



ارزیابی قابلیت اطمینان المان میتینگ تحت اثر ضربات وارده ناشی از نصب فلوت اور

ناصر شایختی^{۱*}، محمد کسائیپان^{۲،۳}، عرفان عربشاهی^۴

- ۱- دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.
- ۲- دانشکده انرژی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
- ۳- واحد مدیریت، شرکت مدیریت و مهندسی رزموند صف، تهران، ایران.
- ۴- دانشکده صنایع دریایی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۴
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۰۷
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

کلمات کلیدی:

نصب فلوت اور
المان محدود
المان میتینگ
قابلیت اطمینان
روش شناسی سطح پاسخ
روش تاگوچی.

خلاصه: با توجه به نیاز کشور به افزایش ظرفیت در میداين کنونی خصوصاً میدان پارس جنوبی و راه‌اندازی میداين جدید، شناخت روش فلوت اور به عنوان روشی ارزان و قابل اطمینان به عنوان جایگزین روش جرتقیل امری بدیهی است. این روش در ذات پیچیده و نیازمند مطالعه تمامی پارامترهای محیطی و المان‌های درگیر در آن است. تمامی این عوامل دارای عدم قطعیت هستند. این پژوهش عدم قطعیت‌های محیطی و موجود در فولاد را در ضمن مقایسه دو مدل المان میتینگ و با استفاده از روش‌های سطح پاسخ و طراحی تاگوچی بررسی می‌کند. مدلی شامل جکت، شناور و عرشه برای ارزیابی هیدرودینامیکی در خلیج فارس و با ۶ درجه آزادی توسعه داده شد. سپس با استفاده از ترتیب اجراهای طراحی‌های تاگوچی و روش باکس بنکن از روش شناسی سطح پاسخ و حداکثر تنش فون میزس بررسی و تابع حالت حدی بدست آمد. این تنش با استفاده از مدل اجزا محدود از المان میتینگ که اثر ضربات و اندرکنش‌های موجود را در بر دارد، محاسبه شد. با ایجاد دو تابع حالت حدی قابلیت اطمینان بر آنها انجام شد. در این توابع حالت حدی، اثر پارامترهای محیطی بر خرابی المان میتینگ بررسی شدند. در نهایت اثر عدم قطعیت‌های محیطی و تنش جاری شدن فولاد در روش فلوت اور با بهره‌گیری از روش‌های FORM و SORM و شبیه‌سازی مونت کارلو ارزیابی شدند. در نهایت مشخص شد افزایش عدم قطعیت‌ها در فولاد اثری شاخص و برخی از پارامترهای محیطی اثر کمی بر خرابی ایفا می‌کنند.

۱- مقدمه

تأسیسات نصب شده ویژه از جمله کمپرسورها بر روی عرشه باشند که این تأسیسات باعث سنگین شدن عرشه می‌شوند. سنگین شدن عرشه و همچنین فاصله سکو تا ساحل باعث می‌شود تا روش‌های سنتی و مرسوم نصب که عمدتاً برای عرشه‌های سبک استفاده می‌شوند، کنار گذاشته شوند [۲]. در شرایطی که جرتقیلی با ظرفیت مناسب در منطقه موجود باشد، عامل تأثیرگذار دیگر، کوتاه بودن بازوهای جرتقیل برای نصب عرشه‌های با وزن و اندازه بالا است. مهمی عوامل ذکر شده فوق باعث می‌شوند تا نصب به روش فلوت اور انجام شود. از آنجا که فعالیت‌های دریایی بسیار پیچیده و هزینه‌بر هستند، شناخت فرآیند نصب و همچنین عدم قطعیت‌ها و تأثیر آنها بر انجام درست پروژه‌ها بسیار اثرگذار است. همچنین با توجه به کم سابقه بودن نصب به روش فلوت اور در کشور، سهم عدم قطعیت‌های شناختی در انجام درست فرآیند نصب بسیار اساسی است. روش‌های قابلیت اطمینان می‌توانند در مواردی با ریسک بالا بسیار مؤثر باشند. بدین سبب هدف نهایی در این پژوهش بررسی تأثیر این عدم قطعیت‌ها بر نصب فلوت اور است.

امروزه با گسترش جمعیت، رشد اقتصادهای بزرگ و روند سریع پیشرفت کشورهای در حال توسعه، نیاز روز افزون به انرژی امری بدیهی است. بدین منظور بالا بردن ظرفیت تولید میدان‌های نفتی و گازی کنونی و بهره‌برداری از میدان‌های جدید و دورتر از ساحل مورد توجه قرار گرفته است. گسترش تولید و همچنین توجه به مسائل زیست‌محیطی و عدم آزادسازی مستقیم گازهای گلخانه‌ای مستلزم نصب سکوه‌های جدید و مجهز به تأسیسات ویژه است [۱]. همچنین در مزارع بادی فراساحل فارغ از نصب توربین‌ها، وجود ایستگاه‌های تبدیل نیز نیازمند نصب سکو و عرشه مخصوص است. در ایران به دلایل مختلفی، میدان‌های پارس جنوبی با کاهش فشار چاه‌ها مواجه است. بدین منظور برنامه‌ریزی‌هایی صورت گرفته و طرح‌های مختلف از جمله نصب سکوه‌های جدید فشارافزایی پیش‌بینی شده است. این کار با هدف تقویت فشار گاز جهت انتقال به خشکی است. این سکوها باید دارای

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات shabakhty@iust.ac.ir



در نصب سازه‌های فراساحل مهم‌ترین چالش، کاهش حداکثری بارهای وارده بر سازه زیرین و نهایتاً انتقال بار عرشه به شکل ایمن و بدون وارد کردن شوک است. به صورت مرسوم نصب دریایی به دو روش نصب با جرثقیل و نصب با روش فلوت‌اور انجام شده است که روش آخر نسبتاً جدیدتر و با فراوانی بیشتر در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. در نهایت سه عامل اساسی که باعث روی آوردن به روش فلوت‌اور شده است، وزن بالای عرشه، نبود تجهیزات کافی مانند جرثقیل و گسترش عرشه‌های یکپارچه است [۴]. همچنین عاملی که تأثیر بسزایی در روی آوردن به روش فلوت‌اور دارد، هزینه کمتر آن است؛ به طوری که روش فلوت‌اور نسبت به روش نصب با جرثقیل در حضور بارج و با انجام دقیق و درست فاز مدیریت و برنامه‌ریزی، از جنبه‌ی اقتصادی بسیار به صرفه‌تر است [۵]. در این روش باید ملاحظات مربوط برای کاهش حداکثری نیروهای افقی و نیروهای عمودی و همچنین وضعیت دریا و عوامل اثرگذار در هر منطقه برای کاهش زمان در معرض محیط بودن در نظر گرفته و اجرا شود. در دریاهای باز و بسته عوامل اثرگذار متفاوت هستند و در صورتی که برای هر منطقه مطالعات دقیق انجام شود، این روش به راحتی امکان‌پذیر است. همچنین در این پژوهش بر ثابت نگه داشتن سرعت آب‌گیری (آب توازن) در فاصله ۱۵ تا ۸۵ درصد به منظور حرکت هماهنگ بارج و شناور تأکید شد [۶]. هو و همکاران در پژوهشی، اثرات غیرخطی ناشی از دینامیک پیچیده، ضربات ناشی از چند جسم و وجود انتگرال کانولوشن را بررسی کردند که این بررسی برای مدلی با سه درجه آزادی صورت گرفت که در نتیجه این پژوهش ثابت شد که با جایگزین کردن انتگرال کانولوشن با مدل فضای حالت باعث کاهش هزینه محاسبات می‌شود. همچنین در این مدل اثرات کوپل هیو و رول غالب است و بهترین زاویه برای مخروط المان میتینگ^۱ ۴۵ تا ۶۵ درجه بدست آمد و در انتها توصیه شد تا مدل، نیروها و حرکات در شش درجه آزادی محاسبه شوند [۷]. چن و همکاران اثر حذف کردن انتگرال کانولوشن را در سرعت محاسبات ارزیابی کردند و الگوی ضربات وارده را توسط نگاشت پوانکاره مورد ارزیابی قرار دادند که البته این پژوهش برای مدلی با یک درجه آزادی انجام شد و اثر ضربات تنها در یک حالت عمودی بررسی شده است. در این پژوهش تمامی محاسبات با نادیده گرفتن پنج درجه آزادی صورت پذیرفت [۸]. در پژوهشی مشابه و کامل‌تر، چن و همکاران فرآیند فلوت‌اور را با استفاده از مدلی سه درجه آزادی و با استفاده از مدل فنر برای مدل کردن المان میتینگ ارزیابی کردند. همچنین مدل کردن عرشه به صورت یک و

دو جسم بررسی شدند. در پایان این پژوهش توصیه شد تا سه درجه دیگر نیز بررسی شوند. همچنین اثر مورینگ و دیگر سیستم‌های کنترلی بر این فرآیند با شش درجه آزادی محاسبه شوند [۹]. سان و همکاران اثر دیفرکشن را برای زیرسازه‌های متفاوت بررسی کردند که در نهایت ثابت شد دیفرکشن برای جکت تفاوت چندانی در نتایج ایجاد نمی‌کند؛ اما در مورد اسپار اثر دیفرکشن محسوس و اساسی است. از این رو، در برخی از پژوهش‌ها، جکت در مدل‌سازی هیدرودینامیکی مدل نشده است [۱۰]. در پژوهشی همراه با مطالعه موردی برای میدان نفتی Arthit در تایلند، کوکامن و همکاران با استفاده از نرم‌افزار MOSES نیروهای عمودی در نصب فلوت‌اور را بدست آوردند که این کار به صورت مدل کامپیوتر و تست مدل در آزمایشگاه انجام شد [۱۱]. در پژوهشی دیگر برای این میدان نفتی طراحی المان میتینگ و المان پشتیبان مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش مراحل طراحی و ساخت و سخت‌افزار مورد نیاز برای نصب فلوت‌اور ارزیابی شد [۱۲]. در پژوهشی با رویکرد اجرایی و مشابه پژوهش قبل جونگ و همکاران فرآیند نصب فلوت‌اور را برای عرشه‌ای به وزن حدود ۶۳۰۰ تن بررسی کردند و ضربات وارده را برای بارگذاری عمودی برای حالت‌های ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصدی بدست آوردند. رویکرد مقاله بر لزوم برابری مجموع بارها و استفاده از مدل‌های فنر خطی و غیرخطی برای مدل‌سازی در المان میتینگ بود [۱۳]. به منظور انجام تحلیل قابلیت اطمینان استفاده از تابعی حالت حدی برای تعیین حدفاصل ناحیه ایمنی و خرابی ضروری است [۱۴]. به این منظور برای کاهش هزینه محاسباتی بطور گسترده از روش‌های سطح پاسخ استفاده شده است [۱۵].

عملیلت فلوت‌اور، به صورت ذاتی به دلیل دینامیک غیرخطی پیچیده [۹]، اهمیت عوامل محیطی، مراحل و مکانیسم‌های متفاوت درگیر و شدت نیروهای وارده دارای عدم قطعیت‌های ذاتی و شناختی است. همچنین کم سابقه بودن این عملیات در ایران اهمیت شناخت و بررسی این عوامل را بالا می‌برد. از روش قابلیت اطمینان برای ارزیابی این عدم قطعیت‌ها بهره‌گیری می‌شود.

