موج

مهمترین بخش از شناسایی کارایی راهکار پیشنهاد شده برای بهبود حرکت هیو سکو، محاسبه پاسخ حرکتی آن است. برای محاسبه این پاسخ، بایستی طیف موج دریا وجود داشته باشد. برای این منظور، پاسخ سکوی اصلاح شده با DDP1 تا DDP4 تحت موجی با ارتفاع موج شاخص ۱۱/۹ متر و پریود پیک ۱۰/۵ ثانیه با طیف جانسواپ محاسبه شد. نمودار آنها مطابق شکل ۱۹ استخراج گردید. همانگونه که مشاهده می‌شود وجود ورق‌های میراگر با عرض نسبی ۱/۱ تا ۱/۶ میزان پاسخ سکو را کاهش می‌دهد. این ورق‌ها

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]

باعث حذف شدن پیک اول طیف پاسخ سکو شده و درنتیجه به طور موثری پدیده تشدید را کاهش داده‌اند.



شکل ۱۹. پاسخ سکو به ازای ارتفاع موج ۱۰/۵ متر و پریود ۱۶ ثانیه

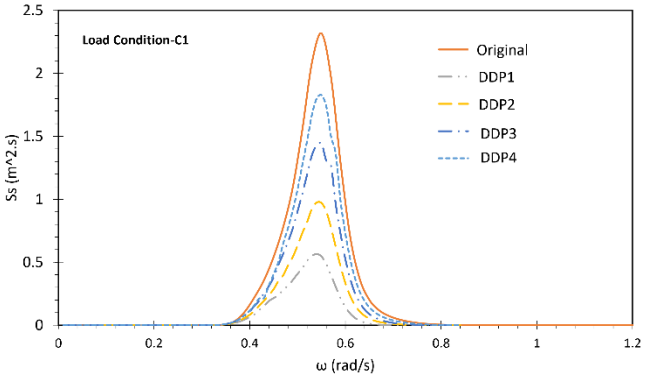
قاعدتا به ازای شرایط مختلف امواج دریا، پاسخ سکو متفاوت خواهد شد. لذا به منظور حساسیت سنجی پاسخ هیو سکوی نیمه مغروق اصلاح شده تحت امواج گوناگون دریا، مطابق با جدول ۵، شش حالت گوناگون امواج در نظر گرفته شد. از طیف جانسواب برای حل مسئله استفاده شد. نمودار پاسخ سکوی اصلاح شده برای هر یک از ۶ حالت به صورت اشکال ۲۰ تا ۲۵ ترسیم شد. سپس درصد بهبود پاسخ سکو با کمک معادله (۲۷) محاسبه شد که در شکل ۲۶ نشان داده شده است.

$$\Re = \frac{\hbar_{SSP} - \hbar_{MSSP}}{\hbar_{SSP}} \times 100 \qquad (۲۷)$$

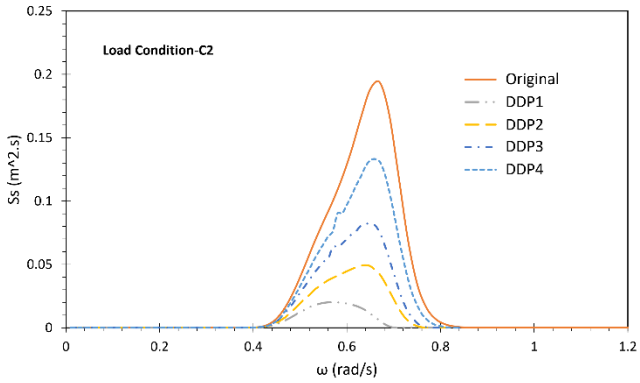
در این معادله، $\hbar_{SSP}$ پاسخ حرکت هیو سکوی متداول، $\hbar_{MSSP}$ پاسخ حرکت هیو سکوی اصلاح شده با ورق‌های میراگر است.

