



نوع مقاله (مقاله پژوهشی)

آنالیز عددی عملکرد ریگ های فراساحلی اسپار بر اثر جریان های گردابی

سجاد جوکاری^۱؛ آرمین حسینیان^{۲*}؛ علی اسفندیاری بیات^۱

۱- گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت، شیمی و پلیمر، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/ggj.2026.579483.1262

واژگان کلیدی	چکیده
ریگ های فراساحلی، ریگ اسپار، عوامل محیطی، اثر گردابی، نیروهای بالابری و درگ، طوقه های مارپیچ	از بین ریگ های فراساحلی، ریگ های اسپار بعنوان یکی از بزرگترین سازه های مهندسی ساخته شده در صنعت حفاری است که در طول چند دهه گذشته برای حفاری و بهره برداری از میادین نفت و گاز استفاده شده اند. یکی از مشکلات استفاده از ریگ های اسپار، اعمال اثر گردابی توسط محیط اطراف می باشد. طوقه های مارپیچ نصب شده بر روی بدنه اینگونه ریگ ها، وظیفه کنترل اثرات گردابی را بر عهده دارند. پژوهش انجام شده، به تحلیل پدیده اثر گردابی و نیروهای ناشی از امواج جریان محیطی (نیروهای بالابری و کششی) بر روی ریگ دریایی اسپار با استفاده از روش عددی پرداخته است. جهت انجام شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در شرایط جریانی آرام و بدون در نظر گرفتن ارتعاشات و نوسانات در اطراف ریگ اسپار در نظر گرفته شده است. شبیه سازی انجام شده با استفاده از نرم افزار STAR-CCM+ جهت آنالیز اثر گردابی اطراف ریگ اسپار با فرض وجود و یا عدم وجود طوقه های مارپیچ انجام شده است. براساس نتایج حاصله از شبیه سازی عددی، طراحی موثر طوقه های مارپیچ می تواند تاثیر به سزایی در جلوگیری از اثر گردابی و برخورد مستقیم امواج به بدنه ریگ داشته باشند. همچنین، سرعت آب در مقادیر ۰/۵، ۰/۷۵، ۱/۰۰، ۱/۲۵ و ۱/۵ متر بر ثانیه و اعماق ۱/۷ و ۲/۷ متری می تواند تاثیرات به سزایی در اعمال نیروهای بالابری و کششی در حضور و یا عدم حضور طوقه های مارپیچی ایفا نماید.

۱. پیش گفتار

ساحلی آنالیز تحلیل عوامل مکانیکی (مانند تنش ها) و عوامل محیطی (مانند باد، موج و اثر گردابی) که بر این نوع ریگ ها تاثیر بیشتری دارند مستلزم مطالعات دقیق تر می باشد. چرا که پدیده گردابی می تواند باعث ایجاد خمیدگی و نهایتاً فرو ریختگی پایه ریگ های اسپار گردد. از این رو طراحی مناسب

از آنجاییکه ریگ های اسپار^۱ نسبت به سایر ریگ های فراساحلی دارای مقاومت بهتری جهت رفع موانع محیطی مانند موج و باد می باشند، پدیده گردابی به عنوان یک عامل محیطی در محیط آبی می تواند بر روی عملکرد ریگ های اسپار تاثیر بیشتری بگذارد. جهت طراحی ریگ های فرا

¹ Spar: Single Point Anchor Reservoir

طوقه های مارپیچ ها باعث می شود که اثر پدیده گردابی به میزان قابل توجهی کاهش یابد. بنابراین در این پژوهش با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی مهم مربوط به ریگ های اسپار و ایجاد ارتباط ما بین پدیده گردابی و اینگونه پارامتر ها می توان این امر را به انجام رساند. از جمله اهداف پژوهش حاضر، تعیین میزان اثرگذاری گردابی بر روی طراحی ریگ های اسپار و نحوه عملکرد ریگ های اسپار در هنگام ایجاد اثر گردابی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۲ (CFD) می باشد. در این پژوهش پارامترهای موثر هندسی، مکانیکی و محیطی مرتبط با طراحی سازه های اسپار مورد آنالیز و تحلیل قرار می گیرد. سپس این پارامتر ها توسط نرم افزارهای تحلیلی نظیر نرم افزار STAR-CCM+ جهت میزان اثرگذاری هر یک، مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در این میان به اثر پدیده گردابی به صورت خاص و با جزییات کامل پرداخته شده است. براساس پیشینه پژوهشی، می توان بیان کرد که اثر گردابی بر روی سازه های دریایی و خصوصاً ریگ های اسپار ضمن ایجاد ارتعاش، تاثیرگذاری و اثربخشی، نیز بسیار حائز اهمیت است. در ادامه این پژوهش با جزییات بیشتر به بررسی و تحلیل اثر گردابی برای چگونگی راه های کنترل و به حداقل رساندن اثر آن بر روی ریگ های اسپار پرداخته خواهد شد.

ریگ های دریایی اسپار به عنوان سازه های عظیم ستونی شکلی شناخته می شوند که یک سازه استوانه ای شکل با ابعاد عظیم به عنوان پایه کل ریگ طراحی و ساخته می شود. سطح عرشه اینگونه از ریگ ها، به طور معمول دارای یک سکوی ثابت می باشد که تجهیزات عملیات حفاری را پشتیبانی می نمایند و وزنی تقریباً معادل ۲۰ تا ۳۵ هزار تن را دارا می باشند (شکل ۱).

قسمت عمده تاسیسات اینگونه از ریگ ها که همانند یک کوه یخی در زیر سطح آب قرار دارد توسط طوقه های مارپیچ که بر روی بدنه پایه ریگ های اسپار نصب می شوند حمایت می گردند. طوقه های مارپیچ تاثیر به سزایی جهت به حداقل رساندن اثر گردابی بر روی ریگ های اسپار در محیط فرا ساحلی که جریانهای آبی شدیدی را تجربه