این مقاله دو هدف اصلی را دنبال می‌کند. هدف نخست ارزیابی اثر عدم قطعیت‌ها بر المان میتینگ و نگاه احتمالاتی در فرآیند تصمیم‌گیری و طراحی این المان و هدف دوم بررسی اثرات، اهمیت و شاخص بودن پارامترهای محیطی در نصب فلوت‌اور و ساخت تابعی که پارامترهای محیطی را به تنش در المان میتینگ ارتباط می‌دهد، است. با توجه به کمبود تجربه در انجام این نصب در کشور، روی آوردن به رویکرد احتمالاتی در طراحی

1 در طول مقاله به دلیل نبود واژه معادلی که کارکرد را تفهیم کند از واژه المان میتینگ برای "Leg Mating Unit" استفاده شده است.

به عدم قطعیت‌ها در پیش بینی آب و هوا و احتمال تغییر آب و هوا با توجه به فاصله دورتر، تأخیر در عملیات باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود [۱۶]. به صورت کلی، نصب فلوت‌اور بسته به امکانات شرکت‌های درگیر به شکل پیش رو انجام می‌شود: (الف) انتقال عرشه به شناور؛ (ب) انتقال دریایی؛ (پ) آماده‌سازی قبل از نصب؛ (ت) قرارگیری و داخل شدن شناور به داخل جکت؛ (ث) قرارگیری شناور در موقعیت پیش میتینگ؛ (ج) میتینگ عرشه یکپارچه و جکت؛ (چ) قرارگیری شناور در موقعیت پس میتینگ و (ح) خروج شناور از مرحله قرارگیری. در هر یک از مراحل زیر چالش‌هایی پیش روی مهندسین قرار دارد که بر طرف کردن هر کدام از آنها نیازمند شناخت دقیق از پارامترهای اثرگذار در آن مرحله است [۱۷].

۲-۱- تکنولوژی‌های مرسوم در نصب فلوت‌اور

به صورت کلی، سه تکنولوژی برای پایین آوردن عرشه و قرارگیری بر روی پایه‌های جکت موجود است. البته استفاده ترکیبی از این تکنولوژی‌ها نیز مرسوم است: در روش نخست تنها عاملی که از آن در جهت پایین آوردن عرشه و قرار دادن عرشه بر جکت بهره برده می‌شود استفاده از شناوری است که می‌تواند توسط پمپ انجام شود. این روش مزایایی مانند ارزان بودن و معایبی مانند زمانبر بودن دارد که با توجه به وجود عدم قطعیت‌های فراوان در محیط دریا به ویژه آب و هوا، می‌تواند صرفه اقتصادی را تحتالشعاع قرار دهد. این تکنولوژی با نام تجاری HIDECK شناخته می‌شود [۱۸]. در روش دوم با توجه به بهره‌گیری از جک‌های هیدرولیکی در زیرسازه نگهدارنده عرشه بر جکت می‌تواند در کاهش زمان عملیات کمک شایانی کند؛ ولی باید هزینه جک‌ها و شدت بیشتر ضربات را نیز در نظر گرفت، چرا که با بیشتر شدن سرعت پایین آوردن سرعت برخوردها بیشتر می‌شوند که این موضوع یا باید مورد قبول واقع شود یا با روش‌هایی کنترل شود که خود باعث تحمیل هزینه به عملیات می‌شود. این تکنولوژی با نام تجاری UNIDECK شناخته می‌شود. در روش سوم که به روش بدون شوک هم شهرت دارد با استفاده از مکانیسم‌هایی از برخورد ضربات عمودی بر پایه‌های جکت با نصب تجهیزات در پایه‌های جکت و سازه‌های نگهدارنده با مکانیزم خاص در زیر عرشه جلوگیری می‌شود. این روش به نام SmartLeg شناخته می‌شود [۱۹].

۲-۲- مکانیسم و المان‌های مورد استفاده

مهم‌ترین المان‌های مورد استفاده در این روش نصب، بارج، المان میتینگ، سازه نگهدارنده عرشه، المان نگهدارنده عرشه، رینگ‌های الاستومتر یا فنر، پمپ‌های آب توازن، جک‌های هیدرولیکی و خطوط مورینگ هستند.

المان‌های میتینگ می‌تواند کمک شایانی در قضاوت مهندسی ایجاد کند. مقایسه مدل‌های اولیه طراحی شده المان میتینگ از نقطه نظر قابلیت اطمینان می‌تواند بر فرآیند تصمیم‌گیری و ریسک در پروژه اثرگذار باشد. از آنجا که پیش‌نیاز ارزیابی قابلیت اطمینان تابع حالت حدی است، توسعه و ساخت تابعی حالت حدی که خرابی المان‌های میتینگ را در نظر داشته باشد نیز انجام شده است.

بیکربندی مقاله به شرح پیش رو است: در بخش ۲ روش فلوت‌اور شامل مراحل، تکنولوژی‌های مرسوم و مکانیسم و عوامل مؤثر در این نصب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در بخش ۳ روش‌شناسی‌های مورد استفاده در پژوهش گردآوری شده‌اند. این بخش شامل مدل‌سازی هیدرودینامیکی و مدل توسعه داده شده شناور، عرشه، جکت و امواج آب، مدل اجزا محدود المان‌های میتینگ طراحی و مورد استفاده شده در پژوهش، روش‌های تجربی ساخت تابع حالت حدی تاگوچی و روش باکس بنکن و پلاکت برمان از روش‌شناسی سطح پاسخ و نهایتاً روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان است. در بخش ۴ نتایج هر بخش و بحث و بررسی پیرامون مقایسه دو المان آورده شده است. در این بخش اهمیت هر پارامتر و عدم قطعیت‌ها در طراحی این المان مورد بحث قرار گرفته است. در انتها و بخش ۵ نتایج نهایی این پژوهش مشخص شده است.

۲- روش نصب فلوت‌اور

تکنولوژی فلوت‌اور با پیدایش عرشه‌های یکپارچه در دهه هفتاد بسیار مورد توجه قرار گرفت [۲]. پوشش دادن نقاط ضعف دیگر روش‌ها، راحتی در اجرا و مقرون به صرفه بودن نسبت به روش دیگر از مزایای این روش است که باعث استفاده گسترده آن در چهار دهه اخیر شده است. در گذشته بنا به دلایل متعدد وزن عرشه‌ها از حدی تجاوز نمی‌کرد؛ اما با گسترش صنایع وابسته عرشه‌هایی با وزن بالا تبدیل به امری عادی شده است. همان‌طور که گفته شد مهم‌ترین عامل اقبال به روش فلوت‌اور وزن بالای عرشه است. در بسیاری از مناطق، جرتقلی با ظرفیت بالا که بتوان عرشه را توسط آن نصب کرد وجود ندارد و یا در صورت موجود بودن، بسیار گران خواهد بود. موضوع حائز اهمیت دیگر هندسه عرشه است که در بعضی موارد باعث عدم امکان فرآیند بلند کردن با جرتقلیل به دلیل کوتاه بودن بازو می‌شود. همچنین با توجه به دورتر شدن میادین و سایت‌های عملیاتی، حرکت جرتقلیل تا سایت بسیار گران خواهد بود و به دلیل سرعت کمتر حرکت، باید احتمال تغییرات آب و هوایی را در محدوده زمانی عملیات در نظر گرفت. با توجه

وزن عرشه دچار شکست نشود. همچنین مکانیزمی مشابه به المان میتینگ بین سازه نگهدارنده عرشه و عرشه به نام المان پشتیبان تعبیه می‌شود. این اجزا در همراهی سیستم‌های کنترلی مانند خطوط مورینگ در طول فرآیند نصب حرکات و ضربات منتج شده را در کمترین حالت ممکن نگاه میدارند. پس از انتقال عرشه به شناور و جابه‌جایی دریایی تا محل نصب و بعد از شروع فعالیت‌های مانیتورینگ، پایین آوردن شناور و عرشه به صورت تک جسمی برای میتینگ انجام می‌شود [۹]. عملیات میتینگ شامل انتقال از ۰ تا ۱۰۰ درصد وزن عرشه بر جکت می‌شود. بر اساس پژوهش‌های پیشین حداکثر ضربات در مرحله انتهایی بارگذاری اعمال می‌شود [۱۳]. در انتهای این مرحله، عرشه و جکت به یکدیگر متصل می‌شوند. هدف از استفاده از المان‌های میتینگ جلوگیری از وارد شدن ضربه به بدنه اصلی پایه‌های جکت و جلوگیری از تغییر شکل است؛ چرا که در صورت ایجاد تغییر شکل، عملیات جوش با مشکل مواجه می‌شود.

به صورت کلی این سیستم‌های کمکی در راستای کنترل حرکات و نهایتاً کاهش بار ضربات هستند که البته حضور هر کدام میتواند وابسته به انتخاب طراح و طرح عملیات باشد. تعدادی از این المان‌ها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که گفته شد استفاده از تمامی المان‌های ذکر شده بسته به طرفین درگیر است. در برخی از پروژه‌ها بسته به طراحی انجام شد جای مخروط ضربه‌دهنده و ضربه‌گیر عوض می‌شود (شکل‌های ۱ تا ۴).

بدیهی است که جز اصلی این نصب، بارج (شناور) است که وظیفه حمل و تأمین شناوری را در هنگام نصب برای عرشه ایفا میکند. فندرها به اشکال مختلف در این نصب استفاده می‌شوند؛ به صورت افقی در نقش ضربه‌گیر حرکات طولی و به صورت عمودی در نقش کاهش‌دهنده ضربات وارده به المان میتینگ که خود نقش اساسی در تحمل این ضربات دارد. از آنجا که شناور مقاومت طولی محدود و در حد متعارف را داراست نیاز به سازه‌ای کمکی و پشتیبان (نگهدارنده) برای تأمین مقاومت کافی است تا در برابر



شکل ۱. المان‌های مورد استفاده در نصب فلوت‌اور، (۱) سازه نگهدارنده عرشه، (۲) المان نگهدارنده عرشه، (۳) المان میتینگ، (۴) پایه‌های جکت [۲۰]

Fig. 1. The elements used in the float over installation (1) deck support structure (2) deck support unit (3) leg mating unit (4) jacket leg

۳- روش‌شناسی

پژوهش پارامتر مقاومت، تنش جاری شدن و پارامتر بار وارده تنش فون میزس در نظر گرفته شده‌اند. به صورت کلی سه حالت درباره‌ی این تابع حالت حدی قابل رخ دادن است.

