

## شبیه‌سازی مدل محاسباتی ساده‌شده سازه جک‌تی با تیر طره‌ای تیموشنکو و تأیید آزمایشگاهی

فرهاد حسینلو

دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۷ - دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۱/۱۸)

**چکیده** - امروزه بسیاری از مدل‌های پیچیده، به‌طور معمول مدل‌های اجزای محدود، در تحلیل سازه سکوه‌های جک‌تی استفاده شده‌اند. با این حال، این مدل‌های فراگیر و جامع به راحتی در عرف مهندسی (یعنی در عمل) به‌خصوص در مرحله طراحی اولیه به‌راحتی مورد قبول واقع نمی‌شوند. از آنجا که تحلیل دینامیکی سکوه‌های جک‌تی بسیار پیچیده است، ایجاد یک روش محاسباتی ساده برای ارزیابی عملکرد دینامیکی چنین سازه‌هایی بسیار سودمند خواهد بود. در این کار از یک مدل ساده اصلاح شده برای محاسبه پاسخ‌های دینامیکی سکوه‌های جک‌تی استفاده شده است. در این راستا، برای غلبه بر مشکل عدم اطمینان در مدل‌سازی، از ساده‌سازی مدل مبتنی بر داده‌های مودال ارتعاشی و معادله تیر تیموشنکو استفاده شده است. با توجه به روش برازش منحنی روی مجموعه توابع پاسخ فرکانسی برای استخراج پارامترهای مودال، از مفهوم چگالی طیف توان نیز برای تأیید مدل محاسباتی پیشنهادی استفاده شده است. در این راستا، ابتدا رفتار مدل فیزیکی در حوزه فرکانس ارائه و سپس با نتایج طیفی اخذ شده از مدل ساده شده براساس تیر تیموشنکو مقایسه شده است. چون تست مودال مدل فیزیکی تحت نیروی نوین سفید انجام گرفته است، لذا پاسخ‌های دینامیکی مدل ساده شده نیز تحت نیروی نوین سفید با نرم‌افزار متلب استخراج شده است. در این مقاله، یک مدل ریاضی کاربردی تولید شده است، و نشان داده شده است که مدل ساده اصلاح شده می‌تواند ویژگی‌های واقعی سازه‌ای را منعکس کند.

واژه‌های کلیدی: سکوی جک‌تی فراساحلی، مدل محاسباتی ساده، رفتار دینامیکی، داده‌های مودال ارتعاشی.

## Simulation of Simplified Computational Model of Jacket Structure with Timoshenko Cantilever Beam and Experimental Signature

F. Hosseinlou

Department of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chaman University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

**Abstract:** Today many complex models, typically finite element models, have been employed in the analysis of jacket offshore structures. However, these comprehensive models are not readily adopted in engineering practice, especially during the preliminary design stage. As the dynamic analysis of jacket platforms is very complicated, it will be very advantageous to make a simplified computational method to assess dynamic performance of such structures. In this work a refined simplified model has

\* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: F.Hosseinlou@scu.ac.ir

been utilized to calculate dynamic responses of jacket platforms. In this regard, the model simplification based on the vibration modal data and Timoshenko's beam equation has been employed to overcome the uncertainty problem in modeling. According to the curve fitting method on the set of frequency response functions to derive modal parameters, the concept of power spectrum density has been also used to confirm the proposed computational model. In this regard, first the behavior of the physical model in the frequency domain has been presented and compared with the spectral results obtained from the simplified model based on Timoshenko beam. Because the modal test of the physical model was performed under the force of white noise, the dynamic responses of the simplified model were also extracted under the force of white noise using MATLAB software. In this paper, an applied mathematical model has been produced, and it has been demonstrated that the refined simplified model can reflect the real structural features.

**Keywords:** Offshore jacket platform, Simplified computational model, Dynamic behavior, Vibration modal data.

## فهرست علائم

$\delta W^*$	انرژی اضافی	D	قطر خارجی شمع (متر)
$\delta F_i^*$	نیروی مجازی	u	انحراف جانبی خط مرکزی تیر
$N^*$	نیروی محوری مجازی	N	بار فشاری محوری ثابت
$Q^*$	نیروی برشی مجازی	q(z,t)	تحریک لرزه‌ای
$\theta$	زاویه چرخش	$S_a(\omega)$	چگالی طیفی توان
$\varphi_j(z)$	توابع ویژه	$\bar{a}$	طول عضو مورب
$M^*$	لنگر خمشی مجازی	$\{\bar{u}\}$	جابه‌جایی
$(EA)_{eq}$	سختی محوری معادل	$m_a$	مقدار جرم افزوده
$(EI)_{eq}$	سختی خمشی معادل	$\Delta_i$	جابه‌جایی مجازی
$(GA_s)_{eq}$	صلبیت برشی معادل	$\tau$	انرژی جنبشی حرکت سیال

## ۱- مقدمه

نتایج مورد نظر با دقت بالا دست یافت [۲]. با این وجود، طرح روش‌های مرتبطی که ضمن ساده‌تر کردن فرایند پیچیده‌ای همانند ارزیابی عملکرد دینامیکی سرتاسری سازه‌ها، از دقت عملکرد بالا و مورد قبولی برخوردار باشد، همچنان موضوع مطالعات دامنه‌داری است که تا رسیدن به افق آرمانی آن ناگزیر به حل مسائل مختلف باقی‌مانده بسیاری خواهد بود. به‌خصوص در ارتباط با سازه‌های فراساحلی (جکت)، به‌گواه ادبیات فنی موجود، به‌دلیل مواجه شدن با بسیاری از مشکلات عملی در چنین روش‌هایی، به‌عنوان مثال، پیچیدگی ساختاری، بار و شرایط عملیاتی و مشکلات ناشی از انواع مختلفی از عدم قطعیت‌ها، تلاش برای توسعه بیشتر این تکنیک‌ها برای سکوه‌های دریایی تا حد زیادی صورت نگرفته است. به‌همین دلیل، در طی سال‌های پیشین، تعداد کمی از محققان به این مورد پرداخته‌اند [۳]. علاوه بر این، با وجود تلاش‌های مذکور،

ارزیابی عملکرد دینامیکی، یکی از مهم‌ترین مسائل در حوزه مهندسی و در مرحله بهره‌برداری از سازه‌های فراساحلی است. این موضوع به‌دلیل عدم اطمینان موجود در مشخص کردن بسیاری از پارامترهای حائز اهمیت در طرح نهائی، معمولاً امر پیچیده‌ای قلمداد می‌شود. از طرفی، امکان تطبیق نتایج حاصل از آزمایش‌های مربوط به مدل فیزیکی مقیاس شده سازه، با نتایج حاصل شده از مدل اجزای محدود متناظر نیز، یکی از الزامات مهم در بررسی رفتار دینامیکی و روند تشخیص عملکرد سازه‌ها در طول بهره‌برداری به‌شمار می‌رود [۱]. در این زمینه، با به‌روزرسانی مدل عددی با استفاده از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش ارتعاشات و پردازش سیگنال، می‌توان به مدل اجزای محدود مناسبی رسید و در نهایت به