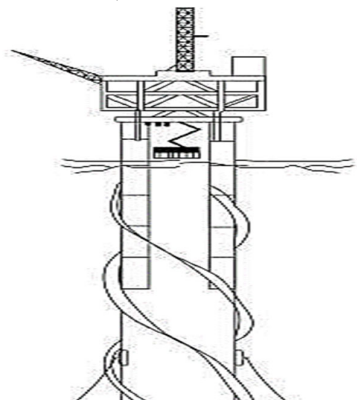
می کنند، دارا هستند [۱]. همچنین، افزودن و یا حذف این نوع از تجهیزات جانبی هندسی خارجی، تاثیر قابل توجهی در ارتعاش ناشی از اثر گردابی خواهند داشت [۲]. این امر در حالی است که توانایی طوقه های مارپیچ مربوط به کنترل موثرتر حرکت ناشی از اثر گردابی تاثیر گذار بر سازه ریگ اسپار در آب های عمیق می باشد [۳]. در این میان، یکی از نکات قابل توجه در طراحی ریگ های اسپار، آبخور عمیق اینگونه ریگ ها می باشد که حتی در صورت فعالیت در بدترین شرایط آب و هوایی کمتر تحت تاثیر باد، موج و جریان ها قرار گیرد. چنین ویژگی موثری، می تواند فعالیت بروی عرشه فوقانی و تجهیزات حفاری موجود بر روی آن را تسهیل نماید. به همین جهت، بدنه استوانه ای شکل این ریگ ها، همچون یک عامل حفاظتی در هنگام به کارگیری رایزرها و تجهیزات عمل کرده و ریگ های شناور ستونی را به صورت گزینه ای ایده آل برای توسعه بهره برداری از میداین واقع در آب های عمیق تبدیل می نماید. این امر در حالی است که بر خلاف سکوهایی انطباقی^۳ که پایه آنها به بستر دریا متصل می باشد، بدنه استوانه ای شکل ریگ های اسپار تا بستر دریا امتداد نمی یابد، بلکه بوسیله کابل های تحت کشش به بستر دریا متصل می گردند [۴]. عملاً، یک ریگ اسپار همانند یک سکو با مهار کششی^۴ به کف دریا مهار می شود ولی با این تفاوت که در سکوهایی با مهار کششی کابل های مهار به صورت کاملاً عمودی به بستر دریا متصل شده اند [۵]. در حالی که اسپارها به شیوه معمولی در بستر دریا مهار می شوند. یکی از خصوصیات ریگ های اسپار حضور طوقه های مارپیچی می باشند که اینگونه قطعات ارتعاشات ناشی از اثر گردابی را به شدت کاهش می دهند و باعث می شوند بدنه استوانه ای شکل اینگونه ریگ ها تقریباً هیچگونه لرزشی نداشته باشند [۶]. این مهم باعث گردیده تا این ریگ ها از ریگ های با پایه و مهار کششی با ثبات تر باشند [۷]. بنابراین می توان بیان داشت که هر چه ارتفاع طوقه های مارپیچی بیشتر شود، کنترل ارتعاش ناشی از اثر گردابی یک استوانه انعطاف پذیر تر و موثرتر خواهند بود [۸]. ریگ های اسپار برخلاف ریگ های سکو با مهار

⁴ Tension Leg Platforms, TLP

² Computational Fluid Dynamics, CFD

³ Compliant Towers

آبی [۱۴]، در پژوهش پیش رو از روشهای عددی مبتنی بر نرم افزار پیشرفته شبیه سازی بهره گرفته شده است. با استفاده از آزمایش ها و شبیه سازی عددی و با روش دینامیک سیالات محاسباتی قابل آنالیز و تحلیل می باشد [۱۵]. اسپارها که به طور گسترده در صنایع نفت و گاز و همچنین انرژی بادی فرا ساحلی استفاده می شوند، به دلیل طراحی استوانه ای خود، به شدت مستعد تأثیر گردابه های ناشی از جریان هستند. جریان های ناپایدار در پشت اسپارها نه تنها موجب افزایش نیروهای هیدرودینامیکی مانند نیروی بالابری و نیروی کششی می شوند، بلکه می توانند پایداری سازه را نیز تحت تأثیر قرار دهند. این پژوهش با هدف بررسی نیروهای بالابری^۸ و کششی^۹ و تحلیل اثر گردابه های ناشی از جریان در اطراف ریگ های اسپار طراحی شده است. در این پژوهش، از شبیه سازی های CFD برای مدل سازی دقیق جریان و بررسی اثرات نیروهای دینامیکی و حرکت ناشی از ارتعاش ریگ اسپار، با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن طوفه های مارپیچی استفاده گردیده است. نتایج این پژوهش می تواند به بهبود طراحی و عملکرد اینگونه از سازه های فرا ساحلی کمک های شایانی ارائه داده و درک عمیق تری از رفتار جریان های دریایی اطراف سازه های ثابت را فراهم آورد.



شکل ۱. نمای کلی ریگ اسپار با طوفه مارپیچی

کششی که در آنها از کابل های فولادی برای حفظ تعادل سازه از یک وزنه تعادل بزرگ در قسمت پایینی سازه استفاده میگردد برای حفظ تعادل و تثبیت حالت عمودی، نیازی به کابل های فولادی ندارند. دلیل این امر در طراحی منحصر به فرد ریگ اسپار خلاصه می شود که در آنها، سیستم لنگرهای مورد استفاده براساس ارتعاش ناشی از اثر گردابی به دلیل پایین بودن مرکز شناور، در پایین مرکز تعادل شناوری قرار دارند [۹]. اگرچه اسپارها ویژگی های حرکتی عالی در امواج دارند، اما مستعد حرکات القایی گردابی^۵ هستند [۱۰]. این امر باعث می گردد که در صورت بریدگی کابل ها، به دلیل شکل خاص طراحی سکوها اسپار، امکان واژگون شدن و بر هم خوردن تعادل آن فراهم نگردد. همچنین، از نقطه نظر فرایند جابجایی و انتقال یک سکوی اسپار بعد از ساخت آن این نکته حائز اهمیت می باشد که به علت وجود طول زیاد اینگونه سازه های عظیم در مقابل عرض کم آنها، این نوع از ریگ ها را نمی توان به صورت قائم جابجا کرد. به همین علت، اسپارها را به حالت افقی توسط شناور از نقطه ای به نقطه دیگر جابجا می کنند. به همین جهت، عرشه بالایی و تجهیزات حفاری و استخراج را از مجموعه اسپار جدا کرده و بعد از نصب آن در محل مناسب بر روی اسپار سوار می کنند. باتوجه به تنوع طراحی ریگ های اسپار، ریگهای با صفحه بالابر^۶ دارای خصوصیات متفاوتی نسبت به نوع کلاسیک اینگونه می باشد [۱۱]. در حال حاضر ریگ های اسپار کاربردهای وسیعی در میادین آبی عمیق و فوق عمیق در خلیج مکزیک دارند. به نحوی که از سال ۱۹۹۶ تاکنون هشت ریگ اسپار در خلیج مکزیک نصب گردیده و پنج ریگ اسپار دیگر نیز در مرحله طراحی و ساخت می باشند [۱۲]. در مجموع می توان بیان داشت که ریگ های اسپار تنها راهکار موفق دارای تجهیزات سرچاهی خشک^۷ برای تولید در آب های عمیق ارزیابی می گردند که می توانند در عمیق ترین میادین و سخت ترین شرایط محیطی عملکردی موفق داشته باشند [۱۳]. با توجه به ضرورت استفاده از روش های عددی جهت آنالیز هیدرودینامیک ریگ های فرا ساحلی فعال در محیط های

⁸ Lift Forces

⁹ Drag Forces

⁵ Vortex- Induced Motions ,VIM

⁶ Heave Plates

⁷ Dry Tree

۲. تحلیل و آنالیزهای انجام شده جهت بررسی پارامترهای موثر و محیطی بر روی ریگ های اسپار