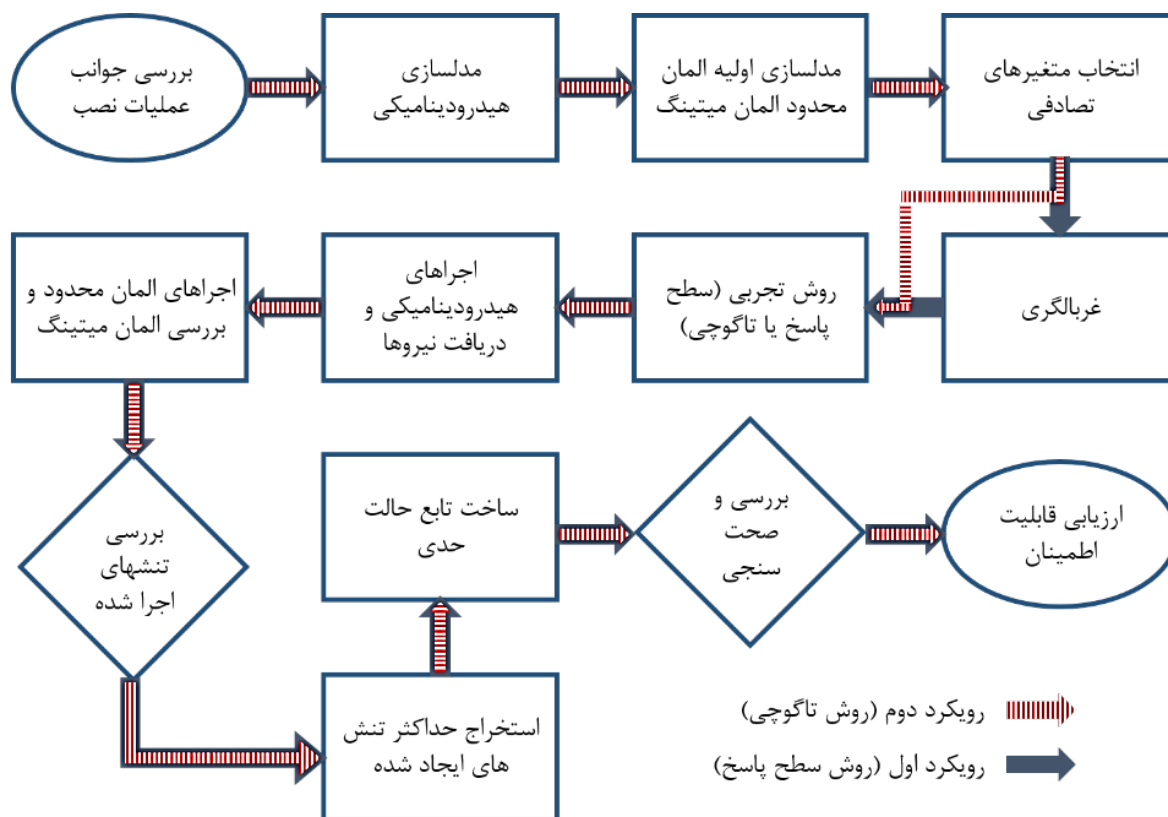
$$\begin{cases} g(R, Q) = R - Q > 0 & \text{حالت ایمنی} \\ g(R, Q) = R - Q = 0 & \text{حالت حدی بین ایمنی و خرابی} \\ g(R, Q) = R - Q < 0 & \text{حالت خرابی} \end{cases}$$

با توجه به سه حالت فوق و تابع حالت حدی معادله (۱)، هدف یافتن احتمال خرابی و متعاقباً ارزیابی قابلیت اطمینان است. در این مطالعه، از دو رویکرد برای ارزیابی و توسعه حالت حدی استفاده شده است. در رویکرد نخست از روش‌های سطح پاسخ و در رویکرد دوم از روش تاگوچی استفاده شده است. به دلیل تفاوت در هزینه محاسباتی در روش سطح پاسخ و روش تاگوچی، در رویکرد نخست ابتدا غربالگری انجام می‌شود. برای هر رویکرد، از المان میتینگ متفاوت استفاده شده است. پیکربندی و مراحل انجام این دو روش در شکل ۲ آورده شده است. هدف از این کار امکان بررسی فرآیند تصمیم‌گیری با استفاده از قابلیت اطمینان است.

از آنجا که هدف نهایی این پژوهش بررسی عدم قطعیت‌ها و ارزیابی قابلیت اطمینان المان میتینگ است و برای این بررسی نیاز به تابعی حالت حدی به صورت صریح است، در این پژوهش با بهره‌گیری از روش‌های سطح پاسخ و تاگوچی این تابع حالت حدی ساخته می‌شود. هدف المان‌های میتینگ جلوگیری از وارد شدن ضربات به پایه جکت و نبود تغییرشکل است، بنابراین حد فاصل ناحیه ایمنی و خرابی، تنش جاری شدن در بدنه خارجی المان میتینگ در نظر گرفته شده است؛ چرا که در صورت گذر از تنش جاری شدن تغییرشکل‌های ماندگار عملیات اتصال و جوش کاری را با مشکل روبرو خواهد کرد. تابعی که این حد خرابی و ایمنی را تعیین می‌کند به شکل معادله (۱) است.

$$g(R, Q) = R - Q \quad (1)$$

که در آن R پارامتر مقاومت و Q نیز پارامتر بار وارده است. در این



شکل ۲. مراحل و فرآیند پژوهش

Fig. 2. Stages and process of research

۳-۱- مدل سازی هیدرودینامیک

بررسی حرکات و نیروهای وارده بر سیستم دخیل و موجود در نصب فلوت‌اور با بهره‌گیری از معادله کامینز انجام می‌پذیرد [۲۱]. این معادله در تاریخچه زمانی و با در نظر گرفتن عبارات غیرخطی حل می‌شود. حل این معادله به دلیل داشتن انتگرال کانولوشن بسیار زمان‌بر است. در این معادله بردار درجات آزادی شناور است که در این مقاله به جهت ارزیابی حداکثر حرکات شناور هر شش درجه آزادی در نظر گرفته شده‌اند. این معادله برای جسم شناور و بدون سرعت رو به جلو به فرم معادله (۲) است.

$$[M + A(\infty)]\ddot{x}(t) + \int_0^t h(t-\tau)\dot{x}(\tau)d\tau + Kx(t) = f^E(t) \quad (2)$$

در معادله (۲)، ماتریس جرم سیستم و $A(\infty)$ ماتریس جرم افزوده فرکانس بی‌نهایت هستند. عبارت دوم در این معادله انتگرال کانولوشن است. که به جهت افزایش سرعت محاسبه به صورت عددی جایگزین می‌شود [۲۲]. نیز ماتریس سختی هیدرواستاتیک سیستم است. سمت راست این معادله نیروهای تحریک و مجموع نیروهای خارجی است. اگیلوی با استفاده از تبدیل فوریه معادله (۲) را در دامنه فرکانسی در نظر گرفت که در آن ترم‌های انتگرال کانولوشن حذف شدند [۲۳]. این معادله در زیر آورده شده است.

$$\hat{x}(j\omega)\{-\omega^2[M + A(\omega)] + j\omega B(\omega) + K\} = \hat{f}(j\omega) \quad (3)$$

در معادله (۳)، $\hat{x}(\omega)$ و $\hat{f}(\omega)$ تبدیل‌های فوریه $x(t)$ و $f^E(t)$ هستند. $A(\omega)$ و $B(\omega)$ ضرایب هیدرودینامیکی و به ترتیب جرم افزوده و میرایی تشعشی هستند. بدست آوردن ضرایب و حل معادله با استفاده از نرم‌افزار MOSES انجام پذیر است (منوال موزس). اگیلوی همچنین رابطه بین ضرایب را در معادله (۲) و (۳) را بدست آورد.

در تحلیل فرآیند نصب فلوت‌اور طول درفت شناور به تدریج افزایش می‌یابد تا به نقطه انتهایی از پیش تعیین شده برسد. بدین سبب معادله فوق هم وابسته به زمان از نظر این است که نیروها ماهیتاً وابسته به زمان‌اند و هم از این نظر که حتی با ثابت بودن شرایط خارجی کاهش ارتفاع شناور باعث تغییر در مسأله می‌شود [۲۴].

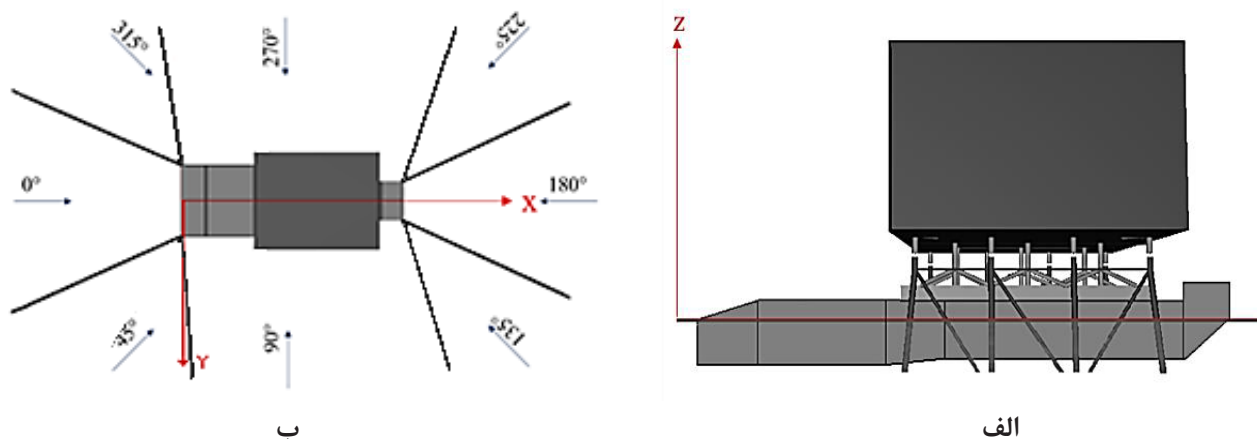
به جهت مدل سازی و انجام مدل هیدرودینامیک، از شناوری واقعی و T

شکل به طول ۱۳۰ متر و عرض ۵۵ متر و وزن ۵۰۵۹ تن استفاده شده است. در اجرای پروژه‌های فلوت‌اور به صورت گسترده از بارهای T شکل به منظور تأمین شناوری استفاده می‌شود. سازه نگهدارنده شامل ۶ المان نگهدارنده، وظیفه تحمل بار عرشه را بر عهده دارد. وزن عرشه حدوداً برابر با ۱۷۰۰۰ تن و جکتی ۸ پایه در عمق ۸۵ متری مستقر شده است. شرایط محیطی و فیزیکی مشابه با خلیج فارس و پارس جنوبی در نظر گرفته شده و از طیف ISSC بهره گرفته شده است. برای شرایط موج و باد از داده‌های پژوهش کامران‌زاد و همکاران که برای خلیج فارس انجام شده است، استفاده شد. در این مقاله این اطلاعات برای سه ناحیه از خلیج فارس بدست آمده است. یکی از این مناطق در ناحیه مرکزی خلیج فارس و در نزدیکی پارس جنوبی بدست آمده است [۲۵]. برای داده‌های جریان حداقل و حداکثر دریاهای بسته فرض شده است. برای کنترل حرکات شناور از خطوط مورینگ استفاده می‌شود. در این مطالعه از هشت خط مورینگ استفاده شد که پیکربندی شماتیک آن در شکل ۳ (ب) و مدل بارج عرشه و جکت در شکل ۳ (الف) نشان داده شده‌اند. برای ساخت تابع حالت حدی صریح از پارامترهای محیطی موجود در جدول ۱ استفاده شده است. مدل سازی هیدرودینامیکی با نرم‌افزار MOSES انجام شده است. این تحلیل تاریخچه زمانی در ۲۰ ثانیه انجام شده است. این شرایط برای هر دو مدل المان محدود یکسان و بدون تغییر بوده است.

۳-۲- مدل سازی المان محدود المان میتینگ

در فرآیند نصب عرشه (سازه فوق) بر جکت (به صورت کلی سازه زیرین)، نیروهای متفاوتی به شکل ضربه بر سازه زیرین وارد می‌شود که این موضوع فارغ از روش نصب است. ولی به طور کلی شدت این ضربه‌ها در نصب فلوت‌اور نسبت به روش استفاده از جرتقیل، بیشتر است. برای کاهش شدت این ضربات و کنترل آنها از روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود که در نصب فلوت‌اور عمده‌ترین سهم بر عهده المان‌های میتینگ نصب شده در انتهای پایه‌های سازه زیرین است. البته در بعضی از پروژه‌ها این المان‌ها بر انتهای پایه‌های عرشه نصب می‌شوند.