نتایج دقیق تری در محاسبات ارائه می‌دهند. با این حال، این مدل‌های جامع در کاربرد مهندسی به‌خصوص در مرحله طراحی اولیه به‌راحتی اتخاذ نمی‌شوند. دلایل اصلی این امر را می‌توان در دو مورد، نیاز به منابع محاسباتی بزرگ و عدم وجود اطلاعات دقیق برای تنظیم مدل اجزای محدود دانست. در سال‌های گذشته مطالعاتی روی روش‌های محاسباتی ساده ارزیابی عملکرد سازه‌ها ارائه شده است به‌طوری که هم در هزینه‌ها و هم در زمان مربوط به این تحلیل‌ها صرفه جویی قابل توجهی انجام گیرد [۱۱]. در پژوهشی جهت تحلیل سکوه‌های ثابت فلزی دریایی از مدل ساده‌شده استفاده شده، به‌طوری که برای محاسبه مشخصات این مدل، از سختی و جرم‌های متمرکز معادل هر تراز از سازه بهره گرفته شده است [۱۲]. با استفاده از الگوریتم ساده ارائه شده در مطالعه [۱۲] می‌توان سکوه‌های مختلف یک حوزه را بررسی مقدماتی کرد و آنها را برای انجام مطالعات کامل‌تر از نظر رفتار در مقابل بار امواج دسته‌بندی کرد. در این مطالعه از فرمول‌بندی ساده‌ای استفاده شده و اثرات عدم قطعیت در آن لحاظ نشده است. هم‌چنین، در پژوهشی دیگر، رویکرد استفاده از روش شبه‌تحریر<sup>۳</sup> برای تحلیل پاسخ‌های لرزه‌ای تصادفی یک سکوی جکتی ارائه شده است [۱۳]. به‌عبارتی دیگر، یک روش ساده‌سازی مدل سکوی جکتی فراساحلی به‌صورت تیر طره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه مذکور، اثرات عدم قطعیت و صحت‌سنجی مناسب مدل صورت نگرفته است. از طرفی می‌دانیم، روش اجزای محدود یکی از ابزارهای قدرتمندی است که به‌طور گسترده در تشکیل مدل‌های تحلیلی سیستم‌های سازه‌ای به‌منظور ارزیابی نحوه رفتار و بررسی عملکرد سازه‌ها در هنگام وقوع بارهای متعارف و بیش از حد انتظار مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولی به‌دلایل گوناگون از جمله عدم توجه به جزییات مناسب و گاه لازم در شکل‌گیری مدل سازه، ساده‌سازی‌های هندسه مدل و عدم قطعیت‌های موجود در برآورد صحیح پارامترهای ورودی از جمله درجه‌گیری اتصالات، مقدار مدول الاستیسیته<sup>۴</sup>، ضریب پواسون و غیره، باعث می‌شود نتایج چنین مدل‌هایی

پژوهش‌های کمی وجود دارد که به‌طور مستقیم و هم‌زمان به اثرات عدم قطعیت و به استفاده از ساده‌سازی سازه سکوه‌های جکتی پرداخته باشد. مطالعه رفتار دینامیکی، تحلیل و طراحی سازه سکوه‌های جکتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، هر چند که شامل پیچیدگی‌هایی خاص اعم از عدم قطعیت‌ها، خطا در مدل‌سازی و نظایر آن هستند [۴ و ۵]. از جمله مسائل مطرح در پایش عملکرد سازه‌های جکتی طی طول عمر مفید آنها، اطمینان از عملکرد مناسب سیستم سازه‌ای است؛ که روش‌های به‌روزرسانی مدل عددی از بخش‌های مهم و حیاتی آن به‌شمار می‌روند. در این راستا، یک مدل اجزای محدود تحلیلی اغلب نیازمند به‌روزرسانی با استفاده از تعداد محدودی مقادیر ویژه اندازه‌گیری شده از یک سازه واقعی است. از این‌رو، تشکیل مدل‌های ریاضی دقیق از سازه‌های جکتی، یکی از ضروریات مهم در طراحی و تحلیل این سازه‌ها است [۶]. این مدل‌های ریاضی بسیار مهم هستند، زیرا در طراحی و ارزیابی سازه‌ها (نوعاً سکوه‌های دریایی)، نیاز به پیش‌بینی دقیق از پاسخ‌های دینامیکی تحت بارگذاری واقعی از جمله موج، جریان و زلزله وجود دارد. در عمل، مدل‌های ریاضی این چنینی به‌طور هم‌زمان با به‌کارگیری روش‌های تجربی و عددی از جمله تحلیل اجزای محدود و تست مودال<sup>۲</sup> ایجاد می‌شوند. با توجه به پیچیدگی‌های خاص سازه سکوه‌های دریایی، نتایج پیش‌بینی شده توسط روش‌های عددی قادر به انعکاس مشخصات دینامیکی واقعی اندازه‌گیری شده با روش‌های تجربی نیستند. بنابراین روش‌هایی در راستای برطرف کردن این ضعف و هم‌چنین به حداقل رساندن اختلافات بین پارامترهای مودال اندازه‌گیری شده و عددی باید ارائه و توسعه داده شوند [۷]. بررسی اجمالی تحقیقات گذشته حاکی از آن است که تلاش محققان بیشتر روی توسعه مدل سه‌بعدی برای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های دریایی بوده است. مطالعات بسیاری در زمینه تحلیل عددی با این دیدگاه انجام شده است که استفاده از مدل محاسباتی پیچیده‌تر می‌تواند نتایج بسیار دقیقی را ارائه دهد [۸] - [۱۰]. این مدل‌ها از لحاظ تئوریک جامع‌تر و فراگیرتر هستند و

روش‌های عددی در مهندسی، سال ۴۰، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۰

متفاوت از واقعیت باشند. به این ترتیب پاسخ‌های به‌دست آمده از تحلیل این گونه مدل‌ها نیز می‌تواند بسیار گمراه‌کننده باشد. یکی از راه‌های مطمئن برای تأیید صحت مدل تحلیلی استفاده از نتایج آزمایش‌های ارتعاشی روی سازه‌هاست. رویکردهای آزمایشی نیز دارای مشکلاتی از قبیل تعداد محدود نقاط اندازه‌گیری شده، بازه فرکانسی محدود و پیچیدگی در اندازه‌گیری درجات آزادی و شکل مودها هستند. اما به دلیل پیشرفت‌های ایجاد شده در ابزار و روش‌های اندازه‌گیری امروزه پذیرفته شده است که نتایج حاصل از اندازه‌گیری در مقایسه با نتایج تئوری، قابل اطمینان‌تر هستند. برای محدود کردن فاصله بین مدل عددی و سازه حقیقی، مدل عددی سازه باید با استفاده از اطلاعات مودی اندازه‌گیری شده تصحیح یا به‌روزرسانی شود. باید توجه داشت که امکان خطاهای اندازه‌گیری نیز نباید غیر محتمل در نظر گرفته شوند [۱۴].