مسلماً با توجه به محیط پیچیده آبی و دریا، پدیده گردابه های ناشی از جریان سیال^{۱۰} یکی از مسائل چالش برانگیز در مهندسی اقیانوس و طراحی سازه های دریایی به شمار می رود [۱۶]. این پدیده زمانی رخ می دهد که جریان سیال از روی یک جسم غوطه ور عبور کرده و گردابه هایی در نواحی پشت جسم تشکیل می شود و با نزدیک شدن فرکانس ریزش گرداب به فرکانس طبیعی سازه ریگ اسپار، دامنه های نوسانات سازه زیاد می شود [۱۷]. این گردابه ها به نوبه خود باعث ایجاد نیروهای متناوبی بر سطح هرگونه سازه ای می شوند که ممکن است موجب ارتعاشات شدید یا حتی خستگی و خرابی سازه را فراهم آورند. چنین ارتعاشات متناوبی که به ارتعاشات ناشی از گردابه نیز شناخته می شوند می توانند اثرات بلند مدتی بر عملکرد سازه داشته باشند. ارتعاشات ناشی از گردابه یک پدیده برهمکنش سیال-سازه می باشد که زمانی رخ می دهد که ارتعاش سازه توسط نیروهای گردابه های خارج شده از سازه ناشی شود. این پدیده با استفاده از آزمایش ها و شبیه سازی عددی و با روش دینامیک سیالات محاسباتی قابل آنالیز و تحلیل می باشد. اسپارها که به طور گسترده در صنایع نفت و گاز و همچنین انرژی بادی فرا ساحلی استفاده می شوند، به دلیل طراحی استوانه ای خود، به شدت مستعد تأثیر گردابه های ناشی از جریان هستند. جریانهای ناپایدار در پشت اسپارها نه تنها موجب افزایش نیروهای هیدرودینامیکی مانند نیروی بالا بری و نیروی کششی می شوند، بلکه می توانند پایداری سازه را نیز تحت تأثیر قرار دهند. این پژوهش با هدف بررسی نیروهای بالابری و کششی و تحلیل اثر گردابه های ناشی از جریان در اطراف ریگ های اسپار طراحی شده است. در این پژوهش، از شبیه سازی های CFD برای مدل سازی دقیق جریان و بررسی اثرات نیروهای دینامیکی و حرکت ناشی از ارتعاش ریگ اسپار، با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن طوقه های مارپیچی استفاده گردیده است. نتایج این پژوهش

می تواند به بهبود طراحی و عملکرد اینگونه از سازه های فرا ساحلی کمک های شایانی ارائه داده و درک عمیق تری از رفتار جریان های دریایی اطراف سازه های ثابت را فراهم آورد.

۳. روش شناسی

جهت تحلیل و آنالیز دقیق تأثیر گردابه های ناشی از جریان بر روی ریگ های اسپار، شبیه سازی اینگونه عوامل محیطی با استفاده از نرم افزار STAR-CCM+ در این تحقیق به انجام رسیده است. نرم افزار STAR-CCM+ یکی از ابزارهای پیشرفته در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می باشد که امکان تحلیل جریان های ناپایدار و بررسی دقیق نیروهای هیدرودینامیکی را فراهم می آورد. شبیه سازی های انجام شده در این پژوهش، با استفاده از روش حجم سیال^{۱۱} جهت مدل سازی جریان دو فازی استفاده شده است. روش محاسباتی مذکور قادر است که رفتار جریان سیال و سطح مشترک آن را با دقت بالایی شبیه سازی کند. روش حجم سیال بر اساس مفهوم یک تابع کسر حجمی تعریف میگردد. از آنجا که در حالت کلی کمیت های توصیف کننده حرکت اجسام، به دو دسته بردار^{۱۲} و اسکالر^{۱۳} قرار داده می شوند، در این تحقیق تابع اسکالر به عنوان مقادیری که تنها توسط یک اندازه، قابل توصیف می باشند جهت فرآیند شبیه سازی در نظر گرفته شده است. تابع اسکالر تعریف شده در این پژوهش، به صورت انتگرال تابع مشخصه یک سیال در حجم کنترل تعریف شده است که معادل حجم یک سلول در شبکه محاسباتی می باشد. جهت انجام شبیه سازی مطروحه، حالت های مرزی و شرایط خاصی در نظر گرفته شده است که در ادامه تشریح خواهند شد.

۴. حالت های مرزی در شبیه سازی CFD

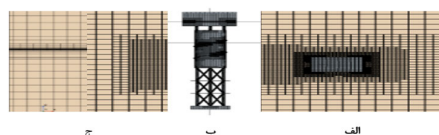
در شبیه سازی های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، تعیین حالت و شرایط مرزی مناسب برای تعریف رفتار جریان در مرزهای دامنه محاسباتی امری ضروری می باشد. در این تحقیق، اجرای مش بندی دقیق با توجه به شرایط مرزی نمایش داده شده در شکل ۲ و مطابق با جدول ۱ و براساس استفاده

¹² Vector

¹³ Scalar

¹⁰ Vortex-Induced Motion, VIM

¹¹ Volume of Fluid, VOF



شکل ۳. مش بندی هندسه و دامنه شبیه سازی در نرم افزار STAR CCM+ (الف) مش بندی ریگ اسپار (ب) نمای بالای دامنه شبیه سازی و اسپار (ج) نمای بغل دامنه شبیه سازی و ریگ اسپار

۶. آنالیز محاسباتی اثرات گردابی آب بر روی ریگ های فراساحلی

از آنجایی که در مجموع اثر گردابی وابسته به نیروهای بالابری و کششی می باشد، هریک از پارامترهای مذکور، باتوجه به فرمول های ۲ (مربوط به نیروی بالابری) و فرمول ۳ (مربوط به نیروی کششی) بر حسب نیوتون، جهت انجام شبیه سازی در نظر گرفته شده اند [۱۹]. همچنین، نتیجه آنالیز و تحلیل نتایج شبیه سازی های انجام شده در ادامه تشریح خواهند شد.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho V^2 C_L A \quad (2)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A \quad (3)$$

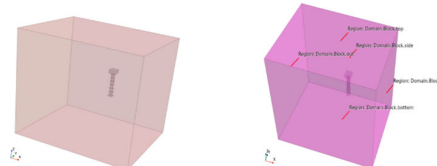
که در فرمول های ۲ و ۳، C_D ضریب کششی، C_L ضریب بالابری، A سطح مقطع (m^2)، ρ دانسیته (m^3/s) می باشد. براساس فرمول های مذکور، یکی از پارامترهای حائز اهمیت، سطح و سرعت سیال می باشند. اینگونه پارامترها، در مورد سکوهای فراساحلی که توسط آب احاطه شده اند می توانند نقش تاثیرگذاری مهمی در پایداری اینگونه از سازه های عظیم داشته باشند.

۷. شبیه سازی تاثیر حرکت گردابی بر روی

ریگ اسپار

جهت طراحی بهینه و بررسی اثر گردابی بر روی ریگ های اسپار، داده های دقیق از سرعت جریان آب، ارتفاع و جهت امواج، فرکانس طبیعی سازه، ارتعاشات ایجاد شده و نیروهای هیدرودینامیکی (بالابری و درگ) مورد نیاز می باشد. همچنین استفاده از شبیه سازی های عددی و تست های آزمایشگاهی برای تحلیل دقیق نیروها و بهینه سازی طراحی ضروری به نظر می رسد. هرچند در پژوهش حاضر، تست های آزمایشگاهی انجام نشده است. در مجموع، آنالیز نیروهای

از تحقیقات معتبر گذشته [۲]، به علاوه حساسیت سنجی تعداد مش ها جهت اطمینان از دقت محاسبات عددی صورت گرفته، نیز به انجام رسیده است.