به صورت کلی فلسفه طراحی این المان جذب حداکثری ضربات در طول نصب برای بارگذاری صفر تا صد درصدی خواهد بود و این المان بعد از نصب عملاً کارکردی ندارد و تمامی بار بر پایه‌ها منتقل می‌شود. این المان از دو قسمت تشکیل می‌شود: یک قسمت با سختی بیشتر از جنس فولاد و دیگری که در نقش مستهلک کننده ظاهر می‌شود که این قسمت معمولاً از جنس الاستومر و بعضاً از انواع دیگر مانند ماسه است [۲۶].



شکل ۳. مدل سازی هیدرودینامیکی؛ الف) مدل عرشه، شناور و سازه نگهدارنده، ب) پیکربندی شمانیک خطوط مورینگ

Fig. 3. Hydrodynamic modeling a) Model of deck, barge and deck support structure b) Schematic configuration of Mooring lines

جدول ۱. شرایط محیطی مورد استفاده در خلیج فارس [۲۵]

Table 1. Environmental conditions in the Persian Gulf

ارتفاع موج مشخصه (متر) Hs	پریود موج (ثانیه) T	جهت موج (درجه) WaveD	سرعت باد (متر بر ثانیه) WV	جهت باد (درجه) WD	سرعت جریان (متر بر ثانیه) CV	جهت جریان (درجه) CD
4/0	2/2	90 0-	4	0	1/0	0-90
45/2	62/6	180-270	12	90	1	180-270

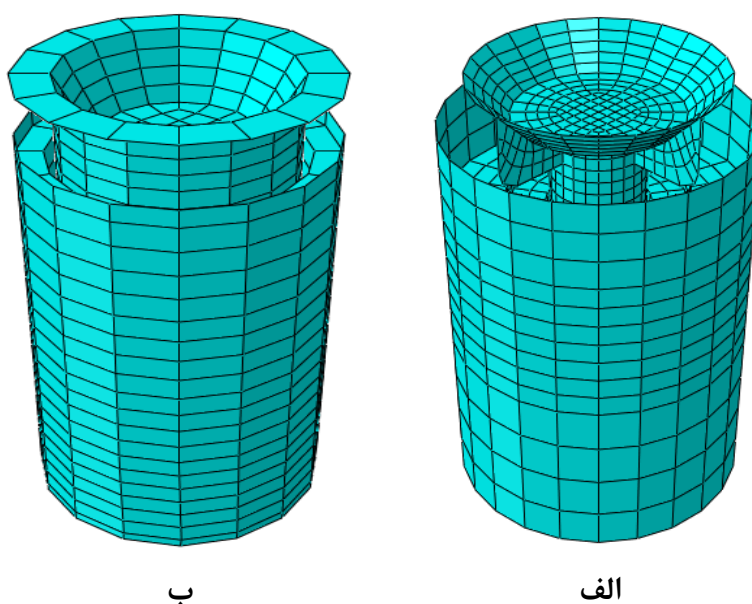
[۲۰]. تاریخچه زمانی برای ۲۰ ثانیه و تحلیل به دلیل پیچیدگی مدل با حل گر dynamic explicit انجام شد. به جهت کاهش برخورد ها و کاستن از شدت ضربات و عدم برخورد مستقیم قطعات فولادی از الاستومر استفاده شده است. برای شبیه سازی عملکرد الاستومرها از مصالح های پیرلاستیک و از مشخصات پژوهش شهزاد و همکاران بهره گرفته شده است [۲۸]. فولاد استفاده شده در هر دو المان میتینگ طراحی شده در ناحیه سخت کننده ها از نوع API X۷۰ و در بدنه خارجی API X۶۵ است. مشخصات مکانیکی فولادهای استفاده شده در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل و پیکربندی دو المان میتینگ استفاده شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

در این پژوهش محاسبات بر دو المان میتینگ با پیکربندی متفاوت صورت گرفته است که در هر دو از دو مصالح فولاد و الاستومر استفاده شده است. همچنین مدل سازی و تحلیل نیز با استفاده از نرم افزار ABAQUS انجام شده است. برای اعمال شرایط فیزیکی واقعی انتهای المان ها بدون آزادی است و تمامی المان ها به صورت ۴ نودی اند. اندرکنش ها بین دو فولاد و با ضریب اصطکاک ۰/۵ محاسبه شده است [۲۷]. به دلیل اینکه این مطالعه برای مرحله بارگذاری ۱۰۰ درصد انجام می شود، بارهای عمودی به صورت بار گسترده و بارهای افقی به صورت بار نقطه ای بر مخروط ضربه گیر اعمال شده است. این رویکرد مشابه پژوهش چایتانیا و نایر در نظر گرفته شده است

جدول ۲. مشخصات مکانیکی فولادهای استفاده شده

Table 2. Mechanical specifications of steels

تنش نهایی (mPa)	تنش جاری شدن (mPa)	رده فولاد
5.30×10^2	4.48×10^2	API X65
5.65×10^2	4.83×10^2	API X70



شکل ۴. المان‌های استفاده شده؛ الف) المان میتینگ در رویکرد اول (روش سطح پاسخ)، ب) المان میتینگ در رویکرد دوم (روش تاگوچی)

Fig. 4. Leg mating units used; a) Leg mating unit in the first approach (response surface methodology), b) Leg mating unit in the second approach (Taguchi method)m

قرار می‌گیرند. در واقعیت، ممکن است تعداد زیادی از عوامل بر یک فرآیند اثر داشته باشند، اما به این معنی نیست که همه عوامل تأثیراتی شاخص بر روی فرآیند دارند. بنابراین، اولین قدم برای بهینه‌سازی یک فرآیند، شناسایی عوامل اثرگذاری است که بر فرآیند به صورت شاخص اثر می‌گذارند. به صورت کلی با روش‌های فاکتوریل و پلاکت برمان در فرآیندهایی که تعداد پارامترها و هزینه مدل‌سازی زیاد است، ابتدا غربالگری صورت می‌گیرد؛ چراکه اثرات متقابل پارامترهای اثرگذار و بی اثر از مدل حذف می‌شوند [۳۰]. به دلیل تعداد کمتر اجراها در مدل پلاکت برمان نسبت به روش‌های فکتوریلی کامل و یا جزئی از روش پلاکت برمان برای غربالگری استفاده شد. همچنین در روش‌شناسی سطح پاسخ با منطقی مشابه، روش باکس بنکن در مقابل روش کامپوزیت مرکزی استفاده شده است.

۳-۳- روش شناسی سطح پاسخ و روش طراحی تاگوچی

با توجه به دو رویکرد مطرح شده، از روش‌های سطح پاسخ و طراحی تاگوچی استفاده شده است. انجام هر مطالعه مستلزم انجام اجراهایی است که دارای هزینه محاسباتی هستند. به این منظور در رویکرد اول و استفاده از روش شناسی سطح پاسخ ابتدا غربالگری انجام می‌شود [۲۹]. در این پژوهش در رویکرد اول برای غربالگری از روش پلاکت برمان و سپس از روش باکس بنکن و در رویکرد دوم از روش طراحی تاگوچی استفاده می‌شود. تفاوت کاربردی این روش‌ها در تعداد اجراها و سطوح متغیرهاست. در رویکرد نخست به دلیل محدودیت روش سطح پاسخ در برابر روش تاگوچی، مشخصات موج و باد در مدل لحاظ می‌شوند و در رویکرد دوم به دلیل تعداد کمتر اجراها به نسبت پارامترها، تمامی پارامترهای آورده شده در جدول ۱ مورد استفاده

جدول ۳. طراحی پلاکت برمان برای ۵ پارامتر

Table 3. Plackett–Burman design for 5 parameters

جدول طراحی (تصادفی شده)						
E	D	C	B	A	اجرا	بلوک
-	+	+	-	+	1	1
-	-	+	-	+	1	2
+	-	+	+	+	1	3
-	+	-	+	+	1	4
+	+	+	-	-	1	5
-	-	-	+	-	1	6
+	-	-	-	+	1	7
-	-	-	-	-	1	8
+	+	-	-	-	1	9
-	+	+	+	-	1	10
+	+	-	+	+	1	11
+	-	+	+	-	1	12

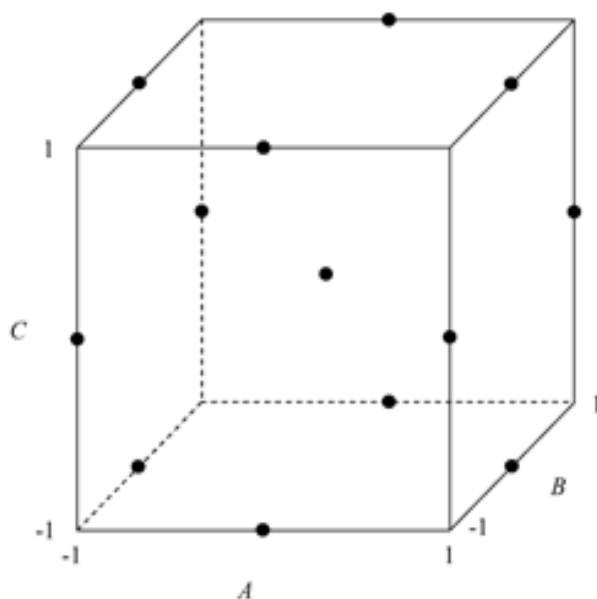
۳-۳-۱- روش پلاکت برمان

طرح پلاکت برمان که طراحی فاکتوریل کسری دو سطحی است که توسط پلاکت و برمان توسعه داده شده است و برای غربالگری فاکتورهای مهم برای بررسی‌های بیشتر مورد استفاده گسترده قرار گرفته است [۳۱]. علاوه بر این، در این روش تعداد اجرا با مضرب ۴ برابر است. به دلیل دو سطحی بودن، از مدلی درجه یک برای اثر پارامترهای مختلف استفاده می‌شود. بر اساس تحلیل واریانس (ANOVA) مدل ساخته شده، می‌توان شاخص بودن فاکتورها را شناسایی کرد [۳۲]. این روش بطور گسترده برای غربالگری و کاهش هزینه محاسباتی با حذف پارامترهای کم اهمیت مورد استفاده قرار گرفته است. سطوح برای ۵ پارامتر و با تصادفی‌سازی اجراها و در یک بلوک در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در این روش پارامترها تنها در دو سطح بررسی می‌شوند. همان‌طور که گفته شد، ۱۲ اجرا با شرایط نشان داده شده باید انجام شود. به این صورت که برای مثال در اجرای شماره ۱، پارامترهای A، C و D در سطح بالای خود قرار دارند و پارامترهای B و E در سطح پایین خود قرار می‌گیرند. در فرآیندهایی که عواملی در آنها دخیل هستند که کنترل آنها در دست

مهندسی و پژوهشگران نیست، اجراها در دو یا چند بلوک انجام می‌شوند. از جمله این موارد فرآیندهای شیمیایی هستند که در آنها انجام فرآیند در روز و شب متفاوت است و تغییرات غیر قابل کنترل هستند. از آنجا که در نصب فلوتاتور، شرایط برای تمامی اجراها باید یکسان باشد، این اجراها در یک بلوک انجام می‌شوند.