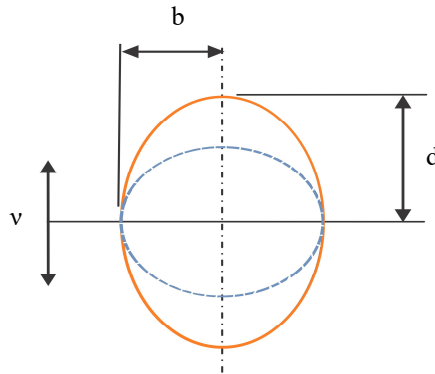
از این‌رو، ویژگی تحقیق حاضر انجام آزمایش مودال تجربی روی یک مدل فیزیکی آزمایشگاهی جهت صحت‌سنجی و ارزیابی مدل اجزای محدود ساده شده به‌کار برده شده در روش پیشنهادی است [۱۳]. به‌عبارتی دیگر، در مطالعه حاضر با استفاده از فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود ساده‌شده براساس تئوری تیر تیموشنکو، تا حد امکان فائق آمدن بر مسئله عدم قطعیت در مدل‌سازی نیز در طول فرایند، در نظر گرفته شده است. در نهایت، با جمع‌بندی مطالب گفته‌شده می‌توان این چنین اظهار کرد که هدف از مقاله حاضر، ارائه یک روش ساده‌سازی مدل سکوی جک‌تی فراساحلی با تکیه بر داده‌های آزمایشگاهی است به‌طوری که در آن به‌منظور رفع چالش‌ها و محدودیت‌های موجود در اعمال روش‌های ارائه شده قبلی، تکنیکی قوی و قابل اطمینان برای کاهش محاسبات در تحلیل عملکرد دینامیکی سازه‌های جک‌تی ارائه شده است.

## ۲- روش مدل‌سازی ساده

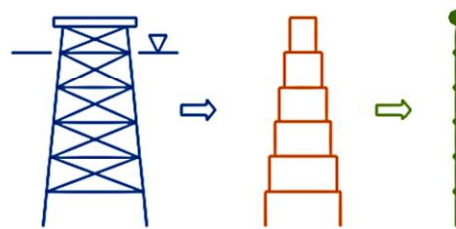
هدف اصلی مقاله، ارائه یک مدل ساده از سازه جک‌تی براساس داده‌های مودال آزمایشگاهی است. بنابراین تحلیل‌های انجام

شده در انتهای مقاله مربوط به صحت‌سنجی مدل ساده شده است و باید گفت که هدف اصلی ما شبیه‌سازی شرایط عملیاتی سازه نیست. همان‌طور که می‌دانیم در تدوین آیین‌نامه‌ها و در بحث دینامیک سازه‌ها (بخش طراحی) از سازه‌های ایده‌آل سازی شده برای پیش‌بینی رفتار سازه‌ها استفاده می‌کنند؛ این در حالی است که دنبال شبیه‌سازی رفتار واقعی سازه‌ها نیستند؛ چرا که این شبیه‌سازی خیلی پرهزینه، وقت‌گیر و حتی دشوار خواهد بود (پیچیدگی مدل‌سازی و وجود عدم قطعیت). براساس این توضیحات، هدفین مقاله ارائه مدل ساده‌ای است که براساس داده‌های آزمایش انجام شده در خشکی تهیه و تأیید شده است. لذا، اگر سازه براساس نیروهای وارد شده در خشکی، سالم به مقصد برسد و در سایت نصب شود، به احتمال زیاد در مقابل نیروی جریان مقاوم خواهد بود. در مورد تفاوت روش مورد استفاده در این تحقیق با روش ارائه شده در مقالات قبلی می‌توان گفت که در مقالات قبلی در بخش فرمول‌بندی ریاضی از روشی ساده و متفاوت از این مقاله استفاده شده است. به‌عبارتی با یک روش دستی و تقریبی، سختی اعضا برآورد شده؛ این در حالی است که در این مقاله از فرمول‌بندی قوی‌تری در بخش تحلیلی استفاده شده است. مطالعه حاضر یک اصل کار مجازی تعمیم‌یافته را در استخراج سختی معادل اتخاذ کرده است. افزون بر این، به موضوع تحلیل دینامیکی سازه جک‌تی با در نظر گرفتن اثر تلاطم آب نیز در فرمول‌بندی ریاضی اشاره شده است به‌طوری که در این مقاله، فقط بخش قبل از نصب سازه جک‌تی در سایت لحاظ شده است. بررسی اثرات اعمال شده بر سازه در مرحله حمل و نقل یعنی اثرات خستگی و نقص عضو در اتصالات در مدل فیزیکی (همان‌طور که در بالا گفته شد) موضوع بحث دیگری است که می‌تواند در کارهای تحقیقاتی در آینده مورد بررسی قرار گیرد.

سکوی فراساحلی جک‌تی یک سازه پیچیده است که در معرض بارهای مختلف محیطی از جمله بادهای، امواج، جریان‌ها، یخ یا زلزله قرار دارد. هم‌چنین لازم است که اندرکنش پیچیده پایه سکوی و خاک را در نظر گرفت، زیرا حرکت شالوده در این



شکل ۱- ارتعاش بیضوی گون مقطع پایه در جریان نامحدود



شکل ۲- ساده سازی مدل سازه جکته

$$\tau = \frac{1}{4} \rho \pi b^2 v^2 \quad (4)$$

که در آن  $\rho$  چگالی جرم مایع (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $b$  شعاع استوانه عمود بر جهت حرکت (متر) است، همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است. هم چنین  $v$  سرعت (متر بر ثانیه) است. مقدار جرم افزوده  $m_a$  آب در حال حرکت با سازه سکوی دریایی مرتعش در واحد طول به صورت زیر بیان می شود [۱۶]:

$$m_a = \rho \pi b^2 \quad (5)$$

شکل (۲) به طور نمادین روند ساده سازی سکوی جکته را نشان می دهد. این مطالعه یک اصل کار مجازی تعمیم یافته را در استخراج سختی معادل اتخاذ کرده است. برای جزئیات فرمول بندی ارائه شده در ادامه، به مراجع [۱۳ و ۱۷] مراجعه کنید.

در شکل (۳-الف)، جابه جایی مجازی  $\Delta_i$  المان تیر  $jk$  در معرض یک نیروی تعمیم یافته قرار دارد. براساس اصل کار مجازی، نیروی خارجی مجازی تعمیم یافته به صورت زیر است:

$$\delta W^* = \sum_{i=1}^n \delta F_i^* \Delta_i \quad (6)$$

که در آن،  $\delta W^*$  انرژی اضافی،  $\delta F_i^*$  نیروی مجازی  $\Delta_i$ ،

حالت با حالت زمین آزاد به طور قابل توجهی متفاوت است. در این مطالعه، هنگامی که شالوده تحت تحریکات خاص زمین است، یک مدل شمع معادل برای توصیف ویژگی های اندرکنش خاک - سازه استفاده شده است. اگر  $T$  فاصله سطح خاک تا انتهای پای گیرداری پایه باشد، می توان آن را با استفاده از فرمول های تجربی زیر تعیین کرد:

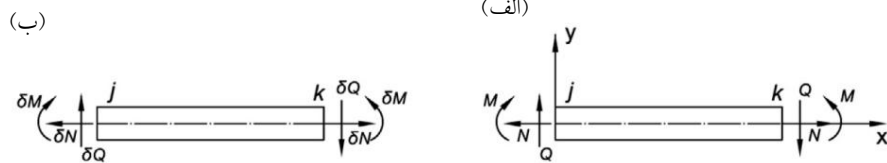
$$T = (7 - 8/5) D \quad (1) \text{ برای پی در لجن:}$$

$$T = (3/5 - 4/5) D \quad (2) \text{ برای پی در رس سخت:}$$

$$T = 6D \quad (3) \text{ برای خاک های نامعلوم:}$$

که در آن  $D$  قطر خارجی شمع (متر) است.