شکل ۲. دامنه و حالت های مرزی شبیه سازی اعمال شده جدول ۱. شرایط مرزی در دامنه شبیه سازی

ردیف	نام وجه	شرایط مرزی
۱	دامنه پایین (کف) بلوک	ورودی سرعت
۲	دامنه داخلی بلوک	ورودی سرعت
۳	دامنه بالای بلوک	ورودی سرعت
۴	دامنه بغل بلو	ورودی سرعت
۵	دامنه خارجی بلوک	خروجی فشار

بنابراین، شرط مرزی ایجاد شده، جهت تعیین مقدار و جهت سرعت سیال در ورودی دامنه محاسباتی استفاده گردیده است. بازه سرعت های ورودی مورد استفاده در شبیه سازی با توجه به مقادیر تایید شده در تحقیقات گذشته در بازه های ۰/۵۰، ۰/۷۵، ۱/۰۰، ۱/۲۵ و ۱/۵۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده اند [۱۸].

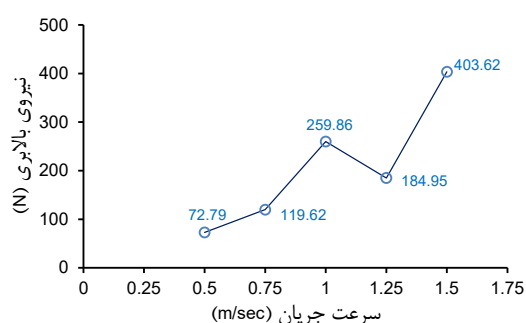
۵. جزییات مش بندی جهت شبیه سازی

عددی

برای اطمینان از دقت شبیه سازی، مش بندی با دقت بالا تعداد ۱/۲ میلیون سلول جهت پوشش کامل مدل استاتیکی ریگ اسپار مورد استفاده قرار گرفته است. مش بندی صورت گرفته به صورت غیر یکنواخت و مربعی طراحی شده است، تا امکان شبیه سازی جریان های پیچیده در نزدیکی دیواره اسپار و نواحی گردابه ای را فراهم آورده شود (شکل ۳). همچنین، در تعیین شرایط مرزی ورودی و خروجی جریان سیال آرام در نظر گرفته شده است.



شکل ۴. هندسه بخش بدنه استوانه ریگ اسپار با طوقه مارپیچ



شکل ۵. تغییرات نیروی بالابری بخش بدنه استوانه ای اسپار بر حسب سرعت های مختلف جریان

نیروی کششی به عنوان نیروی مقاومت جریان بر سطح استوانه ای اسپار بررسی می شود. این نیرو به موازات جریان عمل کرده و از عوامل کلیدی در طراحی هیدرودینامیکی سازه ها به شمار می آید. تحلیل تغییرات نیروی کششی در سرعت های مختلف جریان به درک اثر طراحی استوانه ای بر کاهش مقاومت و افزایش پایداری سازه کمک می کند. بر اساس شکل ۶، نیروی کششی با افزایش سرعت جریان تقریباً به صورت غیرخطی افزایش یافته است. افزایش ناگهانی نیروی کششی در سرعت های بالاتر (۱/۲۵ و ۱/۵ متر بر ثانیه) نشان دهنده آن است که مقاومت سازه در برابر جریان به طور قابل ملاحظه ای بیشتر می شود. همچنین می توان بیان داشت که بر خلاف تاثیر نیروی بالابری، تغییرات محسوسی در سرعت ۱/۰۰ متر بر ثانیه در مورد نیروهای کششی ملاحظه نمی گردد. بنابراین، با در نظر گرفتن سرعت ۱/۰۰ متر بر ثانیه برخلاف تاثیر نیروی بالابری، این سرعت، به عنوان سرعت بحرانی در تحلیل نیروی کششی به حساب نمی آید. این امر بیان کننده آن است که تاثیرات سرعت آب در تحلیل نیروهای

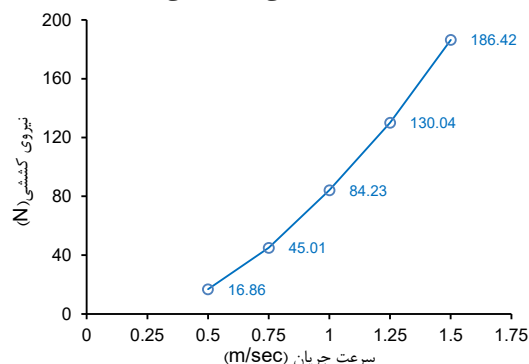
هیدرودینامیکی شامل بالابری و کششی می تواند در طراحی سازه های عظیمی مانند ریگ های اسپار، نقش مهمی را ایفا کنند. بنابراین، با توجه به شرایط محیطی موجود در اطراف سازه های فراساحلی می توان با ارائه استراتژی های موثر، اثرات گردابی را کاهش داده و عمر سازه را افزایش داد [۲۰]. همچنین با توجه به اهمیت طوقه های مارپیچی در سازه های اسپار، در این پژوهش، اثرات بالابری و کششی بر روی اینگونه سازه ها با در نظر گرفتن تاثیر طوقه هارپیچی نیز مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. بنابراین، تحلیل نیروهای هیدرودینامیکی بالابری و کششیر اساس شبیه سازی، جهت بخش های مختلف ریگ اسپار شامل سازه مارپیچی وکل سازه براساس نتایج شبیه سازی به انجام رسیده است.

۸. نتایج شبیه سازی نیروهای بالابری و کششی بر روی بدنه اسپار : شامل قسمت

استوانه ای و طوقه مارپیچی

در این بخش، نیروی بالابری و کششی اعمال شده بر روی بدنه استوانه ای اسپار در سرعت های مختلف جریان مورد بررسی قرار می گیرد. نیروی بالابری به عنوان نیروی عمود بر جریان وارد بر سازه شناخته می شود که می تواند تأثیر قابل توجهی بر پایداری و رفتار سازه در شرایط جریان های متغیر داشته باشد. هدف از این تحلیل، شناسایی تغییرات این نیرو با افزایش سرعت جریان و بررسی اثرات هندسه استوانه ای بر رفتار سازه است. مطابق شکل ۵، روند تغییرات نیروی بالابری در مقایسه با سرعت آب ارائه شده اند. بر این اساس، نیروی بالابری با افزایش سرعت جریان به صورت کلی افزایش می یابد. این امر بیانگر آن است که پایداری طراحی سازه در مقابله با جریان های قوی تر می باشد. همچنین کاهش جزئی در نیروی بالابری در سرعت ۱/۲۵ متر بر ثانیه ممکن است ناشی از گردابه ها و تعامل جریان با سایر بخش های سازه باشد. به علاوه، بالاترین میزان اثر بالابری در سرعت ۱/۰۰ متر بر ثانیه مشهود می باشد. که می تواند به عنوان سرعت بحرانی شناخته شود که سازه را تحت تاثیر قرار می دهد. بنابراین می توان بیان داشت که تاثیر بالابری بر سازه اسپار با تغییرات سرعت بر اساس تغییرات حرکت آب موجود ارتباط ملموسی دارد.