۳-۳-۲- روش طراحی باکس بنکن

روش باکس بنکن یکی از روش‌های سطح پاسخ است که به طور گسترده برای بهینه‌سازی روابط تجربی بین فاکتورهای دخیل در یک فرآیند مورد استفاده قرار گرفته است [۳۳]. در این روش پارامترها در سه سطح بالا، پایین و وسط در مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از انجام اجراها با استفاده از مدلی درجه دو کامل مطابق معادله (۴) رابطه بین پاسخ و پارامترها محاسبه می‌شود. طرح باکس بنکن پس از حذف پارامترهای غیرشاخص پس از مرحله غربالگری و برای ۳ پارامتر مطابق شکل ۵ است. در شکل ۵ پارامترها در امتداد محورهای مختصاتی قرار گرفته و هر نقطه بیانگر یک اجرا است. همچنین به دلیل تکرار سه اجرا در طرح باکس بنکن (نقاط مرکزی در شکل ۵)، و نحوه قرار گرفتن نقاط دیگر، شکل حاصل مشابه



شکل ۵. طرح باکس بنکن برای ۳ پارامتر و نقاط ستاره‌ای

Fig. 5. Box-Behnken design for 3 parameters and star points

استوار حول استفاده از طراحی‌های قطری می‌گردد [۳۹]. برای ساخت تابع حالت حدی صریح با استفاده از روش تاگوچی در این پژوهش از طراحی ۱۱۶ استفاده شده است. منطق این روش بررسی نسبت سیگنال (S) به نویز (N) است. سه حالت برای این نسبت قابل بررسی است. از آنجا که هدف در یافتن تابع حالت حدی، تنش فون میزس بیشینه است، از نسبت سیگنال به نویز بزرگتر، بهتر استفاده شده است که در عبارت (۵) نشان داده شده است. در این معادله نسبت سیگنال به نویز به عنوان معیار استواری برای شناسایی فاکتوری است که این نسبت را مشخص می‌کند، تعداد پاسخ‌ها در سطوح مشخص و پاسخ‌ها در این سطوح است. دو تفاوت بسیار مهم این روش نسبت به روش‌های سطح پاسخ تعداد اجراهای بسیار کمتر و تعدد سطوح پارامترها و قابلیت ایجاد طراحی با سطوح مختلف است. در این رویکرد روش تابع حالت حدی به دلیل تعدد فاکتورها به صورت درجه یک و با استفاده از رگرسیون تولید شده است که شکل کلی آن به شکل عبارت (۶) است [۴۰]. در این معادله ضرایب رگرسیون و فاکتورهای موجود در رگرسیون هستند.

$$S/N = -10\log(\Sigma(1/Y^2)/n) \quad (5)$$

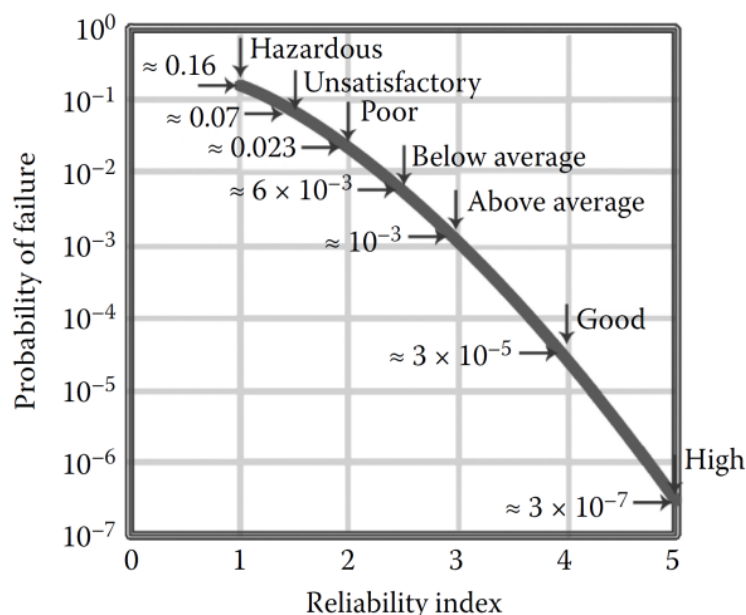
ستاره است. مشابه روش قبل از تحلیل واریانس برای ارزیابی شاخص بودن پارامترها استفاده می‌شود.

$$y = \gamma_0 + \sum_{i=1}^k \gamma_i x_i + \sum_{i=1}^k \gamma_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \gamma_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

در معادله (۴) ضرایب عبارات درجه اول، ضرایب عبارات درجه دوم و ضرایب اندرکنش‌ها در رگرسیون هستند. همچنین در این معادله مشخص است که این مدل به صورت درجه دو کامل است و عبارات درجه یک (۱)، درجه دو (۲) و اندرکنش‌ها (۳) در مدل حضور دارند.

۳-۳-۳ روش طراحی تاگوچی

روش تاگوچی، روشی آماری برای بهینه‌سازی پارامترهای دخیل در هر فرآیند است. این روش توسط تاگوچی و کونیشی توسعه داده شد [۳۴]. این روش برای پیشرفت و کنترل کیفیت پارامترها در صنایع مختلف به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [۳۵]. مثال‌هایی از این استفاده در حوزه‌های متفاوت مانند زیست فناوری [۳۶]، الکترونیک [۳۷]، جامدات [۳۸] استفاده شده است. روش‌شناسی تاگوچی برای مسائل طراحی پارامتر



شکل ۶. رابطه بین شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی [۴۵]

Fig. 6. Relationship between reliability index and failure probability

مقاومت با میانگین‌های به ترتیب μ_R و μ_Q و انحراف معیارهای σ_Q و σ_R این فاصله از رابطه (۷) بدست می‌آید. ارتباط بین شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی در شکل ۶ نشان داده شده است. محاسبات قابلیت اطمینان با استفاده از نرم‌افزار RT انجام شد [۴۴].

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (7)$$

در پژوهش‌های قابلیت اطمینان برای تخمین این فاصله به صورت کلی از دو روش مرتبه اول (FORM) و مرتبه دوم (SORM) استفاده می‌شود. همچنین روش شبیه‌سازی مونت کارلو به صورت گسترده برای صحت‌سنجی نتایج مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش با N شبیه‌سازی تابع حالت حدی تعداد موارد خرابی در برابر کل شبیه‌سازی (N) ارزیابی می‌شود. شکل کلی این شبیه‌سازی در عبارت (۸) مشخص شده است.

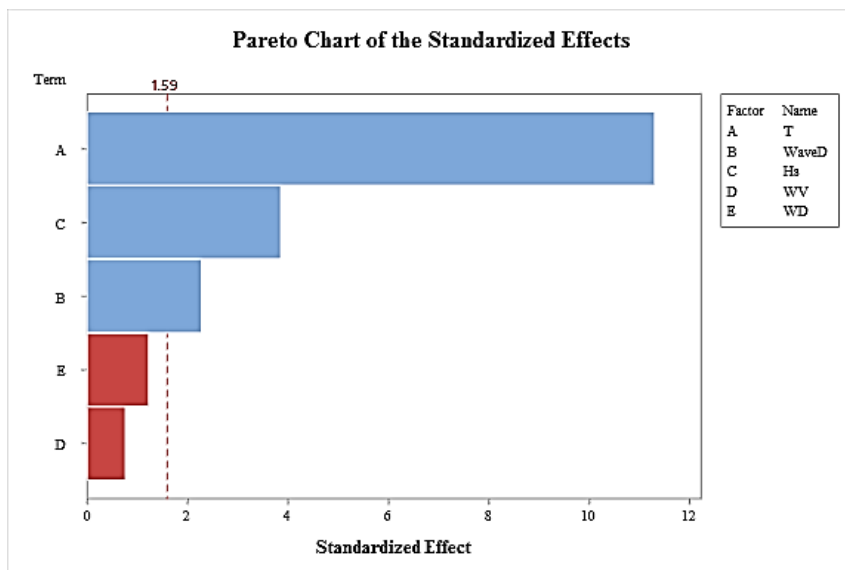
$$p_f \approx \frac{g < 0 \text{ موارد خرابی}}{N \text{ تعداد موارد شبیه سازی}} \quad (8)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (6)$$

۳-۴- قابلیت اطمینان

فعالیت‌های دریایی در سطوح و مراحل مختلف به دلیل ذات تصادفی بودن محیط و بارهای خارجی همراه با عدم قطعیت‌های ذاتی و شناختی است [۴۱]. عملیات نصب فلوت‌اور در ذات بسیار پیچیده و غیرخطی است و کم سابقه بودن انجام این روش در ایران و نبود تجربه باعث پراهمیت‌تر شدن این عدم قطعیت‌ها می‌شود. روش‌های قابلیت اطمینان به صورت گسترده در صنایع حساس که همراه با عدم قطعیت‌ها، ریسک و هزینه‌های بالا هستند و استفاده از ضرایب اطمینان حتی در جهت محافظه‌کارانه منطقی نیستند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴۲].

مفهوم شاخص قابلیت اطمینان توسط هاسوفر و لیند به صورت کوتاه‌ترین فاصله تا تابع حالت حدی معرفی شد [۴۳]. با توجه به تعریف ارائه شده توسط هاسوفر و لیند، شاخص قابلیت اطمینان β به صورت کوتاه‌ترین فاصله تابع شرایط حدی به مبدأ مختصات در فضای استاندارد نرمال تعریف می‌گردد. برای دو متغیر تصادفی مستقل نرمال R و Q به عنوان پاسخ و



شکل ۷. اثر پارامترهای مورد استفاده در غربالگری

Fig. 7. Effect of parameters used in screening

جدول ۴. جدول تحلیل واریانسها و نتایج شاخص بودن پارامترها در غربالگری و حذف فاکتورهای باد

Table 4. ANOVA table and results of significant parameter in screening and elimination of wind factors

پارامتر	F-Value	P-Value	شاخص بودن
پریود	128.02	0	شاخص
جهت موج	5.2	0.052	در مرز شاخص بودن
ارتفاع موج مشخصه	14.98	0.005	شاخص
جهت باد	-----	-----	غیر شاخص
سرعت باد	-----	-----	غیر شاخص

۴- نتایج و بحث

حرکات و نیروهای وارد بر المان‌های میتینگ ناشی از شناور و عرشه در دامنه‌ی زمانی برای هر اجرا بر اساس طرح‌های باکس بنکن و تاگوچی بدست آورده شد. نیروهای حاصل به صورت یک تاریخچه زمانی به عنوان بار وارده بر مدل اجزا محدود المان میتینگ وارد می‌شود. هدف ارزیابی بیشترین تنش فون میزس در بدنه‌ی خارجی المان میتینگ است. این مقادیر تنش برای تمامی اجراها ثبت شدند و بر اساس مقادیر این تنش‌ها تابع های حالت حدی ساخته می‌شوند. نتایج این بخش‌ها برای دو رویکرد در بخش‌های پیش رو آورده شده است.

۴-۱- مدل رویکرد اول (روش سطح پاسخ)

در رویکرد اول ابتدا بر روی پارامترها غربالگری انجام می‌شود. در این پژوهش به دلیل زمان‌بر بودن مدل‌های المان محدود افزایش پارامترها در مدل سطح پاسخ باعث افزایش اجراهای هیدرودینامیک و متعاقباً اجراهای المان محدود می‌شود. به این دلیل غربالگری بر روی نتایج مدل هیدرودینامیک انجام می‌شود. نتایج غربالگری در جدول ۳ نشان داده شده است که بر اساس آن پارامترهای باد غیرشاخص و در نتیجه حذف می‌شوند. اثر هر پارامتر در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل مطابق جدول ۴، T پریود موج، WaveD جهت موج، Hs ارتفاع موج مشخصه، WV سرعت باد و WD جهت باد هستند.