با ارتعاش سکوی فراساحلی، مقدار مشخصی از آب اطراف آن با شمع جابه جا می شود. به طور معمول، این می تواند به عنوان بخشی از مقدار آبی که با پایه سازه حرکت می کند، ساده سازی شود. این مقدار از حرکت آب، که به مثابه جرم افزوده است، به عنوان اینرسی به شمع سازه ها برای تحلیل پاسخ دینامیکی اضافه می شود. انرژی جنبشی در ارتباط با حرکت سیال در واحد طول یک شمع به صورت رابطه (۴) است [۱۵]:



شکل ۳- المان تیر معادل برای الف): سیستم بار خارجی واقعی و ب): سیستم بار مجازی

انرژی اضافی المان تیر معادل را می‌توان با رابطه (۷) تعیین کرد:

$$\bar{W}^* = \frac{1}{2} \sum F_i \Delta_i = \frac{1}{2} \sum \frac{F_i I_i}{E_i A_i} \quad (11)$$

که در آن  $F_i$  نیرویی است که بر المان  $\Delta_i$  اعمال می‌شود و  $\Delta_i$  جابه‌جایی در محل  $F_i$  در جهت مربوطه،  $I_i$  طول المان تیر  $\Delta_i$ ،  $A_i$  مساحت سطح مقطع و  $E$  مدول الاستیک است. صلیب خمشی معادل  $(EI)_{eq}$  و سختی برشی معادل  $(GA_S)_{eq}$  تیر از انرژی اضافی، استخراج می‌شوند.

شکل (۴) یک بخش معمولی از سازه خرپایی، بین دو کف سکوی دریایی که در معرض برخورد موج قرار دارد، را نشان می‌دهد؛ که در شکل، ارتفاع  $l$  و عرض  $h$  است. انرژی اضافی سازه خرپایی برابر است با:

$$\bar{W}_{jk}^* = \frac{1}{2} \left( \frac{F_i I_i}{E_c A_c} \right) = \frac{M^2 l}{h^3 E_c A_c} \quad (12)$$

رابطه (۱۲) را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت:

$$\frac{\partial \bar{W}_{jk}^*}{\partial M} = 1 \frac{\partial \bar{W}_{jk}^*}{\partial M} = 1 \frac{M}{(EI)_{eq}} \quad (13)$$

با ترکیب روابط (۱۲) و (۱۳)، سختی خمشی معادل تیر برابر است با:

$$(EI)_{eq} = \frac{h^3 E_c A_c}{2} \quad (14)$$

برای نیروی برشی روی تیر مطابق شکل (۵)، نیروی محوری اعمالی در عضو قطری برابر با:

$$F_i = \pm \frac{Qa}{2h}$$

و در آن  $a$  طول عضو مورب (قطری) است. انرژی اضافی را می‌توان به شرح رابطه (۱۴) نوشت:

جابه‌جایی واقعی  $\Delta_i$  است.

براساس اصل انرژی اضافی و حذف اثرات برشی، کار

مجازی تکمیلی تیر مسطح معادل به شرح زیر است:

$$\delta \bar{W}^* = \delta N^* (u_k - u_j) + \delta Q^* (v_k - v_j) + \delta M^* (\theta_k - \theta_j) \quad (7)$$

در این رابطه  $N^*$ ،  $Q^*$  و  $M^*$  به ترتیب نیروی محوری مجازی، نیروی برشی مجازی و لنگر خمشی مجازی هستند. هم‌چنین،  $u$  جابه‌جایی در جهت  $x$ ،  $v$  جابه‌جایی در جهت  $y$  و  $\theta$  زاویه چرخش است. جزئیات پارامترهای مختلف در شکل (۳-ب) نشان داده شده است.

انرژی مازاد در هر واحد برابر است با:

$$\delta \bar{W}^* = \delta N^* \frac{u_k - u_j}{l} + \delta Q^* \frac{v_k - v_j}{l} + \delta M^* \frac{\theta_k - \theta_j}{l} \quad (8)$$

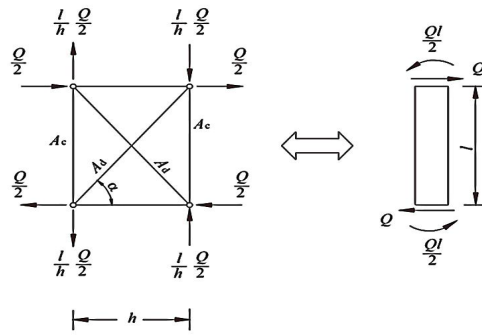
که در آن ضرایب پس از  $\delta N^*$ ،  $\delta Q^*$  و  $\delta M^*$  معادل جابه‌جایی‌های واقعی ناشی از نیروهای معادل  $N$  و  $Q$  هستند.  $l$  طول المان تیر است. انرژی مازاد در هر واحد براساس نیروهای معادل  $N$ ،  $Q$  و  $M$  به صورت زیر است:

$$\bar{W}^* = N^* \frac{u_k - u_j}{l} + Q^* \frac{v_k - v_j}{l} + M^* \frac{\theta_k - \theta_j}{l} \quad (9)$$

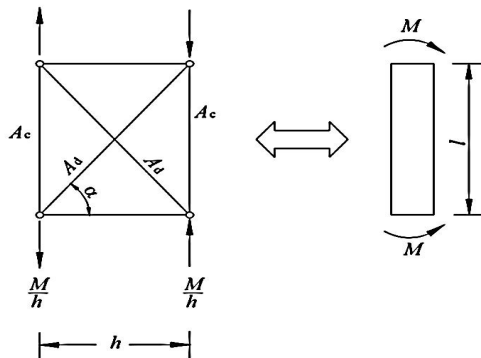
با تبدیل رابطه (۹) و بیان آن در قالب معادله دیفرانسیل جزئی، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{W}^*}{\partial N} &= \lim_{l \rightarrow 0} \frac{u_k - u_j}{l} = \frac{N}{(EA)_{eq}} \\ \frac{\partial \bar{W}^*}{\partial M} &= \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\theta_k - \theta_j}{l} = \frac{M}{(EI)_{eq}} \\ \frac{\partial \bar{W}^*}{\partial Q} &= \lim_{l \rightarrow 0} \frac{v_k - v_j}{l} = \frac{Q}{(GA_S)_{eq}} \end{aligned} \quad (10)$$

اینجا،  $(EA)_{eq}$ ،  $(EI)_{eq}$  و  $(GA_S)_{eq}$  به ترتیب سختی محوری معادل، سختی خمشی معادل و صلیب برشی معادل هستند.



شکل ۴- لنگر المان تیر معادل



شکل ۵- برش المان تیر معادل

$$A_S = \frac{\gamma h^3 E_d A_d}{G a^3} \quad (19)$$

$$\bar{W}_{jk}^* = \gamma \left( \frac{1}{\gamma} \frac{E_i I_i}{E_d A_d} \right) = \frac{Q^2 a^3}{\gamma h^3 E_d A_d} \quad (14)$$

رابطه (۱۴) به صورت معادله دیفرانسیل جزئی زیر نیز بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{W}_{jk}^*}{\partial Q} = 1 \frac{\partial \bar{W}_{jk}^*}{\partial Q} = 1 \frac{Q}{(G A_S)_{eq}} \quad (16)$$

سختی برشی معادل برابر است با:

$$(G A_S)_{eq} = \frac{\gamma h^3 E_d A_d}{a^3} \quad (17)$$

با فرض این که هر لایه متقاطع به هم به صورت صلب وصل شده باشند، می‌توان ممان اینرسی یک لایه متقاطع را به صورت زیر بیان کرد:

$$(E I)_{eq} = h^2 E_c A_c \quad (18)$$

که در آن  $A_c$  مساحت سطح مقطع لوله عمودی و  $h$  فاصله در جهت افقی است. با توجه به تأثیر برش، ناحیه برشی یک تیر معادل را می‌توان به صورت رابطه (۱۹) بیان کرد:

### ۳- معادله دیفرانسیل برای یک تیر طره‌ای تیموشنکو

#### با بارگذاری محوری

خصوصیات دینامیکی سکوی جکته توسط فرمول تیر تیموشنکو بهتر نشان داده می‌شود، به طوری که برش عرضی و هم‌چنین اینرسی چرخشی را شامل شود. معادله دیفرانسیل حاکم بر حرکت خمشی یک تیر طره‌ای تیموشنکو با بار محوری می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} - \left[ q(z,t) - \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c \frac{\partial u}{\partial t} - N \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \frac{EI}{k GA} \frac{\partial^3}{\partial z^3} \left[ q(z,t) - \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c \frac{\partial u}{\partial t} - N \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - \frac{\rho I}{k GA} \frac{\partial^3}{\partial t^3} \left[ q(z,t) - \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c \frac{\partial u}{\partial t} - N \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - \rho I \frac{\partial^4 u}{\partial z^2 \partial t^2} = 0 \quad (20)$$

$$\ddot{x}_g(t) = \sqrt{S_a(\omega)} e^{i\omega t} \quad (26)$$

و مشتق دوم آن به صورت زیر است:

$$\frac{d^2 \ddot{x}_g(t)}{dt^2} = -\omega^2 \sqrt{S_a(\omega)} e^{i\omega t} \quad (27)$$

با جایگزینی معادلات (21) و (26) در معادله (23)، معادله دیفرانسیل حاکم به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + \left[ \rho A \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} + c \frac{\partial u}{\partial t} + N \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - \frac{EI}{k'GA} \frac{\partial^3}{\partial z^3} \left[ \rho A \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} + c \frac{\partial u}{\partial t} + N \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \frac{\rho I}{k'GA} \frac{\partial^3}{\partial t^3} \left[ \rho A \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} + c \frac{\partial u}{\partial t} + N \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - \rho I \frac{\partial^4 u}{\partial z^2 \partial t^2} = \left( -\rho A + \frac{\rho^2 I}{k'G} \omega^2 \right) \sqrt{S_a(\omega)} e^{i\omega t} \quad (28)$$

در این مورد، جابه‌جایی عرضی تیر با استفاده از توابع  $q$  که تنها در شرایط  $z=0$  اقلان می‌شوند، تقریب زده می‌شوند:

$$\tilde{u}(z, t) = \sum_{j=1}^q \tilde{y}_j(t) \varphi_j(z) = [\varphi][\tilde{y}] \quad (29)$$

که در آن توابع  $\varphi_j(z)$  پایه‌ای از توابع ویژه هستند.

معادله (29) را در معادله (28) قرار داده و سمت چپ را در  $[\varphi]^T$  ضرب می‌کنیم؛ و با انتگرال‌گیری از معادله حاصل شده نسبت به  $z$  (از 0 تا  $L$ ) داریم:

$$[R]\{\tilde{y}\}^{IV} + [S]\{\tilde{y}\} + [M_1]\{\tilde{y}\} + [M_r]\{\tilde{y}\} + [M_r]\{\tilde{y}\} + [M_r]\{\tilde{y}\} + [C_1]\{\dot{\tilde{y}}\} + [C_r]\{\dot{\tilde{y}}\} + [K_1]\{\tilde{y}\} + [K_r]\{\tilde{y}\} + [K_r]\{\tilde{y}\} = ([P_r] + [P_r])e^{i\omega t} \quad (30)$$

که در این رابطه،

$$[P] = \frac{\rho^2 I}{k'G} \int_0^L [\varphi]^T [\varphi] dz \quad (31)$$

$$[S] = \frac{\rho I c}{k'GA} \int_0^L [\varphi]^T [\varphi] dz \quad (32)$$

در رابطه (20)،  $A$  مساحت سطح مقطع تیر،  $E$  مدول الاستیسیته،  $G$  مدول صلبیت،  $I$  ممان اینرسی سطح مقطع؛  $k'$  عامل وابسته به شکل سطح مقطع،  $L$  ارتفاع تیر،  $u$  انحراف جانبی خط مرکزی تیر،  $\rho$  چگالی جرم ماده،  $N$  بار فشاری محوری ثابت است.  $q(z, t)$  تحریک لرزه‌ای است که حالت دوم آن را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$q(z, t) = q(t) = -\rho A \ddot{x}_g(t) \quad (21)$$

از آنجا که تحریک لرزه‌ای به طور عمده در جهت‌های افقی  $x$  و  $y$  (مستقل از  $z$ ) صورت می‌گیرد، معادله زیر معتبر است:

$$-\frac{EI}{k'GA} \frac{\partial^3 q(z, t)}{\partial z^3} = 0 \quad (22)$$

با جایگزینی روابط (21) و (22) در رابطه (20)، و گسترش رابطه (20)، و هم‌چنین با مرتب و ساده‌سازی آن به معادله دیفرانسیل حاکم زیر می‌رسیم:

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + \left[ \rho A \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} + c \frac{\partial u}{\partial t} + N \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - \frac{EI}{k'GA} \frac{\partial^3}{\partial z^3} \left[ \rho A \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} + c \frac{\partial u}{\partial t} + N \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \frac{\rho I}{k'GA} \frac{\partial^3}{\partial t^3} \left[ \rho A \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} + c \frac{\partial u}{\partial t} + N \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - \rho I \frac{\partial^4 u}{\partial z^2 \partial t^2} = q(z, t) + \frac{\rho I}{k'GA} \frac{\partial^3 q(z, t)}{\partial t^3} \quad (23)$$

شرایط مرزی انتهایی برای تیر طره‌ای به صورت زیر هستند:

$$(u)_{z=0} = 0, \quad \left( \frac{du}{dz} \right)_{z=0} = 0, \quad \left( \frac{d^2 u}{dz^2} \right)_{z=L} = 0, \quad \left( \frac{d^3 u}{dz^3} \right)_{z=L} = 0 \quad (24)$$

شرایط اولیه برای یک تیر در تعادل ایستا به شرح زیر هستند:

$$u(z, 0) = 0, \quad \dot{u}(z, 0) = 0 \quad (25)$$

با تعریف چگالی طیفی توان تابع  $\ddot{x}_g(t)$  به صورت  $S_a(\omega)$ ، اصل شبه تحریک، یک شتاب زمین شبه‌سینوسی را به شرح رابطه (26) ارائه می‌دهد:



$$[M_r] = -\rho I \int_0^L [\varphi]^T [\varphi]'' dz = \rho I \int_0^L [\varphi]'^T [\varphi]' dz \quad (46)$$

$$[C_r] = -\frac{EIc}{k'GA} \int_0^L [\varphi]^T [\varphi]'' dz = \frac{EIc}{k'GA} \int_0^L [\varphi]'^T [\varphi]' dz \quad (47)$$

$$[K_v] = EI \int_0^L [\varphi]^T [\varphi]^{IV} dz = EI \int_0^L [\varphi]^{''T} [\varphi]'' dz \quad (48)$$

$$[K_r] = N \int_0^L [\varphi]^T [\varphi]'' dz = -N \int_0^L [\varphi]'^T [\varphi]' dz \quad (49)$$

$$[K_r] = -\frac{EIN}{k'GA} \int_0^L [\varphi]^T [\varphi]^{IV} dz = -\frac{EIN}{k'GA} \int_0^L [\varphi]^{''T} [\varphi]'' dz \quad (50)$$