بالابری و کششی متفاوت می باشد. که نشان دهنده عملکرد متفاوت نیروهای بالابری و کششی بر سازه می باشد.



شکل ۶. تغییرات نیروی کششی قسمت بدنه استوانه ای اسپار بر حسب سرعت های مختلف جریان

۹. نتایج شبیه سازی نیروهای بالابری و

کششی در بخش طوقه مارپیچی ریگ اسپار^{۱۴}

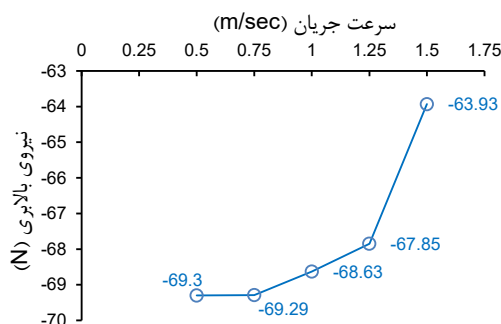
بخش مارپیچ اسپار به طور خاص برای کاهش ارتعاشات القایی جریان^{۱۵} در ریگ های اسپار طراحی شده اند (شکل ۷).



شکل ۷. هندسه بخش اسپیرال (طوقه مارپیچی) ریگ اسپار بدون سایر اجزای بدنه اسپار

نیروی بالابری اعمال شده بر بخش طوقه شناور، بیان کننده تعامل جریان با طراحی مارپیچ می باشد. هدف از این گونه آنالیزها، ارزیابی میزان کاهش نوسانات نیروی بالابری و اثربخشی طراحی مارپیچ در شرایط مختلف جریان می باشد. به طور کلی تجهیز ریگ اسپار با طوقه های مارپیچ، سبب برهم خوردن سیکل تشکیل گردابه ها اطراف سازه می شود

. نهایتاً این طوقه ها می توانند از تغییرات ناگهانی میدان فشار در اطراف آن جلوگیری می کند. برآورد نیروهای وارد به این بخش که از اهمیت بالایی برخوردار می باشد که مقادیر عددی آنها در شکل ۸ ذکر شده اند. علامت منفی در اعداد نمایش داده شده به این علت می باشند که در سرعت های پایین با توجه به پایین بودن عدد رینولدز و حالت گذار جریان (جریان میان حالت آرام و آشفته)، طوقه های مارپیچ، به جای کنترل گردابه باعث ایجاد الگوی گردابه ای نامتقارن و حتی معکوس می شوند. بنابراین، یک ناحیه کم فشار موقتی در سمت بالا سازه ایجاد می گردد. این امر باعث ایجاد تغییر فازی ۱۸۰ درجه ای در نیروی بالابری و ظاهر شدن مقدار منفی بالابری می شود.



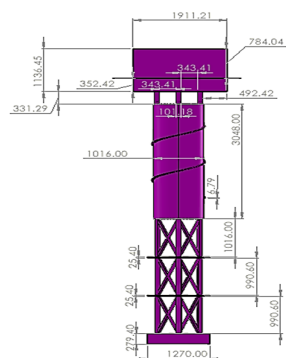
شکل ۸. تغییرات نیروی بالابری قسمت مارپیچ بر حسب سرعت های مختلف جریان

همچنین با افزایش سرعت جریان، طوقه های مارپیچ عملکرد اصلی خود را که همان کنترل گردابه است. بر اساس نتایج ارائه شده، نیروی بالابری اعمالی بر طوقه مارپیچ در سرعت های مختلف تغییرات قابل توجهی نداشته است. هرچند در سرعت های ۱/۲۵ و ۰/۷۵ متر بر ثانیه، تاثیر نیروی بالابری نسبت به سایر سرعت ها مشهودتر به نظر می رسد. در مجموع می توان بیان داشت که سرعت های ۱/۲۵ و ۱/۷۵ متر بر ثانیه سرعت هایی می باشند که نیروهای بالابری و کششی بر سازه اسپار و طوقه مارپیچی تاثیر گذاری مشهودتری دارند. همچنین، سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه، از نظر مقداری پایین ترین گذاری بر روی نیروی بالابری را دارند. در ادامه، نیروی کششی وارد بر قسمت مارپیچ ریگ اسپار مورد

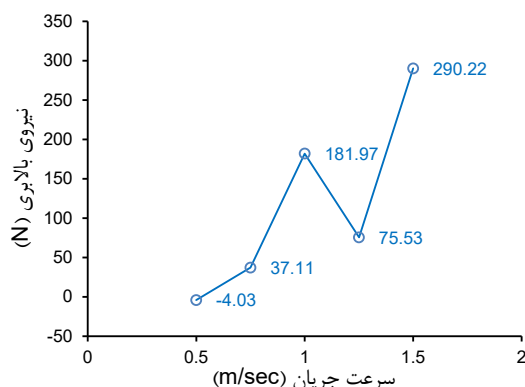
¹⁵ Vortex-Induced Vibration

¹⁴ Strakes

سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه می‌رسد. این روند افزایشی نشان می‌دهد که تأثیر جریان روی سازه باعث ایجاد نیروی عمودی مثبت‌تر با افزایش سرعت می‌شود.



شکل ۱۰. هندسه کل سازه ریگ اسپار

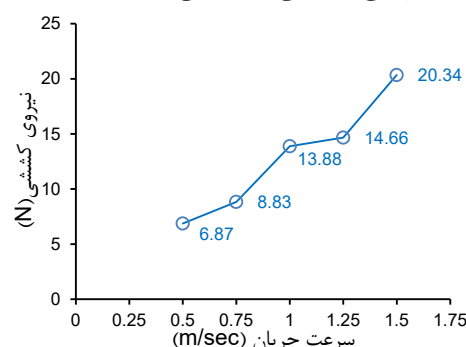


شکل ۱۱. تغییرات نیروی بالابری کل سازه بر حسب

سرعت‌های مختلف جریان

نیروی کششی کل سازه اسپار که شامل اثرات روسازه مکعبی و استوانه‌ای می‌باشد، تحلیل شده است. این نیرو نشان‌دهنده مقاومت کلی سازه در برابر جریان است. تحلیل این نیرو به طراحی سازه‌ای با مقاومت کمتر و عملکرد بهینه در شرایط جریان‌های مختلف کمک می‌کند. بر اساس شکل ۱۲، نیروی کششی با افزایش سرعت جریان تقریباً به صورت غیرخطی افزایش یافته است. رشد سریع نیروی کششی در سرعت‌های بالاتر (۱/۲۵ و ۱/۵ متر بر ثانیه) نشان‌دهنده آن است که مقاومت سازه در برابر جریان به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر می‌شود.

ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. این نیرو با طراحی مارپیچ تعامل داشته و ممکن است به دلیل تغییر جهت جریان در اثر طراحی مارپیچ، کاهش یابد. بررسی این گونه نیروها در سرعت‌های مختلف جریان می‌تواند تأثیر طراحی مارپیچ را بر مقاومت جریان نشان دهد. براساس شکل ۹، حداکثر تأثیر سرعت بر روی نیروی کششی در سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه اعمال می‌گردد. هرچند در مقایسه با سرعت‌های زیر ۱ متر بر ثانیه، افزایش ناگهانی در میزان کششی در این سرعت ایجاد شده است. این نتایج نشان می‌دهند که برخلاف تأثیر کششی بر روی بدنه اسپار، در طوقه مارپیچی، سرعت ۱/۱۰ متر بر ثانیه سرعت بحرانی محسوب می‌گردد. به این معنا که تأثیر سرعت بر روی نیروهای بالابری و کششی در بدنه اسپار و طوقه مارپیچی به تنهایی متفاوت می‌باشد.

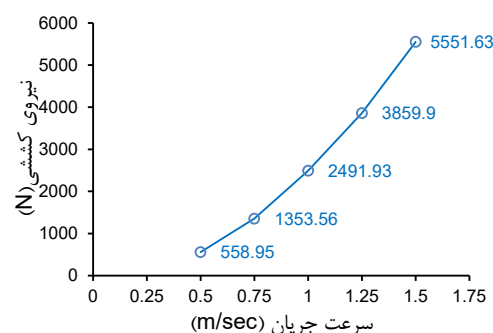


شکل ۹. تغییرات نیروی کششی قسمت مارپیچ بر حسب سرعت‌های مختلف جریان

۱۰. نتایج شبیه سازی عددی مجموعه کلی

سازه ریگ فراساحلی ریگ اسپار

در این بخش، نیروی بالابری کل سازه ریگ اسپار شامل کلیه قسمت‌های روسازه مکعبی/عرشه، سازه مارپیچی و بدنه استوانه‌ای (شکل ۱۰) مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. مجدداً نیروهای مورد بررسی نیروهای بالابری و کششی می‌باشند. بررسی این نیرو در سرعت‌های مختلف، رفتار هیدرودینامیکی کلی سازه را مشخص می‌کند. بر اساس شکل ۱۱، در سرعت پایین (۰/۵ متر بر ثانیه)، نیروی بالابری مقدار منفی دارد، که نشان‌دهنده تغییر جهت نیروی عمودی به سمت پایین است. با افزایش سرعت، نیروی بالابری به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و به مقدار ۲۹۰/۲۲ نیوتن در



شکل ۱۲. تغییرات نیروی کششی کل سازه بر حسب سرعت های مختلف جریان

به طور کلی با مقایسه و تحلیل نیروهای بالابری و کششی این سه بخش از سازه دریایی می توان نتیجه گرفت که طراحی مارپیچ در قسمت مارپیچ تأثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد دینامیکی سازه اسپار دارد و ارتعاشات و نیروهای مخرب را کاهش می دهد. در مقابل، بخش استوانه ای به دلیل طراحی ساده تر، رفتار خطی تری از خود نشان می دهد، و روسازه مکعبی به دلیل ویژگی های هندسی آن، بیشترین سهم کششی را ایجاد می کند.

۱۱. تحلیل میدان جریان و توزیع فشار

پیرامون سازه ریگ اسپار

در این بخش، تحلیل نتایج شبیه سازی میدان جریان پیرامون سازه ریگ اسپار ارائه شده اند. توزیع سرعت، ضریب فشار و اندازه گردابه ها در بخش های مختلف سازه مورد بررسی قرار گرفته اند تا تأثیر هندسه و طراحی سازه بر رفتار جریان و پایداری هیدرودینامیکی آن ارزیابی شود. این تحلیل شامل نمایش توزیع سرعت در صفحات مختلف، مقادیر ضریب فشار بر روی سطح سازه و شدت و توزیع گردابه ها در پشت سازه است. بررسی این پارامترها به درک بهتر اثرات متقابل جریان و سازه و همچنین ارزیابی عملکرد طراحی اسپار کمک می کند.

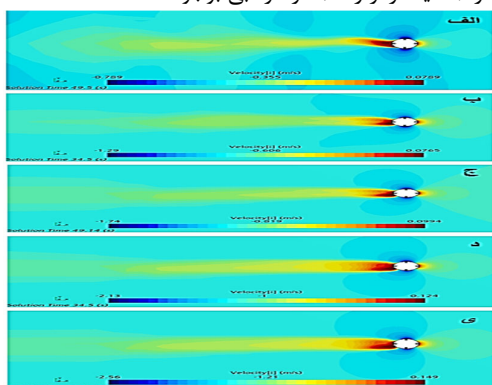
۱۲. پراکندگی الگوی جریان اطراف ریگ اسپار

برای بررسی توزیع سرعت در شبیه سازی مطابق توزیع سرعت در عمق ۱/۷ متری (شکل ۷) و ۲/۷ متری (شکل ۸) و در راستای محور X و بدون در نظر گرفتن رگه های مارپیچ اطراف بدنه ریگ اسپار به ترتیب سرعت های جریان مختلف نشان

داده شده است.

با توجه به شکل ۱۳، و بر اساس توزیع سرعت در عمق ۱/۷ متری و نتایج شبیه سازی های می توان بیان داشت که در سرعت های جریان مختلف، رفتار و توزیع سرعت مشابه یکدیگر می باشند و تنها در مقدار و اندازه سرعت تفاوت دارند. از این رو به دلیل عدم استفاده از رگه های مارپیچ بر روی بدنه ریگ اسپار، بلافاصله پشت سازه (ناحیه قرمز رنگ) اثر گردابی بوجود آمده است.

در مقابل، در عمق ۲/۷ متری از سطح آب (شکل ۸)، رفتار و توزیع سرعت در سرعت های مختلف جریان مشابه یکدیگر است. با توجه به شکل ۸، اندازه سرعت در عمق ۲/۷ متری بیشتر از قدر مطلق سرعت در عمق ۱/۷ متری می باشد. بنابراین مجدداً در عمق ۲/۷ متری به دلیل عدم استفاده از رگه های مارپیچ بر روی بدنه ریگ اسپار، بلافاصله پشت سازه (ناحیه قرمز رنگ) اثر گردابی بوجود آمده است.