جدول ۵. ترتیب و نتایج اجراها در روش باکس بنکن (رویکرد اول)

Table 5. Run orders and results of in Box Behnken method (first approach)

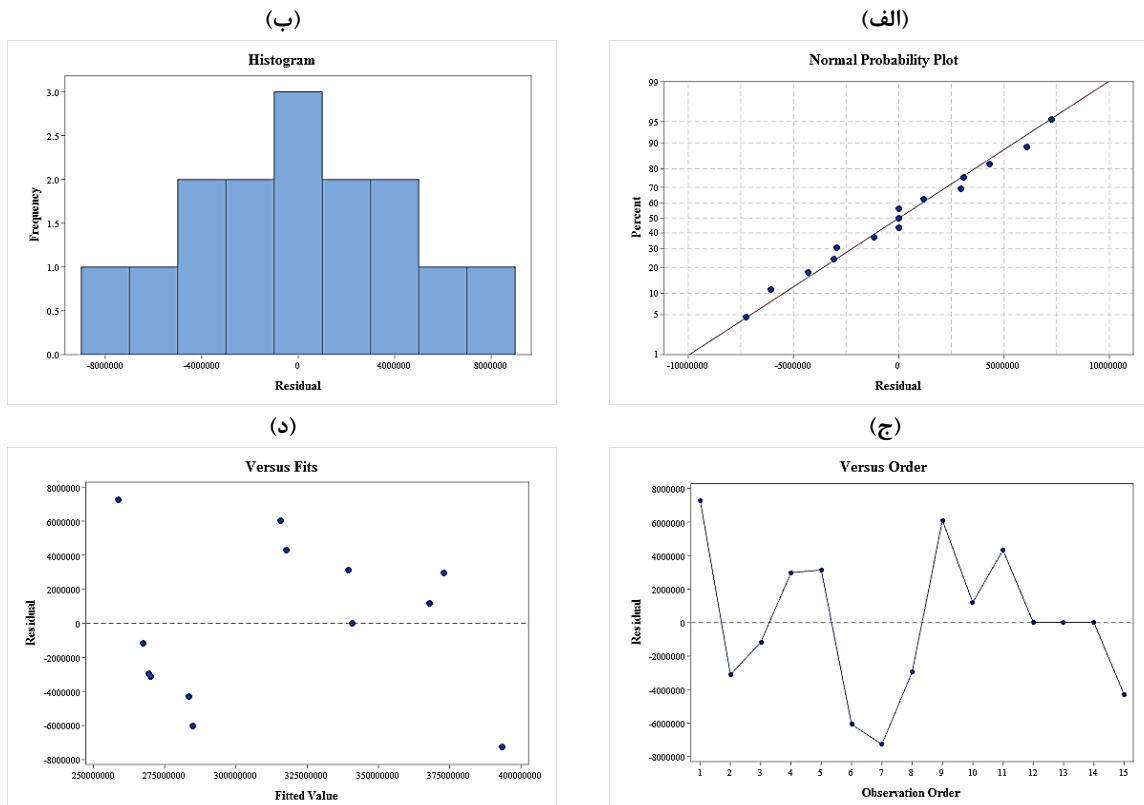
ترتیب اصلی اجراها	ترتیب تصادفی شده اجراها	ارتفاع موج مشخصه (m)	جهت موج (degree)	پریود موج (s)	تنش فون میز (Pa)	مقدار برازش (Pa)	باقیماندهها
5	1	0.04	90	2.2	2.661E+08	2.59E+08	7.26E+06
7	2	0.04	90	6.62	2.669E+08	2.7E+08	3.11E+06
1	3	0.04	0	4.41	2.664E+08	2.68E+08	1.18E+06
2	4	2.45	0	4.41	3.761E+08	3.73E+08	2.96E+06
6	5	2.45	90	2.2	3.427E+08	3.4E+08	3.11E+06
9	6	1.245	0	2.2	2.788E+08	2.85E+08	6.08E+06
8	7	2.45	90	6.62	3.862E+08	3.93E+08	7.26E+06
3	8	0.04	180	4.41	2.664E+08	2.69E+08	2.96E+06
12	9	1.245	180	6.62	3.218E+08	3.16E+08	6.08E+06
4	10	2.45	180	4.41	3.692E+08	3.68E+08	1.19E+06
11	11	1.245	0	6.62	3.220E+08	3.18E+08	4.30E+06
14	12	1.245	90	4.41	3.411E+08	3.41E+08	4.33E+01
13	13	1.245	90	4.41	3.411E+08	3.41E+08	4.67E+01
15	14	1.245	90	4.41	3.411E+08	3.41E+08	3.33E+00
10	15	1.245	180	2.2	2.792E+08	2.83E+08	4.30E+06

هیدرودینامیک و المان محدود برای پیش‌بینی تنش ایجاد شده در المان میتینگ استفاده کرد. همچنین از آنجا که مقادیر R-sq (adj) و R-sq تفاوت چندانی را نشان می‌دهند بیانگر کیفیت و تعیین‌کنندگی مدل است که این مطلب به این دلیل است که افزودن فاکتورهای بی اثر باعث افزایش R-sq می‌شود که این به امر به خودی خود مطلوب نیست؛ اما به دلیل اینکه R-sq (adj) درجات آزادی داده را در نظر می‌گیرند، اضافه شدن پارامترهای بی‌اثر و اضافی کیفیت مدل را کم نمی‌کند. لذا نزدیک بودن این دو عدد مناسب بودن مدل را نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۶ ضرایب هر فاکتور بدست آمد و شکل نهایی تابع حالت حدی توسعه داده شده به شکل رابطه (۹) خواهد بود

$$R = 165878979 + 31738273 Hs + 420533 WaveD + 42794569 T - 2256350 Hs^2 - 2259 WaveD^2 - 4575823 T^2 - 15929 Hs WaveD + 4008562 Hs T - 754 WaveD T \quad (9)$$

پس از غربالگری پارامترهای نهایی مشخص شدند. بر اساس جدول ۴ اثرات پارامترهایی که مقدار p-value در آنها کمتر از ۰/۰۵ باشد شاخص در نظر گرفته می‌شوند [۳۹] و پارامترهای دیگر عملاً تأثیری در سطح پاسخ ایجاد نمی‌کنند. پس از ایجاد طرح‌ها با روش باکس بنکن، اجراهای هیدرودینامیک با مشخصات پارامترها در سطوح تعیین شده به صورت تصادفی و در یک بلوک انجام شد. ترتیب و تنش‌های فون میز نتیجه، در جدول ۵ نشان داده شده است. این مسأله به این دلیل است که عوامل خارجی غیر قابل کنترل مانند روز بر این فرآیند تأثیری ندارند. با دریافت تاریخچه زمانی، نیروها بر المان میتینگ وارد می‌شوند و در نهایت بیشترین تنش فون میز ایجاد شده به عنوان پاسخ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکل ۸، هیستوگرام و نمودار احتمال باقیمانده‌ها کاملاً به شکل نرمال هستند و ترتیب و مقدار باقیمانده‌ها کاملاً هیچ رویه‌ای را دنبال نمی‌کنند که کیفیت مدل را نشان می‌دهد.

با توجه به کیفیت برازش معادله را می‌توان بدون انجام تحلیل‌های



شکل ۸. باقیمانده‌ها در مدل باکس بنکن؛ (الف) نمودار احتمال نرمال، (ب) هیستوگرام باقیمانده‌ها، (ج) مقادیر باقیمانده بر اساس ترتیب اجراها، (د) مقادیر باقیمانده بر اساس مقدار برازش

Fig. 8. Residuals in the Box Behnken Model (a) Normal Probability plot, (b) Histogram, (c) Versus orders, (d) Versus Fitness of 4.8 mm

جدول ۶. جدول تحلیل واریانس مدل باکس بنکن

Table 6. ANOVA table of Box Behnken model

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	2.63E+16	2.92E+15	57.08	0
Linear	3	2.30E+16	7.66E+15	149.54	0
Hs	1	2.08E+16	2.08E+16	407.18	0
WaveD	1	5.63E+12	5.63E+12	0.11	0.754
T	1	2.12E+15	2.12E+15	41.32	0.001
Square	3	2.87E+15	9.55E+14	18.66	0.004
Hs*Hs	1	3.96E+13	3.96E+13	0.77	0.419
WaveD*WaveD	1	1.24E+15	1.24E+15	24.15	0.004
T*T	1	1.84E+15	1.84E+15	36.02	0.002
2-Way Interaction	3	4.68E+14	1.56E+14	3.05	0.131
Hs*WaveD	1	1.19E+13	1.19E+13	0.23	0.65
Hs*T	1	4.56E+14	4.56E+14	8.9	0.031
WaveD*T	1	90000000000	90000000000	0	0.968

جدول ۷. کیفیت برازش

Table 7. Regression summary

R-sq	R-sq (adj)
99.04%	97.30%

جدول ۸. ترتیب و نتایج اجراها در روش تاگوچی (رویکرد دوم)

Table 8. Run orders and results of in Taguchi method (second approach)

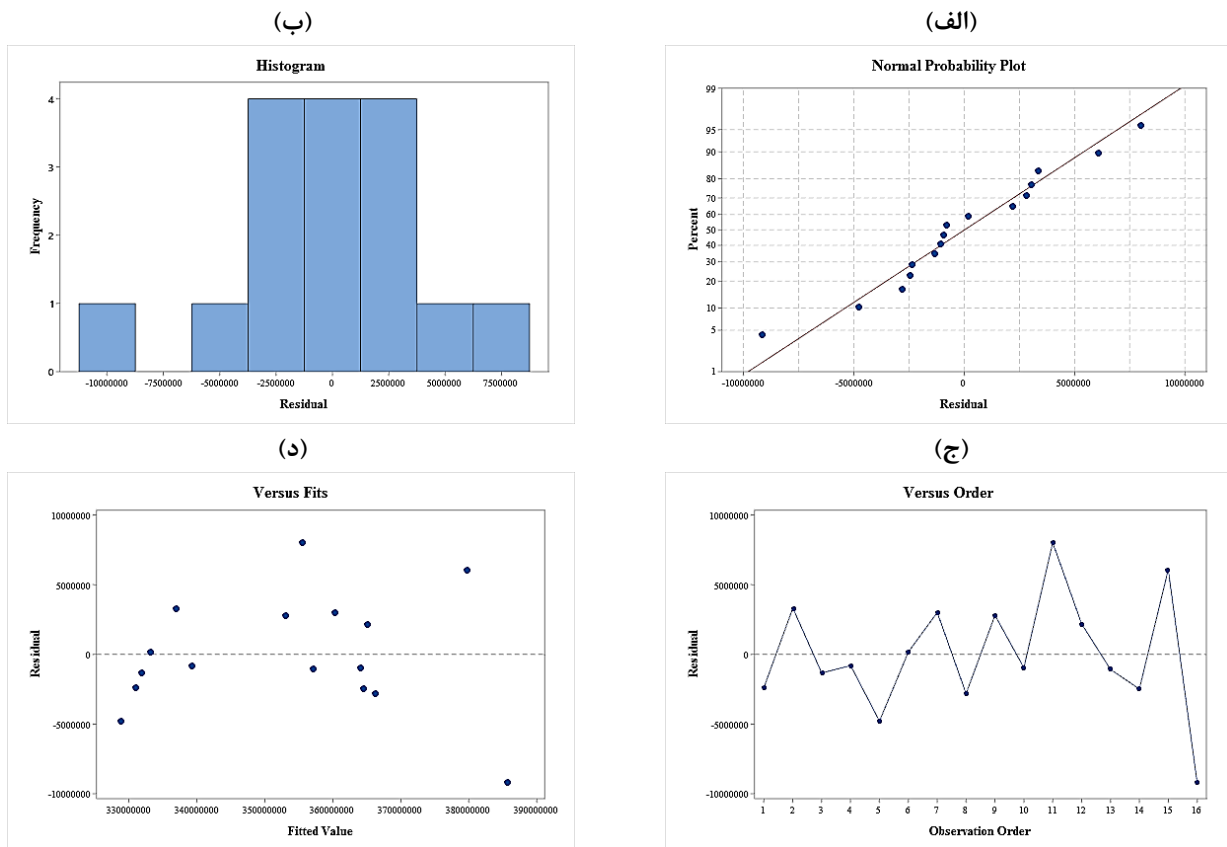
ترتیب اجراها	ارتفاع موج مشخصه (m)	پریود موج (s)	جهت موج (degree)	جهت جریان (degree)	سرعت جریان (m/s)	سرعت باد (m/s)	جهت باد (degree)	تنش فون میزس (Pa)	مقدار برازش (Pa)	باقیماندها
1	0.04	2.2	0	0	0.1	4	0	3.29E+08	3.3E+08	1.24E-01
2	0.04	3.67	90	90	0.1	12	90	3.40E+08	3.4E+08	-1.62E-02
3	0.04	5.14	180	180	1	4	90	3.30E+08	3.3E+08	-1.62E-02
4	0.04	6.62	270	270	1	12	0	3.38E+08	3.4E+08	1.24E-01
5	0.843	2.2	90	180	1	12	0	3.24E+08	3.2E+08	-2.64E-01
6	0.843	3.67	0	270	1	4	90	3.33E+08	3.3E+08	-6.39E-02
7	0.843	5.14	270	0	0.1	12	90	3.63E+08	3.6E+08	-6.39E-02
8	0.843	6.62	180	90	0.1	4	0	3.63E+08	3.6E+08	-2.64E-01
9	1.646	2.2	180	270	0.1	12	90	3.56E+08	3.6E+08	1.76E-01
10	1.646	3.67	270	180	0.1	4	0	3.63E+08	3.6E+08	1.56E-01
11	1.646	5.14	0	90	1	12	0	3.64E+08	3.6E+08	1.56E-01
12	1.646	6.62	90	0	1	4	90	3.67E+08	3.7E+08	1.76E-01
13	2.45	2.2	270	90	1	4	90	3.56E+08	3.6E+08	-9.63E-02
14	2.45	3.67	180	0	1	12	0	3.62E+08	3.6E+08	-1.62E-02
15	2.45	5.14	90	270	0.1	4	0	3.86E+08	3.9E+08	-1.62E-02
16	2.45	6.62	0	180	0.1	12	90	3.77E+08	3.8E+08	-9.61E-02