با جایگزینی روابط (41) تا (47) در معادله (30) و جایگذاری زیر، می‌توان رابطه (30) را دوباره بازنویسی کرد:

$$[R]\{\ddot{y}\}^{IV} + [S]\{\ddot{y}\} + [M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = [P]e^{i\omega t} \quad (51)$$

حل معادله دیفرانسیل حرکت می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\{\ddot{y}(t)\} = (\{\ddot{y}_r\} + i\{\ddot{y}_i\})e^{i\omega t} \quad (52)$$

رابطه (52) را در رابطه (51) جایگزین و  $e^{i\omega t}$  را از معادلات به دست آمده، حذف می‌کنیم. با مقایسه قسمت حقیقی با قسمت موهومی داریم:

$$[E]\{\ddot{y}_r\} + [D]\{\ddot{y}_i\} = \{P\} \quad (53)$$

$$-[D]\{\ddot{y}_r\} + [E]\{\ddot{y}_i\} = \{0\} \quad (54)$$

که در آن

$$[M_v] = \rho A \int_0^L [\varphi]^T [\varphi] dz \quad (33)$$

$$[M_r] = -\frac{E\rho I}{k'G} \int_0^L [\varphi]^T [\varphi]'' dz \quad (34)$$

$$[M_r] = \frac{\rho IN}{k'GA} \int_0^L [\varphi]^T [\varphi]'' dz \quad (35)$$

$$[M_r] = -\rho I \int_0^L [\varphi]^T [\varphi]'' dz \quad (36)$$

$$[C_v] = c \int_0^L [\varphi]^T [\varphi] dz \quad (37)$$

$$[C_r] = -\frac{EIc}{k'GA} \int_0^L [\varphi]^T [\varphi]'' dz \quad (38)$$

$$[K_v] = EI \int_0^L [\varphi]^T [\varphi]^{IV} dz \quad (39)$$

$$[K_r] = N \int_0^L [\varphi]^T [\varphi]'' dz \quad (40)$$

$$[K_r] = -\frac{EIN}{k'GA} \int_0^L [\varphi]^T [\varphi]^{IV} dz \quad (41)$$

$$[P_v] = -\rho A \sqrt{S_a(\omega)} \int_0^L [\varphi]^T dz \quad (42)$$

$$[P_r] = \frac{\rho I}{k'G} \omega^2 \sqrt{S_a(\omega)} \int_0^L [\varphi]^T dz \quad (43)$$

با مراجعه به روابط (34) تا (41) می‌توان با استفاده از انتگرال‌گیری بخش‌های مرتبه دوم و با توجه به شرایط مرزی یک تیر طره‌ای، راه‌حل مربوطه را به دست آورد. نتایج به این شرح هستند:

$$[M_r] = -\frac{E\rho I}{k'G} \int_0^L [\varphi]^T [\varphi]'' dz = \frac{E\rho I}{k'G} \int_0^L [\varphi]'^T [\varphi]' dz \quad (44)$$

$$[M_r] = \frac{\rho IN}{k'GA} \int_0^L [\varphi]^T [\varphi]'' dz = -\frac{\rho IN}{k'GA} \int_0^L [\varphi]'^T [\varphi]' dz \quad (45)$$



شکل ۶- سازه مدل قاب فولادی دوبعدی مورد استفاده در تست‌های آزمایشگاهی

سازه ایمن‌تر طراحی و ساخته شود. به عبارت دیگر برای داشتن یک طراحی ایمن، بهتر است مدل‌سازی عددی و تجربی توأمان صورت پذیرد. برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی و برای رسیدن به اهداف این پژوهش، نتیجه کار تجربی روی قاب‌های فولادی مدل دوبعدی مقیاس شده سکوی اس پی دی ۹ که به‌تازگی در خلیج فارس طراحی و نصب شده، استفاده شده است.

بیشتر سکوهای دریایی از نوع جکت برای نصب در سایت نهایی با بارچ منتقل می‌شوند و مسافت‌های طولانی را سیر می‌کنند. مرحله حمل و نقل می‌تواند روی طراحی برخی از اعضای ثابت و اتصالات سازه جک‌تی اثرگذار باشد. بارچ می‌تواند نیروهای بزرگی از جنس چرخش و شتاب ایجاد کند و در نتیجه این اثرات می‌تواند باعث ایجاد خستگی قابل توجه و هم‌چنین احتمالاً موجب ایجاد لنگر خمشی در پایه‌های اصلی سازه جک‌تی شود. در نتیجه، مرحله بارگیری و انتقال بسیار مهم است و در طراحی سکوهای جک‌تی تأثیر به‌سزایی دارد. بنابراین، مدل فیزیکی با توجه به این شرایط بارگیری ساخته شده است و بر این اساس، آزمایشات مدل در خشکی انجام گرفته است. البته محدودیت‌های موجود در زمینه تجهیزات و امکانات آزمایشگاهی را نیز باید مدنظر قرار داد. آزمایش‌ها در آزمایشگاه ارتعاشات و تحلیل مودال انجام شده است. در ادامه، ابتدا مدل دوبعدی معرفی می‌شود. مطابق شکل (۶) سازه قاب دوبعدی تجربی برای تست ارتعاش آزمایشگاهی ساخته شده

$$[E] = (\omega^r [R] - \omega^l [M] + [K])$$

$$[D] = (\omega^r [S] - \omega [C])$$

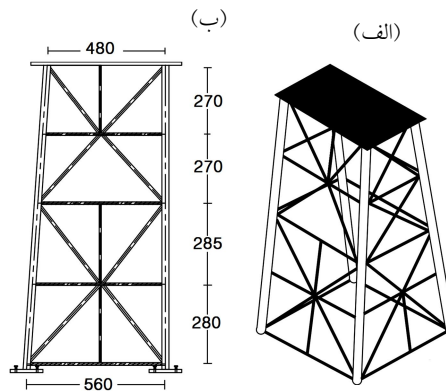
اگر  $\{\tilde{y}_r\}$  و  $\{\tilde{y}_l\}$  معلوم باشند، جابه‌جایی  $\{\tilde{u}\}$  قابل دستیابی است. سپس با استفاده از عبارت زیر می‌توان چگالی طیفی توان را ایجاد کرد.

$$\begin{aligned} S_{uu}(z, \omega) &= |\tilde{u}(z, t)|^2, \\ S_{MM}(z, \omega) &= |\tilde{M}(z, t)|^2 \end{aligned} \quad (55)$$

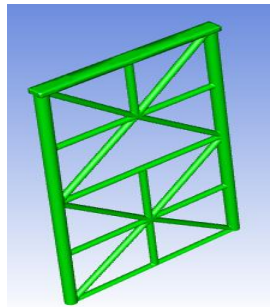
#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- سازه مورد آزمایش و نتایج کار آزمایشگاهی