جدول ۵. شرایط گوناگون امواج دریا[۲۱]

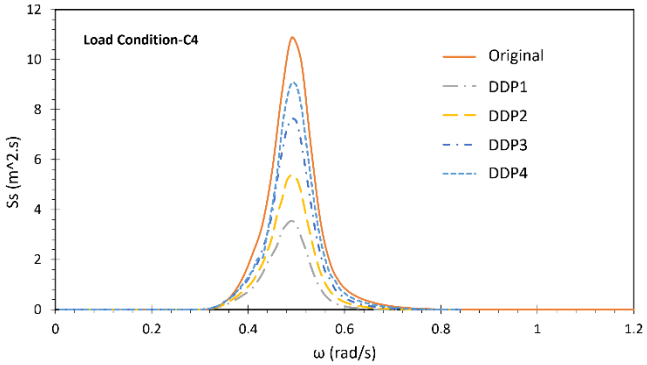
نام گذاری	شرایط موج	H_s (m)	T_p (s)
C1	شرایط عملیاتی در دریای جنوب چین	۶	۱۱/۲
C2	شرایط عملیاتی در خلیج مکزیک	۳/۹۶	۹
C3	موج ۱۰ ساله جنوب دریای چین	۱۱/۱	۱۳/۶
C4	موج ۱۰ ساله از شمال شرقی فلات قاره استرالیا	۱۰	۱۲/۵۰
C5	موج ۱۰۰ ساله از دریای چین	۱۳/۳۰	۱۵/۵
C6	موج ۱۰۰ ساله خلیج مکزیک	۱۲/۲	۱۴



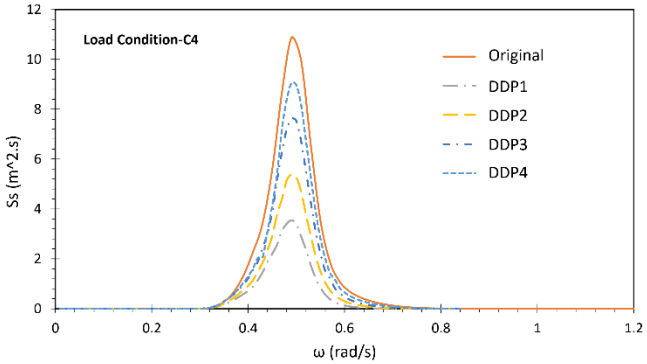
شکل ۲۰. پاسخ سکوی اصلاح شده با شرایط موج C1