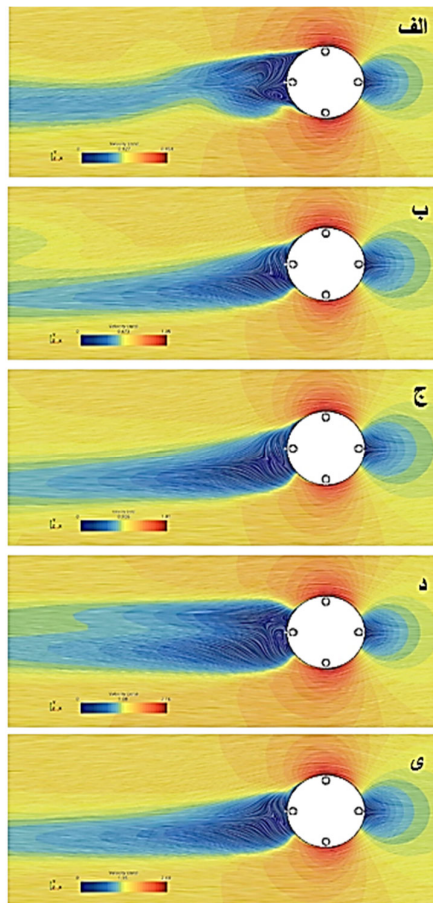


شکل ۱۳. توزیع سرعت در راستای محور X و عمق ۱/۷ متری از سطح آب و الف) سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه جریان ب) سرعت ۰/۷۵ متر بر ثانیه جریان ج) سرعت ۱/۰۰ متر بر ثانیه جریان د) سرعت ۱/۲۵ متر بر ثانیه جریان ی) سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه جریان

۱۳. پراکندگی الگوی جریان اطراف ریگ

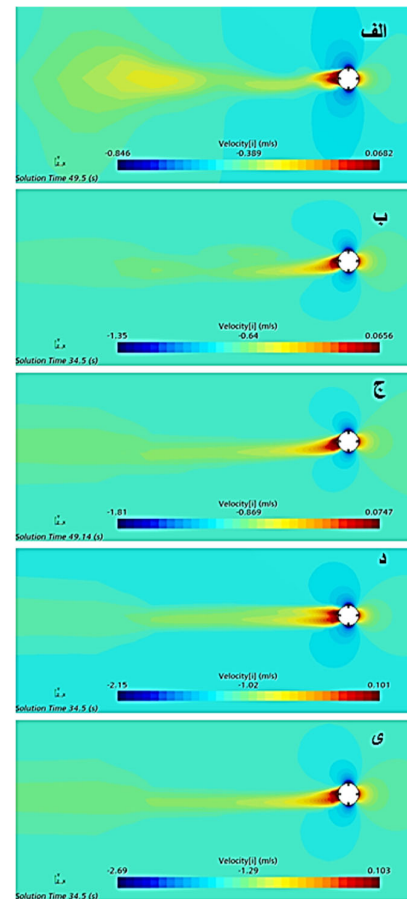
اسپار با در نظر گرفتن طوقه مارپیچی

توزیع بردار سرعت در اطراف ریگ اسپار با در نظر گرفتن طوقه های مارپیچی اطراف بدنه ریگ اسپار، در عمق ۲/۷ متری از سطح آب و در سرعت های جریان مختلف در شکل ۱۵ ارائه شده است.



شکل ۱۵. توزیع بردار سرعت در اطراف سازه ریگ اسپار دارای سازه مارپیچی و در عمق ۲/۷ متری از سطح آب (الف) سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه جریان (ب) سرعت ۰/۷۵ متر بر ثانیه جریان (ج) سرعت ۱/۰۰ متر بر ثانیه جریان (د) سرعت ۱/۲۵ متر بر ثانیه جریان (ی) سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه جریان

می توان بیان داشت که سازه مارپیچ از تکمیل سیکل چرخش سیال برای تشکیل گردابه جلوگیری می کند. بنابراین، جریان به صورت خطی و بدون چرخش از کنار سازه عبور خواهد کرد. بر اساس داده های ارائه شده در سازه ریگ اسپار، در تمامی سرعت های نامبرده بدلیل کنترل و کاهش اثر گردابی و کاهش نیروهای بالابری و کششی دارای عملکرد قابل قبولی را ارائه می دهد.



شکل ۱۴. توزیع سرعت در راستای محور X و عمق ۲/۷ متری از سطح آب و (الف) سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه جریان (ب) سرعت ۰/۷۵ متر بر ثانیه جریان (ج) سرعت ۱/۰۰ متر بر ثانیه جریان (د) سرعت ۱/۲۵ متر بر ثانیه جریان (ی) سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه جریان

بر اساس شکل ۱۵، الگوی جریان و خطوط جریان تشکیل شده در اطراف سازه در سرعت های مختلف نمایش داده شده است. بر اساس خطوط جریان نمایش داده شده، سازه مارپیچ (طوقه های مارپیچ) اضافه شده سبب عدم تشکیل گردابه (ناحیه آبی رنگ بلافاصله پشت سازه ریگ اسپار) به علت عدم ایجاد جریان چرخشی سیال می گردد. بنابراین اینگونه طوقه ها، باعث جلوگیری از ایجاد جریان چرخشی سیال می گردد. بر این اساس

همپوشانی مناسب نتایج عددی با داده های تجربی، می توان نتیجه گرفت که روش مورد استفاده در این شبیه سازی از دقت کافی برخوردار بوده و می توان از آن برای تحلیل های بیشتر استفاده کرد.

۲- بنابر تحلیل های صورت پذیرفته براساس شبیه سازی های انجام شده، می توان بیان داشت که در سرعت های جریان مختلف (۰/۵، ۰/۷۵، ۱/۰۰، ۱/۲۵ و ۱/۵ متر بر ثانیه)، رفتار و توزیع سرعت مشابه یکدیگر می باشند و تنها در مقدار و اندازه سرعت تفاوت دارند.

۳- براساس تحلیل انجام شده در عمق ۲/۷ متری بدنه ریگ اسپار از سطح آب، رفتار و توزیع سرعت در سرعت های مختلف جریان (۰/۵، ۰/۷۵، ۱/۰۰ و ۱/۲۵ متر بر ثانیه) مشابه یکدیگر ارزیابی می گردند. همچنین، بر اساس نتایج حاصله از شبیه سازی ها، اندازه سرعت در عمق ۲/۷ متری بیشتر از اندازه سرعت در عمق ۱/۷ متری می باشد. این امر در حالی است که مقدار سرعت ها یکسان بوده اند. بنابراین به دلیل عدم استفاده از طوقه مارپیچ بر روی بدنه ریگ اسپار، بلافاصله پشت سازه، اثر گردابی به وجود آمده است.

۱۶. فهرست نمادها

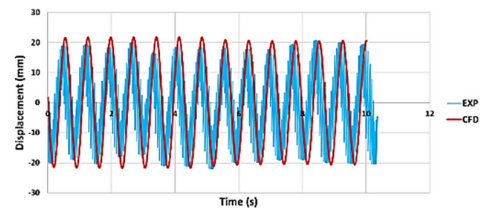
جدول ۲. فهرست نمادها		
نماد	واحد	شرح
F_L	N	نیروی بالابری
F_D	N	نیروی کششی
A	m^2	سطح اعمال نیرو
V	m/s	سرعت سیال
ρ	Kg/m^3	دانسیته
C_D	بدون بعد	ضریب کششی
C_L	بدون بعد	ضریب بالابری
t	s	زمان
D	m	قطر سازه

بنابراین می توان از ابعاد ارائه شده در محدوده سرعت های مطروحه، به صورت عملیاتی مورد استفاده قرار گیرد.

۱۴. راستی آزمایی نتایج ارائه شده شبیه

سازی اثرات گردابی بر روی ریگ اسپار

مقایسه بین داده های عددی و داده های تجربی نشان می دهد که منحنی حاصل از شبیه سازی، که با خط قرمز نمایش داده شده، تطابق قابل قبولی با داده های آزمایشگاهی دارد.