به دلیل وجود شرایط محیطی سخت و خشن دریا و همچنین هزینه بالای ساخت سازه‌های جک‌تی ایمن (سکوهای دریایی)، باید از مطالعات آزمایشگاهی بهره برد، به نحوی که رفتار سازه اصلی (واقعی) در شرایط محیطی مذکور به صورت مطلوبی شبیه‌سازی شود. در این میان روش تجربی با رعایت ضوابط و شرایط لازم، روش قابل اطمینانی است. اما رویکردهای آزمایشی نیز به دلایلی از جمله ۱- تعداد محدود نقاط اندازه‌گیری شده، ۲- محدوده فرکانسی محدود، ۳- پیچیدگی در اندازه‌گیری درجات آزادی پیچشی و ۴- نامفهوم بودن برخی از شکل مودها، دارای مشکلاتی است. هم‌چنین مهیا کردن برخی شرایط محیطی در آزمایشگاه، مشکل و در برخی موارد غیر ممکن است؛ به همین دلیل باید روش‌های عددی اتخاذ شوند تا رفتار سازه‌ها در برابر شرایط محیطی و بارهای وارده بررسی و



شکل ۷- الف) نمای کلی از مدل سکوی جکته SPD9 و  
 ب) مدل مقیاس شده دو بعدی جکت



شکل ۸- مدل اجزای محدود سکوی دو بعدی تحت تست

اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب؛ ۲۸۰، ۲۸۵، ۲۷۰ و ۲۷۰ میلی متر است که در کل ارتفاع مدل به ۱۱۰۵ میلی متر می رسد. مدل سکوی مورد مطالعه، از شکل و ابعادی مطابق شکل (۷) پیروی می کند.

مدل اجزای محدود مربوط در شکل (۸) ارائه شده است. از آنجایی که تمام اعضای مدل سکوی دو بعدی تحت تست از فولاد ساخته شده است، مدول یانگ  $2.07 \times 10^{11}$  (پاسکال) و چگالی ۷۸۵۰ (کیلوگرم بر متر مکعب) در نظر گرفته شده است. نحوه عملکرد دستگاه های تحلیل مودال به بیان ساده به این ترتیب است که سیگنال های تعریف شده پس از تقویت در دستگاه تقویت کننده سیگنال به لرزاننده فرستاده می شوند و موجب اعمال نیرو به سازه می شوند. این نیرو به عنوان ورودی به سازه است و موجب ارتعاش سازه می شود. ارتعاش سازه، شتاب هایی را در قسمت های مختلف سازه ایجاد می کند.

است. با توجه به محدودیت های آزمایشگاهی و لوله های در دسترس، مقیاس هندسی ۱:۶۵ برای این مدل استفاده شده است. مدل تجربی از لوله های فولادی ساخته شده است که در آن برای پایه های اصلی ابعاد  $34 \times 43$  (یعنی قطر بیرونی و ضخامت بر حسب میلی متر)؛ برای اعضای مهاري و افقی ابعاد  $21 \times 2$  و برای قسمت فوقانی قاب، قوطی با مقطع  $40 \times 20$  و ضخامت ۲ میلی متر استفاده شده است. مدل دو بعدی سکوی جکته به یک پایه صفحه فولادی صلب ثابت شده است و دارای چهار طبقه با ۲۹ عضو سازه ای - ستون ها، تیرها و مهاربندها - در تمام طبقات است. ستون ها در مفاصل تیر به ستون پیوسته هستند، در حالی که تیرها و مهاربندهای مورب به مفاصل تیر به ستون مربوط جوش داده شده اند. سازه مدل قاب فولادی دو بعدی، در عرض دارای ابعاد  $560$  میلی متر (پایین) و  $480$  میلی متر (بالا) است و ارتفاع در طبقات

روش های عددی در مهندسی، سال ۴۰، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۰



شکل ۹- موقعیت و جایگاه حسگرها روی مدل سکوی دوبعدی



شکل ۱۰- الف) ابزار مورد استفاده برای تست ارتعاش آزمایشگاهی و ب) لرزاننده متصل به پایه مدل سکو

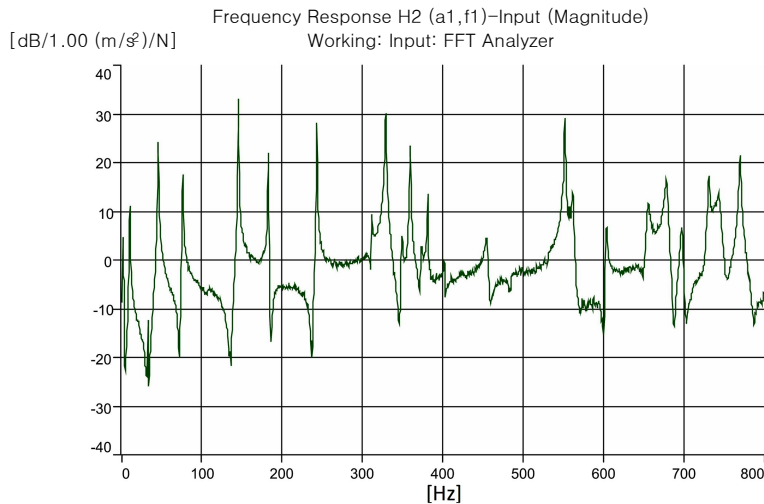
تیر به ستون قاب دوبعدی نصب شدند. سیگنال تحریک به تقویت کننده قدرت می‌تواند با استفاده از یک سری زمانی تولید شده توسط یک کامپیوتر شخصی اعمال شود. تکیه‌گاه‌های سازه مدل دوبعدی سکو، محکم به زمین متصل شده است و با استفاده از لرزاننده در محل یکی از پایه‌های سکو، سازه مورد ارتعاش قرار می‌گیرد. در شکل (۱۰) محل اعمال نیروی افقی توسط لرزاننده الکترو مغناطیسی مشاهده می‌شود. سیگنال نویز سفید به‌عنوان ورودی سیگنال تحریک استفاده شده است. فرکانس نمونه‌گیری آزمایش نیز برابر با  $16/3$  (کیلوهرتز) و بازه فرکانسی بین  $0-800$  (هرتز) - براساس فرکانس‌های مورد انتظار از تحلیل مودال مدل اجزای محدود اولیه - در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۴- استخراج شکل‌های مودی تجربی و تحلیلی

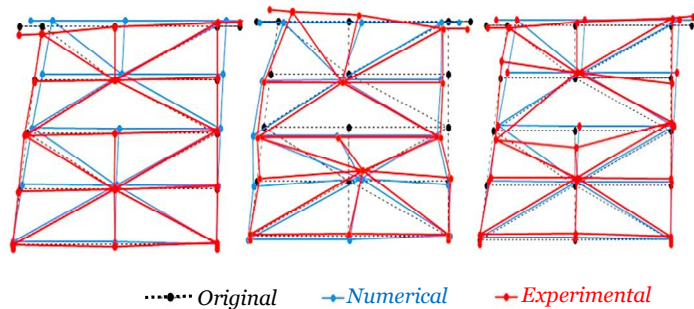
روش آزمایش ورودی تک و خروجی چندگانه برای آزمایش

شتاب‌ها در شتاب‌سنج‌ها به سیگنال تبدیل می‌شوند. این سیگنال‌ها به‌همراه سیگنال‌های نیروی اعمالی به سازه - که در محل اعمال نیرو به سازه قرار دارد- توسط کابل‌هایی به آشکارساز سیگنال و از آنجا به برنامه پردازشگر فرستاده می‌شوند. در تست ارتعاش آزمایشگاهی برای سازه مدل قاب فولادی دوبعدی، همان‌طور که در شکل (۹) ارائه شده است، تعداد ۳ شتاب‌سنج تک‌محوری در مفاصل تیر به ستون، برای اندازه‌گیری جابجایی انتقالی - یعنی اندازه‌گیری جابجایی در جهت  $y$  و در جهت  $x$  در هر یک از گره‌های سازه - به نوبت قرار داده شده و عمل آخذ داده صورت گرفته است.