شکل ۲۱. پاسخ سکوی اصلاح شده با شرایط موج C2

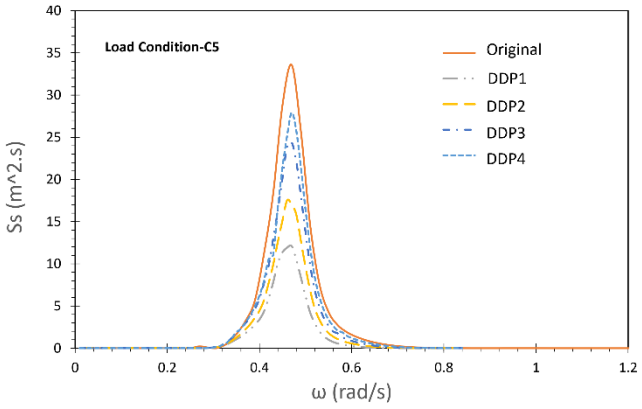


شکل ۲۲. پاسخ سکوی اصلاح شده با شرایط موج C3

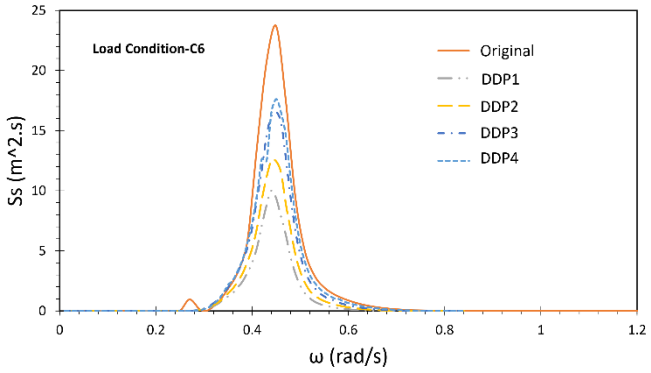


شکل ۲۳. پاسخ سکوی اصلاح شده با شرایط موج C4

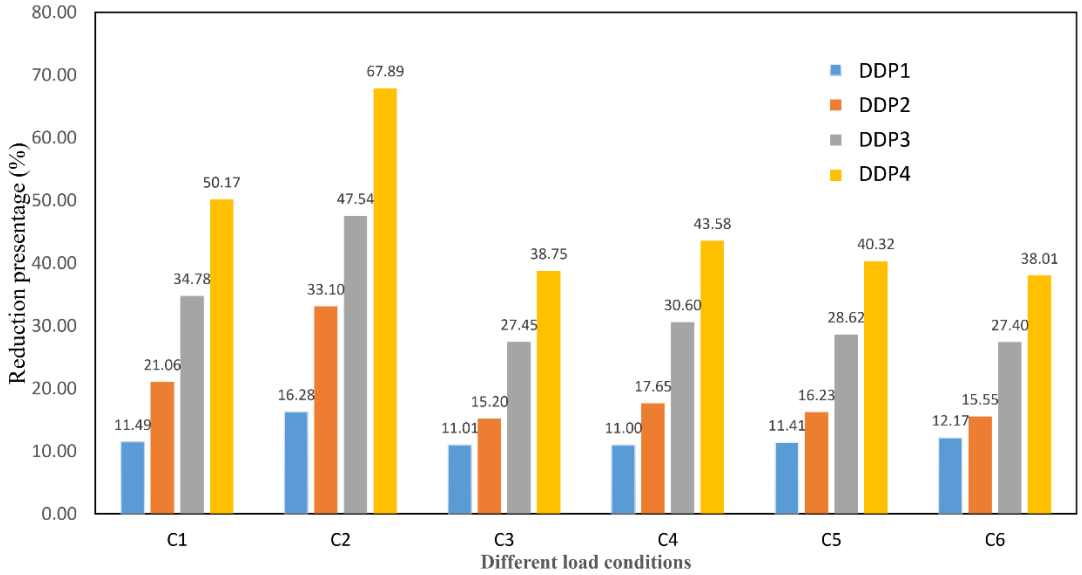
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]



شکل ۲۴. پاسخ سکوی اصلاح شده با شرایط موج C5



شکل ۲۵. پاسخ سکوی اصلاح شده با شرایط موج C6



شکل ۲۶. درصد بهبود پاسخ سکوی نیمه مغروق اصلاح شده با ورقهای میراگر

همانگونه که از شکل (۲۶) مشاهده می‌شود وجود ورق‌های میراگر پاسخ سکو را تحت شرایط مختلف امواج دریا بهبود داده است. همچنین مشاهده می‌شود که برای حداقل عرض نسبی ۱/۱ پاسخ حرکت هیو سکوی نیمه مغروق اصلاح شده بیشتر از ۱۱ درصد بهبود یافته است. هرچقدر عرض ورق افزایش می‌یابد درصد بهبود افزایش خواهد یافت.

۶- جمع بندی

یکی از پرکاربردترین سکوهای شناور برای تولید، اکتشاف و بهره برداری نفت و گاز در آب عمیق سکوهای نیمه مغروق هستند. اما حرکت زیاد هیو این نوع سکوها اغلب عملیات حفاری را محدود کرده و ممکن است باعث خرابی رایزرها و یا سیستم مهاری شود. در این مقاله، به منظور بهبود کارایی حرکت هیو از ورق‌های میراگر استفاده شد. این ورق‌ها در بالا و پایین پانتون به صورت سراسری نصب گردید. با استفاده از حل تحلیلی و بر پایه تئوری تفرق، پاسخ سکوی نیمه مغروق اصلاح شده محاسبه شد. نتایج نشان داد که:

- نصب ورق‌های سرتاسری به دور پانتون‌ها به دلیل افزایش جرم و افزایش میرایی؛ منجر به کاهش بیشتر پاسخ هیو در مقایسه با ورق‌های نصب شده در چهارگوشه سکوی نیمه مغروق (مرجع ۲۷) می‌شود.
- وجود ورق‌های میراگر باعث می‌شود فرکانس طبیعی نوسان هیو سکو فاصله بیشتری را از فرکانس موج تحریک پیدا کند و در نتیجه پدیده تشدید کاهش می‌یابد.
- بیشترین تاثیر ورق‌های میراگر روی فرکانس‌های موج کمتر از ۰/۵ رادیان بر ثانیه مشاهده شد. از آنجایی که فرکانس سکوی نیمه مغروق بین ۰/۱۲ تا ۰/۳ رادیان بر ثانیه است، وجود این ورق‌ها می‌تواند در بهبود حرکت هیو آن تاثیر گذار باشد.
- استفاده از دو ورق میراگر به جای یک ورق به دور پانتون-ها به دلیل به دام افتادن بیشتر جرم اضافی، باعث کاهش بیشتر پاسخ سکو می‌شوند.
- هرچقدر عرض ورق افزایش یابد، میرایی و جرم اضافی بیشتر شده و کاهش بیشتری برای پاسخ هیو سکوی نیمه مغروق مشاهده می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]

- نصب ورق‌های میراگر حتی با عرض نسبی ۱/۱ تحت شرایط گوناگون امواج دریا پاسخ حرکت هیو سکو را بیشتر از ۱۱ درصد بهبود می‌دهد.
- نصب ورق‌ها به دور پانتون‌ها باعث تغییر قابل ملاحظه در وزن سکو نمی‌شود (جدول ۴) لذا می‌توان این راهکار را اقتصادی و کم هزینه دانست.
- ورق‌های میراگر را می‌توان حتی بر روی سکوهایی که به مرحله اجرا رسیده‌اند نصب کرد.

اگرچه در این مطالعه سعی بر این شد که به طور کامل به مسئله حرکت هیو سکو با نصب ورق میراگر به پانتون‌ها پرداخته شود اما پیشنهاداتی برای ادامه این کار مطرح است از جمله:

- همانگونه که مشاهده شد افزایش عرض ورق باعث بهبود پاسخ حرکت هیو خواهد شد اما این مسئله بایستی به لحاظ سازه‌ای و ایجاد پدیده‌هایی مانند کمانش و خستگی کنترل شود و محدودیت اجرایی آن بایستی در نظر گرفته شود.
- بررسی آزمایشگاهی و صحت سنجی نتایج با داده‌هایی ازمایشگاهی قطعا ضروری است. لذا پیشنهاد می‌شود این راهکار بر روی مدل آزمایشگاهی سکوی نیمه مغروق ایران امیرکبیر نصب شود و رفتار هیدرودینامیکی آن مورد ارزیابی قرار گیرد.