با روش قبل مدل از کیفیت کمتر برازش برخوردار است که این موضوع در جدول ۱۰ نشان داده شده است. همچنین مقادیر p-value برای هر پارامتر در جدول ۹ نشان داده شده است. بر اساس نتایج این جدول (آنوا) ضرایب رابطه بین پارامترهای محیطی و تنش فون میزس بدست می‌آید. شکل نهایی این تابع حالت حدی به شکل رابطه (۱۰) است.

$$R = 321274180 + 15384472 Hs + 4906288 T + 14364 WaveD - 14726 CD - 14179119 CV - 68901 WV - 8675 WD \quad (10)$$

۴-۲- مدل رویکرد دوم (روش طراحی تاگوچی)

در مدل تاگوچی بر اساس طرح ۱۱۶ تعداد ۱۶ اجرا انجام شد که سطوح چارمترها، نتایج حداکثر تنش فون میزس به وقوع پیوسته، مقدار برازش شده و باقیمانده‌ها در جدول ۸ مشخص شده است. بطور مشابه، باقیمانده‌ها در مدل تاگوچی نیز بدون روندی خاص و هبستوگرام و نمودار احتمال نیز توزیعی تقریباً نرمال دارند. با توجه به تعداد پارامترهای بیشتر در این رویکرد تنها فاکتورهای درجه اول در مدل شامل می‌شوند. پارامترهای شاخص به ترتیب ارتفاع موج مشخصه، پریود و سرعت جریان است. با نتیجه‌ای کاملاً مشابه پارامترهای باد کمترین اهمیت را در روش فلوت‌اور دارند. در مقایسه



شکل ۹. باقیمانده‌ها در مدل تاگوچی؛ (الف) نمودار احتمال نرمال، (ب) هیستوگرام باقیمانده‌ها، (ج) مقادیر باقیمانده بر اساس ترتیب اجراها، (د) مقادیر باقیمانده بر اساس مقدار برازش

Fig. 9. Residuals in the Taguchi Model (a) Normal Probability plot, (b) Histogram, (c) Versus orders, (d) Versus Fits

جدول ۹. جدول تحلیل واریانس مدل تاگوچی

Table 9. ANOVA table of Taguchi model

Source	DF	Coef	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression constant	7	3.21E+08	4.82E+15	6.89E+14	20.72	0
Hs	1	15384472	3.05E+15	3.05E+15	91.88	0
T	1	4906288	1.04E+15	1.04E+15	31.42	0.001
WaveD	1	14364	3.34E+13	3.34E+13	1.01	0.345
CD	1	-14726	3.51E+13	3.51E+13	1.06	0.334
CV	1	-1.4E+07	6.51E+14	6.51E+14	19.59	0.002
WV	1	-68901	1.22E+12	1.22E+12	0.04	0.853
WD	1	-8675	2.44E+12	2.44E+12	0.07	0.793

جدول ۱۰. کیفیت برازش مدل تاگوچی

Table 10. Regression summary for Taguchi model

R-sq	R-sq (adj)
94.77%	90.20%

جدول ۱۱. تحلیل قابلیت اطمینان در روش باکس بنکن

Table 11. Reliability analysis of Box Behnken method

Box Behnken Design					
Hs and T Correlation	Yield Stress	Coefficient of variation	FORM	SORM	MCS
0	Y COV	0.05	3.63886	3.76165	3.71401
		0.075	2.97046	3.07611	3.06841
		0.1	2.44868	2.53758	2.5267
0.5	Y COV	0.05	3.40946	3.5193	3.53228
		0.075	2.81391	2.90713	2.91106
		0.1	2.34659	2.4243	2.41688
0.8	Y COV	0.05	3.42862	3.51105	3.55778
		0.075	2.78041	2.86034	2.86486
		0.1	2.30978	2.37429	2.37347

تابع حالت حدی با روش سطح پاسخ

$$g = Y - (165878979 + 31738273 Hs + 420533 WaveD + 42794569 T - 2256350 Hs^2 - 2259 WaveD^2 - 4575823 T^2 - 15929 HsWaveD + 4008562 HsT - 754 WaveDT)$$

تابع حالت حدی با روش تاگوچی

$$g = Y - (321274180 + 15384472 Hs + 4906288 T + 14364 WaveD - 14726 CD - 14179119 CV - 68901 WV - 8675 WD)$$

۳-۴-۱- روش سطح پاسخ

پس از انجام تحلیل قابلیت اطمینان برای رویکرد نخست (روش شناسی سطح پاسخ)، نتایج در جدول ۱۱ نشان داده شده است. فارغ از مقدار همبستگی ارتفاع موج مشخصه و پیوند موج، با افزایش عدم قطعیتها

۳-۴- تحلیل قابلیت اطمینان

هدف از انجام تحلیل قابلیت اطمینان المان میتینگ، بررسی عدم قطعیتها برای این نصب است. المان میتینگ علاوه بر تأثیرپذیری از عوامل خارجی به عدم قطعیتها در فولاد استفاده شده نیز بستگی دارد. از این رو تابع حالت حدی همانطور که در بخش ۲ گفته شد به جهت نشان دادن حداقل خرابی در فولاد است که با این کار عدم قطعیتها در فولاد نیز در مطالعه شامل می‌شوند. در این مطالعه عدم قطعیتها برای فولاد در سه حالت مورد بررسی قرار گرفته است تا اثر آنها مورد ارزیابی قرار گیرد. مشخصات آماری امواج با استفاده از پژوهش کامرانزاد و همکاران [۲۵] و در مورد دیگر پارامترها به این دلیل که پژوهشی صورت نگرفته فرض شده است و برای هر دو شرط یکسان و بدون تغییر اعمال شده است. ارتفاع موج مشخصه و پیوند موج در سه حالت بدون همبستگی، ۰/۵ و ۰/۸ فرض شده است. دیگر پارامترها مستقل فرض شده‌اند. همچنین برای صحت‌سنجی و بررسی نزدیکی به روش FORM و یا SORM از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است.

جدول ۱۲. تحلیل قابلیت اطمینان در روش تاگوچی

Table 12. Reliability analysis of Taguchi method

Taguchi Design					
Hs and T Correlation	Yield Stress	Coefficient of variation	FORM	SORM	MCS
0	Y COV	0.05	4.08708	4.0747	4.06516
		0.075	2.88599	2.87021	2.85058
		0.1	2.20675	2.19235	2.17905
0.5	Y COV	0.05	3.89576	3.88451	3.84613
		0.075	2.82473	2.80748	2.79252
		0.1	2.18126	2.16356	2.15623
0.8	Y COV	0.05	3.79116	3.78059	3.74555
		0.075	2.78884	2.77091	2.75798
		0.1	2.16612	2.14659	2.14204

روش‌شناسی سطح پاسخ از روش پلاکت برمان برای غربالگری و از روش باکس بنکن برای بهینه‌سازی و ساخت تابع حالت حدی استفاده شد. در مقابل در رویکرد دوم از روش تاگوچی استفاده شد. داده‌های مورد استفاده برای ساخت این تابع‌های حالت حدی حاصل از اجراهای هیدرودینامیکی و اجزا محدود بود؛ به صورتی که نتایج خروجی مدل هیدرودینامیکی به صورت بارهای وارده بر مدل اجزا محدود المان میتینگ وارد و حداکثر تنش فون میزس حاصله در بدنه خارجی المان میتینگ برداشت شد. با ساخت این توابع حالت حدی ارزیابی تحلیل قابلیت اطمینان انجام شد. در رویکرد اول به دلیل حذف شدن پارامترهای غیر شاخص و مدل درجه دو کامل کیفیت برازش بیشتر و دقت مدل بیشتر بدست آمد؛ اما در مدل دوم به دلیل تعداد کمتر اجرا، تعداد پارامتر بیشتری قابل بررسی است که در مواردی که هزینه محاسباتی زیاد است، مهم است. به منظور بررسی عدم قطعیت‌ها در فولاد، تنش جاری شدن نیز مانند دیگر پارامترهای محیطی تصادفی در نظر گرفته شد و تابع حالت حدی نهایی فاصله خرابی و ایمنی به صورت تفریق تنش جاری شدن از تنش ناشی از شرایط محیطی محاسبه شد. نتایج زیر مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش معطوف به دو هدف اصلی است.

- در نصب فلوت‌اور به ترتیب، ارتفاع موج مشخصه، پرپود موج، سرعت جریان و جهت موج اثر شاخص‌تری بر افزایش نیروهای وارد بر المان میتینگ دارند.
- پارامترهای باد شامل سرعت و جهت باد تأثیر کمی بر تغییرات

در تنش جاری شدن فولاد، شاخص قابلیت اطمینان به طوری محسوس کاهش می‌یابد. از سویی دیگر افزایش همبستگی بین ارتفاع موج مشخصه تأثیر بسزایی در کاهش شاخص قابلیت اطمینان نشان نمی‌دهد. شبیه‌سازی مونت‌کارلو این مسأله را نمایان می‌سازد که روش قابلیت اطمینان درجه دو به تابع حالت حدی ساخته شده نزدیک تر است، چرا که نتایج این روش قابلیت اطمینان در تمامی موارد به شبیه‌سازی مونت‌کارلو نزدیک‌تر هستند.