شکل ۱۶. مقایسه نتایج جابجایی اسپار مورد استفاده در آزمایش تجربی و نتایج حاصل از شبیه سازی عددی

در شکل جابجایی (شکل ۱۶)، الگوی نوسانی و دامنه تغییرات به طور قابل ملاحظه ای بر یکدیگر منطبق هستند. این مقایسه بیانگر دقت مناسب شبیه سازی در پیش بینی رفتار سازه عظیمی مانند ریگ های اسپار می باشد. در قسمت مقایسه نتایج حاصله از شبیه سازی در پژوهش ارائه شده، با داده های تجربی استخراج شده از تحقیقات سوکارنور و همکاران (۲۰۲۱) [۱۹]، مقایسه گردیده است. هدف از این اعتبارسنجی در شکل ۱۶، ارزیابی دقت شبیه سازی در پیش بینی تاثیر اثرات گردابی بر روی ریگ اسپار تحت اثر جریان سیال می باشد.

از این رو براساس نتایج بدست آمده می توان بیان داشت که الگوهای نوسانی مربوط به تجزیه و تحلیل های عددی و تجربی همپوشانی مناسبی دارند.

۱۵. نتیجه گیری

۱- اعتبارسنجی انجام شده نشان می دهد که مدل عددی پیاده سازی شده در نرم افزار STAR-CCM+ توانایی پیش بینی رفتار دینامیکی را با دقت قابل قبولی دارد. به دلیل

<https://doi.org/10.1080/17445302.2012.704172>

[12] Yung, T.W., Sandström R. E., Slocum S. T., Ding Z. J., & Lokken R. T. (2004). Advancement of Spar VIV Prediction. Paper presented at the Offshore Technology Conference (USA), Houston, Texas.

<https://doi.org/10.4043/16343-MS>

[13] Carpenter, C. (2020). The Spar Platform: A Design That Transformed Deepwater Development. *Petroleum Technology (JPT)*, 72(09), 76–77.

<https://doi.org/10.2118/0920-0076-JPT>

[14] Clement, P., Mat Saad, KA., Zakaria, A., Zharif Ikhmal Mohamad, M., Bahadur Rana, P., La Rosa, D., & Scandura, P. (2025). Advanced Engineering and Sustainable Solutions. Springer Nature Link, Cham.

ISBN: 978-3-031-81127-2

[15] Rahman, M. A., Leggoe, J., Thiagarajan, K., Mohd, M. H., and Paik, J. K. (2015). Numerical simulations of vortex-induced vibrations on vertical cylindrical structure with different aspect ratios. *Ships and Offshore Structures* 11(4), 405-423.

<https://doi.org/10.1080/17445302.2015.1013783>

[16] Ding, Z.J., Balasubramanian, S., Lokken, R.T., & T.W. Yung, (2004). Lift and Damping Characteristics of Bare and Straked Cylinders at Riser Scale Reynolds Numbers. Paper presented at the Offshore Technology Conference (USA), Houston, Texas.

<https://doi.org/10.4043/16341-MS>

[17] Iwan, W.D., & Blevins, R. D., (1974). A model for vortex induced oscillation of structure. The American Society of Mechanical Engineering, Applied Mechanics, 41(3): 581-586.

<https://doi.org/10.1115/1.3423352>

[18] Irani, M., Perryman, S., Brewer, J., & McNeill S., (2009, July). Vortex Induced Motions of the Horn Mountain Truss Spar. Paper Presented at the Proceeding of Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (Portugal), Estoril (pp. 967-973).

<https://doi.org/10.1115/OMAE2008-57992>

[19] Tang, Y., Li Y., Liu L., Jin, W., & Qu Xi., (2009, June). Study on Influence of Vortex Induced Loads on the Motion of Spar-Type Wind Turbine Based on Aero-Hydro-Vortex-Mooring Coupled Model. Paper Presented at the Proceeding of Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (Portugal), Estoril (pp. 797-806). <https://doi.org/10.1115/OMAE2017-62620>

[20] Blevins, Robert D. (1994). Flow-induced vibration (2th ed.). New York: Van Nostrand Reinhold. ISBN: 978-0-08-044954-8

۱۷. مراجع

[1] Finn L.D., Maher J.V., & Gupta H. (2003). The Cell Spar and Vortex Induced Vibrations. Paper Presented at the Proceeding of the Offshore Technology Conference (USA), Houston, Texas.

<https://doi.org/10.4043/15244-MS>

[2] Holmes S. (2009). Predicting Spar VIM Using CFD. Paper Presented at ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (Portugal), Estoril (pp. 895-900).

<https://doi.org/10.1115/OMAE2008-57706>

[3] Roddier, D., Finnigan, T., & Liapis, S. (2009) Influence of the Reynolds Number on Spar Vortex Induced Motions (VIM): Multiple Scale Model Test Comparisons. Paper Presented at the Proceeding of Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (USA), Honolulu, Hawaii, (5, pp. 797-806).

<https://doi.org/10.1115/OMAE2009-79991>

[4] Shalabe, A., Kamal, AY., Nabeeh, & N., Samy, M. (2025). A comparison of the dynamic characteristics of the spar and TLP offshore structures under irregular waves, experimentally. *Benha Journal of Engineering Science and Technology*, 1(1), 105-116.

<https://doi.org/10.21608/bjest.2025.445860>

[5] Chakrabarti, S.K. (2005). Handbook of Offshore Engineering. Plainfield, IL, USA, Volume I, 563.

[6] Sukarnoor, N. I. M., Quen L. K., Abu A., Kuwano, N., Hooi-Siang, K., & Desa S. M. (2021). The effectiveness of helical strakes in suppressing Vortex-induced Vibration of tandem circular Cylinders Guidelines for CFD Simulations of SPAR VIM. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(1), 101502.

<https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.05.016>

[7] Speight, James G. (2011). Handbook of Offshore Oil and Gas Operations. Elsevier Ltd.

ISBN: 978-1-85617-558-6

[8] Quen, L. K., Abu A., Kato N., Muhamad P., Sahekhaini, A., & Abdullah, H. (2013). Investigation on the effectiveness of helical strakes in suppressing VIV of flexible riser. *Applied Ocean Research*, 44, 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.11.006>

[9] Magee, A., Sablok A., & Gebara J., (2003). Mooring Design for Directional Spar Hull VIV. Paper Presented at the Proceeding of the Offshore Technology Conference (USA), Houston, Texas.

<https://doi.org/10.4043/15243-MS>

[10] Huang, K., & Chen X, (2003). The Impact of Vortex-Induced Motions on Mooring System Design for Spar-based Installations. Paper Presented at the Proceeding of the Offshore Technology Conference (USA), Houston, Texas.

<https://doi.org/10.4043/15245-MS>

[11] Nallayarasu, S., Sreeraj, R., & Murali, M. (2014). Effect of hull geometry on the hydrodynamic response of spar in regular waves. *Ships and Offshore Structures*, 9(1), 22–37.