۶- مراجع

1. Yubenraj, R., (2015), *A Review Study of Oil and Gas Production Facility for Semi-Submersible Platform.*
2. https://www.infield.com/rigs/semisub-rigs.
3. Patel, M.H., (2013), *Dynamics of offshore structures*. Butterworth-Heinemann.
4. https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/id/339234/.
5. Dahan, P., S. Withee, T. Akaboshi, T. Sanomura, and A. Joensuu. (1985), *Inclined column semisubmersible design*. in *Offshore Technology Conference*. OnePetro.
6. Nishimoto, K. and A.J. Leite. (1993), *Effect of lateral keel and blisters on semisubmersibles for the minimization of heave motion*. in *The Third International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro.
7. Williams, N., S. Leverette, S. Bian, S. Large, and P. Cao. (2010), *FourStar™ Dry-Tree Semisubmersible Development*. in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*..
8. Xu, Q. (2011), *A new semisubmersible design for improved heave motion, vortex-induced motion and quayside stability*. in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*..
9. Zou, J. (2012), *Dry Tree Paired-Column Semisubmersible Platform for Ultra-Deepwater Offshore Brazil*. in *SNAME 17th Offshore Symposium*. OnePetro.
10. Noce, R. and I. Husem. (2013), *A Robust and Flexible Dry Tree Semisubmersible Drilling and Production Platform*. in *Offshore Technology Conference*. OnePetro.
11. Wang, S., Y. Cao, Q. Fu, and H. Li, (2015), *Hydrodynamic performance of a novel semi-submersible platform with nonsymmetrical pontoons.* Ocean Engineering. **110**: p. 106-115.
12. Chen, C.-Y., X. Mei, and T. Mills. (2007), *Effect of heave plate on semisubmersible response*. in *The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro.
13. Rijken, O.R., (2017), *Semisubmersible with five-sided columns*. Google Patents.
14. Ye, W., A. Ran, J. Li, G. Li, X. Tang, Z. Wang, and H. Wu. (2017), *A Viable Dry Tree Semi-Submersible Concept with Tapered Columns*. in *SNAME 22nd Offshore Symposium*. OnePetro.
15. Li, D., W. Lu, X. Li, X. Guo, J. Li, and W. Duan, (2020), *Second-order resonant motions of a deep-draft semi-submersible under extreme irregular wave excitation.* Ocean Engineering. **209**: p. 107496.
16. Halkyard, J., J. Chao, P. Abbott, J. Dagleish, H. Banon, and K. Thiagarajan. (2002), *A deep draft semisubmersible with a retractable heave plate*. in *Offshore technology conference*. OnePetro.
17. Murray, J., A. Tahar, and C.K. Yang. (2007), *Hydrodynamics of dry tree semisubmersibles*. in *The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro.
18. Hussain, A., E. Nah, R. Fu, and A. Gupta. (2009), *Motion comparison between a conventional deep draft semi-submersible and a dry tree semi-submersible*. in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.
19. Mansour, A.M. (2009), *FHS semi: A semisubmersible design for dry tree applications*. in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.
20. Liu, K., H. Liang, and J. Ou, (2016), *Numerical investigation of a tuned heave plate energy-harvesting system of a semi-submersible platform.* Energies. **9**(2): p. 82.
21. Ma, R., K. Bi, and H. Hao, (2018), *Mitigation of heave response of semi-submersible platform (SSP) using tuned heave plate inerter (THPI).* Engineering Structures. **177**: p. 357-373.
22. Ma, R., K. Bi, and H. Hao, (2020), *Heave motion mitigation of semi-submersible platform using inerter-based vibration isolation system (IVIS).* Engineering Structures. **219**: p. 110833.
23. Mansour, A., C. Wu, and B. Greiner. (2010), *New Semisubmersible Design with Damper Chamber Columns–A Cost Effective Solution for Dry and Wet Tree Applications*. in *Deep Offshore Technology Conference (DOT), Houston, Texas, USA*.
24. Mansour, A.M., L. Upston, and Y. Wan. (2011), *Dry and wet tree damper chamber column*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]

semisubmersible design in harsh environment. in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.

25. Zou, J. (2017), *Conceptual Study of a Paired-column Semi-submersible Platform for a 1.5 MTPA FLNG*. in *SNAME 22nd Offshore Symposium*. OnePetro.
26. Emami, A. and A.R.M. Gharabaghi, (2020), *Application of poroelastic layers in a semi-submersible platform: Devising an efficient heave motion response reduction method.* Ocean engineering. **201**: p. 107148.
27. Liapis, S., Y. Li, H. Lu, and T. Peng, (2016), *"Bigfoot" direct vertical access semisubmersible model tests and comparison with numerical predictions.* Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. **138**(5).
28. Linton, C.M. and P. McIver, (2001), *Handbook of mathematical techniques for wave/structure interactions*. Chapman and Hall/CRC.
29. Koh, H.-J. and I.-H. Cho, (2016), *Heave motion response of a circular cylinder with the dual damping plates.* Ocean Engineering. **125**: p. 95-102.
30. Clauss, G.n.F., C. Schmittner, and K. Stutz. (2002), *Time-domain investigation of a semisubmersible in rogue waves*. in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.6.0]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.62]