۴-۳-۲- روش تاگوچی

در رویکرد دوم اثر عدم قطعیت‌ها در تنش جاری شدن فولاد، بر کاهش شاخص قابلیت اطمینان محسوس‌تر است. همچنین در این رویکرد افزایش همبستگی بین ارتفاع موج مشخصه و پرپود موج باعث کاهش بیشتر بتا می‌شود. به دلیل خطی بودن تابع حالت حدی، مقادیر بتا در روش‌های قابلیت اطمینان درجه یک و دو و شبیه‌سازی مونت‌کارلو به یکدیگر نزدیک‌تر هستند. نتایج در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

۵- خلاصه و نتیجه‌گیری نهایی

در این مقاله دو هدف اصلی بررسی شد؛ بررسی شرایط محیطی و متعاقباً ساخت تابعی حالت حدی و ارزیابی قابلیت اطمینان المان میتینگ در نصب فلوت‌اور. به منظور ساخت این تابع حالت حدی از دو رویکرد بر مبنای استفاده از روش‌شناسی سطح پاسخ و روش تاگوچی استفاده شد. در

- [6] A. Tahar, J. Halkyard, A. Steen, L. Finn, Float Over Installation Method—Comprehensive Comparison Between Numerical and Model Test Results, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 128(3) (2006) 256262-.
- [7] Z. Hu, X. Li, W. Zhao, X. Wu, Nonlinear dynamics and impact load in float-over installation, *Applied Ocean Research*, 65 (2017) 60-78.
- [8] M. Chen, R. Eatock Taylor, Y.S. Choo, Time domain modeling of a dynamic impact oscillator under wave excitations, *Ocean Engineering*, 76 (2014) 40-51.
- [9] M. Chen, R. Eatock Taylor, Y.S. Choo, Investigation of the complex dynamics of float-over deck installation based on a coupled heave-roll-pitch impact model, *Ocean Engineering*, 137 (2017) 262-275.
- [10] L. Sun, R. Eatock Taylor, Y.S. Choo, Multi-body dynamic analysis of float-over installations, *Ocean Engineering*, 51 (2012) 1-15.
- [11] A. Kocaman, D. Kim, J. Seto, Float-over of Arthit PP Deck, in: *Offshore Technology Conference*, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2008, pp. 11.
- [12] B.-S. Tan, S. Sahasrabudhe, J.A. Haney, B.-L. Leow, Arthit Field Development: Float-over Hardware Design and Issues, in: *Offshore Technology Conference*, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2008, pp. 11.
- [13] J.-J. Jung, W.-S. Lee, H.-S. Shin, Y.-H. Kim, Evaluating the Impact Load On the Offshore Platform During Float-over Topsides Installation, in: *The Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, International Society of Offshore and Polar Engineers, Osaka, Japan, 2009, pp. 6.
- [14] A.S. Nowak, K.R. Collins, *Reliability of Structures*, CRC Press, 2012.
- [15] W. Zhao, Z. Qiu, An efficient response surface method and its application to structural reliability and reliability-based optimization, *Finite Elements in Analysis and Design*, 67 (2013) 34-42.
- [16] W. Zhang, C. Jeong, A.v. Spreeken, Floatover Feasibility in Brazilian Sea Water, in: *OTC Brazil*, Offshore Technology Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2013, pp. 10.
- [17] M. Seij, H. de Groot, State of the Art in Float-Overs, in: *Offshore Technology Conference*, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, U.S.A., 2007, pp. 9.
- [18] G. Liu, H. Li, HIDECK Floatover Technology, in: G. Liu, H. Li (Eds.) *Offshore Platform Integration and Floatover Technology*, Springer Singapore, Singapore, 2017, pp. 101-114.
- [19] G. Liu, H. Li, UNIDECK and SMARTLEG, in: G. Liu, H. Li (Eds.) *Offshore Platform Integration and Floatover Technology*, Springer Singapore, Singapore, 2017, pp. 115-129.

نیروهای وارد بر المان میتینگ ایفا می‌کند.

- اگرچه که جهت موج تأثیر کمتری نسبت به ارتفاع موج مشخصه و پریود بر نیروها دارد اما فاکتور درجه دو جهت موج اثری شاخص دارد.
 - اندرکنش پریود و ارتفاع موج مشخصه اثری شاخص بر نیروها دارند، اما افزایش همبستگی موج و پریود تأثیر عمده‌ای بر شاخص قابلیت اطمینان ندارند؛ به طوری که با افزایش همبستگی از ۰ تا ۰/۸ شاخص قابلیت اطمینان حدود ۷ درصد کاهش می‌یابد که شدت این کاهش از همبستگی ۰ تا ۰/۵ بیشتر است. البته باید در نظر داشت که تغییرات شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی خطی نیستند.
 - عدم قطعیت‌های فولاد به شکل نقطه تنش جاری شدن بر کاهش شاخص قابلیت اطمینان مشخص و غالب است؛ به طوری که تغییرات احتمال خرابی به صورت میانگین سی برابر کاهش می‌یابد.
- همان‌طور که پیشتر گفته شد سه رکن اساسی در انجام پروژه‌های نصب به روش فلوت‌اور طراحی سکو، طراحی و تحلیل تجهیزات فلوت‌اور و اثر بارها و شرایط محیطی هستند. در این پژوهش اثر شرایط محیطی ناشی از امواج، جریان و باد بر طراحی و تصمیم‌گیری برای انتخاب المان میتینگ از نقطه نظر قابلیت اطمینان دیده شد و تابعی که شرایط محیطی را به تنش وارد بر المان میتینگ مرتبط می‌سازد توسعه داده شد. این تابع در پروژه‌های آینده قابل استفاده است. در نهایت با توجه به نتایج پیشنهاد نمی‌شود که اثرات پارامترهای غیرشاخص به طور کلی حذف شود؛ بلکه تأکید بر در نظر داشتن اثرات و اهمیت پارامترهای شاخص است.

منابع

- [1] L. Lorenti, A. Grime, B. Raine, Design and Installation of the Malampaya Depletion Compression Platform, in: *Offshore Technology Conference*, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2016, pp. 10
- [2] G. Liu, H. Li, Floatover Technology, in: G. Liu, H. Li (Eds.) *Offshore Platform Integration and Floatover Technology*, Springer Singapore, Singapore, 2017, pp. 87-99.
- [3] G. Liu, H. Li, Platform Integration and Stationing, in: G. Liu, H. Li (Eds.) *Offshore Platform Integration and Floatover Technology*, Springer Singapore, Singapore, 2017, pp. 35-86.
- [4] K.e. al., Float-Over Installation of Topsides, in: *Technip Presentation*, Technip, 2013.
- [5] A.-A. el Mouhandiz, J. Bokhorst, Analysis and Offshore Support for the Float-Over of a 24,250mT Topsides on the North West Shelf, in: 2013.

- of analytical methods, *Analytica Chimica Acta*, 597(2) (2007) 179-186.
- [34] G.a.K. Taguchi, S., *Taguchi Methods Orthogonal Arrays and Linear Graphs: Tools for Quality Engineering*, American Supplier Institute, 1987.
- [35] G. Taguchi, *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*, 7th Reprint. ed., Tokyo: Asian productivity organization, 1990.
- [36] R.S. Rao, C.G. Kumar, R.S. Prakasham, P.J. Hobbs, *The Taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications: a critical appraisal*, *Biotechnol J*, 3(4) (2008) 510-523.
- [37] S.-Y. Yang, C.-W. Chen, J.-C. Chou, *Investigation on the sensitivity of TiO₂:Ru pH sensor by Taguchi design of experiment*, *Solid-State Electronics*, 77 (2012) 82-86.
- [38] D. Jurkó, J. Stiernstedt, *Investigation of High Temperature Co-fired Ceramics sintering conditions using Taguchi Design of the experiment*, *Ceramics International*, 40(7, Part B) (2014) 10447-10455.
- [39] R.H.a.M. Myers, Douglas C., *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, Fourth Edition ed., John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [40] G. Kaya Uyanık, N. Güler, *A Study on Multiple Linear Regression Analysis*, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 106 (2013) 234-240.
- [41] L. Swiler, A. Giunta, *Aleatory and epistemic uncertainty quantification for engineering application* (2007).
- [42] E.E. Nikolaidis, Ghiocel, D. (Ed.), Singhal, S. (Ed.), *Engineering Design Reliability Handbook*, CRC Press, 2004.
- [43] H. Am, N. Lind, *An Exact and Invariant First Order Reliability Format*, *Journal of Engineering Mechanics*, 100(1974)
- [44] M. Mahsuli, T. Haukaas, *Computer Program for Multimodel Reliability and Optimization Analysis*, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(1) (2013) 87-98.
- [45] S. Chandrasekaran, Srinivasan Chandrasekaran. 2016a. *Offshore structural engineering: Reliability and Risk Assessment*. CRC Press, Florida, ISBN: 978-14-987-6519-0, 2015.
- [20] K. Chaitanya, S.B. Nair, *Design of Leg Mating Unit for Float-Over Installation of Decks*, in, 2013.
- [21] W.E. Cummins, *The impulse response function and ship motions*, David Taylor Model Basin Washington DC, 1962.
- [22] José A. Armesto, R. Guanche, F.d. Jesus, A. Iturrioz, Iñigo J. Losada, *Comparative analysis of the methods to compute the radiation term in Cummins' equation*, *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 1(4) (2015) 377-393.
- [23] T.F. Ogilvie, *Recent progress toward the understanding and prediction of ship motions*, in: *Proceedings of the 5th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Bergen, Norway, 1964.
- [24] S.K. Peter, et al, *Numerical Modelling of Installation Aids for Platform Installation*, Saipem UK, UK
- [25] B. Kamranzad, A. Etemad-shahidi, V. Chegini, *Assessment of wave energy variation in the Persian Gulf*, *Ocean Engineering*, 70 (2013) 72-80.
- [26] I.R.M. (IRM), *LEG MATING UNITS*, in, *Industrial Rubber Moulders (IRM)*.
- [27] P.J. Blau, *Friction Science and Technology*, Taylor & Francis, 1995.
- [28] M. Shahzad, A. Kamran, M.Z. Siddiqui, M. Farhan, *Mechanical Characterization and FE Modelling of a Hyperelastic Material*, *Materials Research*, 18 (2015) 918-924.
- [29] K. Vanaja, R.H. Shobha Rani, *Design of Experiments: Concept and Applications of Plackett Burman Design*, *Clinical Research and Regulatory Affairs*, 24(1) (2007) 1-23.
- [30] J. Antony, *5 - Screening Designs*, in: J. Antony (Ed.) *Design of Experiments for Engineers and Scientists (Second Edition)*, Elsevier, Oxford, 2014, pp. 51-62.
- [31] R.L. Plackett, J.P. Burman, *The Design of Optimum Multifactorial Experiments*, *Biometrika*, 33(4) (1946) 305-325.
- [32] J. Wang, W. Wan, *Experimental design methods for fermentative hydrogen production: A review*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34
- [33] S.L.C. Ferreira, R.E. Bruns, H.S. Ferreira, G.D. Matos, J.M. David, G.C. Brandão, E.G.P. da Silva, L.A. Portugal, P.S. dos Reis, A.S. Souza, W.N.L. dos Santos, *Box-Behnken design: An alternative for the optimization*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Shabakhty, M. Kasaeyan, E. Arabshahy, *Reliability Analysis of Leg Mating Unit under Impact Loads Due To Floatover Installation*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(11) (2022) 4989-5008.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18673.6921