سه نوع از حسگرهای تک‌محوری که در تست سازه دوبعدی مورد استفاده قرار گرفتند، برای ثبت پاسخ سازه تحریک شده توسط محرک الکترو دینامیکی (تیپ ۴۸۰۹) با حسگر نیرو و رانده شده توسط یک تقویت کننده قدرت (مدل ۲۷۰۶) - همه ساخته شده توسط شرکت دانمارکی - در مفاصل



شکل ۱۱- یک نتیجه از آزمایش ارتعاش آزمایشگاهی برای مدل سکوی دو بعدی



شکل ۱۲- شکل‌های مودی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

است. با استفاده از این نرم‌افزار فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی سازه مدل دوبعدی جکت به‌لحاظ تجربی استخراج شد. برای این منظور ۱۵ گره تعریف و شتاب‌های ثبت شده به این نقاط اعمال شد. برای بررسی جزئیات بیشتر در این زمینه می‌توانید به مرجع [۱۸] مراجعه کرد. یک نتیجه از آزمایش ارتعاش آزمایشگاهی برای مدل سکوی دوبعدی در قالب تابع پاسخ فرکانسی در شکل (۱۱) ارائه شده است و در شکل (۱۲)، شکل‌های مودی تجربی و عددی مدل سکوی دوبعدی برای سه مود اول آورده شده است. فرکانس‌های اندازه‌گیری شده حاصل از تست مدل آزمایشگاهی در جدول (۱) ارائه شده است.

از طرفی، کاربرد مدل‌های اجزای محدود به محل مشترکی در تحلیل سازه و به‌روزرسانی مدل تبدیل شده است. بسته نرم‌افزاری اجزاء محدود می‌تواند برای ساخت و تحلیل مدل

ارتعاش سازه مدل قاب فولادی دوبعدی مورد استفاده قرار گرفت و روش برآزش منحنی روی مجموعه توابع پاسخ فرکانسی مرجع اعمال شد تا پارامترهای مودال با استفاده از نرم‌افزار تحلیل مودال ام‌اس‌کوپ<sup>۵</sup> استخراج شود. تحلیل مودال تجربی به سادگی به‌عنوان یک روش برای توصیف ساختار یک مدل سازه‌ای از لحاظ مشخصات دینامیکی آن، مانند فرکانس‌ها، میرایی و شکل‌های مودی تعریف می‌شود. برای استخراج پارامترهای مودال از آزمایش تجربی، پس از پردازش پاسخ سازه جکتی توسط نرم‌افزار پالس این داده‌ها به نرم‌افزار ام‌اس‌کوپ معرفی می‌شوند که یک نرم‌افزار پس‌پردازشی است. این نرم‌افزار ابزاری برای تحلیل داده‌های آزمایش است و با استفاده از آن می‌توان رفتار استاتیکی و دینامیکی سازه‌ها را تجزیه و تحلیل کرد و اصولاً یک نرم‌افزار تحلیل مودال تجربی

جدول ۱- فرکانس‌های طبیعی (هرتز) اندازه‌گیری شده

شماره مود	مود اول	مود دوم	مود سوم
مدل تجربی	۹/۸	۴۵/۳۰	۷۵/۸۰

$$MAC(\varphi_a, \varphi_m) = \frac{|\varphi_a^T \varphi_m^*|}{(\varphi_a^T \varphi_a^*)(\varphi_m^T \varphi_m^*)} \quad (52)$$

در این رابطه، MAC معیار اطمینان مودال،  $\varphi_m$  بردار مودال تجربی،  $\varphi_a$  بردار مودال تحلیلی، T ترانهاده و \* علامت مزدوج مختلط است. در این معیار، مقدار نزدیک به "یک" همبستگی کامل بین دو شکل مود تجربی و تحلیلی را نشان می‌دهد، در صورتی که مقدار نزدیک به "صفر" نشان می‌دهد که شکل‌های مودی ارتباطی به هم ندارند.

در این مطالعه برای اطمینان بیشتر، مقادیر معیار MAC برای مقایسه شکل‌های مودی تحلیلی مستخرج از مدل ساده شده (به‌روزرسانی شده با داده‌های تجربی) و شکل‌های مودی اندازه‌گیری شده از مدل تجربی استفاده شده است. شکل (۱۳) مقادیر معیار MAC، بین شکل‌های مودی مدل ساده شده و شکل‌های مودی اندازه‌گیری شده از مدل تجربی را نمایش می‌دهد. در این راستا نتایج حاکی از این است که معیار MAC بین شکل‌های مودی مدل ساده شده و شکل‌های مودی مدل تست شده سکوی جکته، بیش از مقدار ۰/۹۹ است؛ یعنی یک مدل ساده شده مطلوب و منطبق بر مشخصات مدل واقعی تولید شده است. افزون بر این، شکل (۱۴) بر انطباق مناسب و کامل بین فرکانس‌های اخذ شده از مدل ساده شده و نتایج آزمایشگاهی، دلالت دارد.

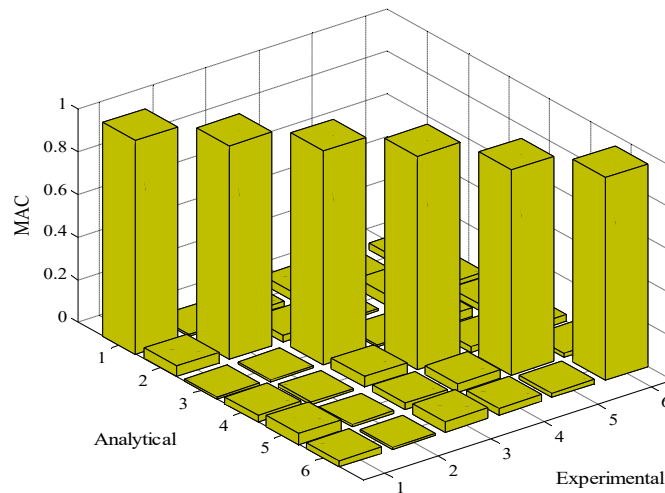
با توجه به روش برازش منحنی روی مجموعه توابع پاسخ فرکانسی برای استخراج پارامترهای مودال، از مفهوم چگالی طیف توان نیز برای تأیید مدل محاسباتی پیشنهادی استفاده شده است. چگالی طیف توان نشان می‌دهد که چه مقدار از توان یک سیگنال در محتوای فرکانسی سازه قرار گرفته است. به‌عبارت دیگر توزیع مقادیر توان به‌عنوان تابعی از فرکانس است. در این راستا، ابتدا رفتار مدل فیزیکی در حوزه فرکانس ارائه و سپس با

اصلی اجزای محدود یک سکوی دریایی با توجه به مشخصات مدل فیزیکی آزمایش شده آن استفاده شود. در این مقاله، مدل اجزای محدود براساس مدل سکوی تجربی با استفاده از بسته نرم‌افزاری انسیس مدل‌سازی شده است. سپس، ماتریس‌های جرم و سختی با نرم‌افزار انسیس استخراج شده و در ادامه جهت تحلیل مودال عددی و محاسبات مربوط، وارد محیط نرم‌افزار متلب شده است. هم‌چنین برای نمایش بهتر اشکال مودی تحلیلی، از نرم‌افزار انسیس بهره گرفته شده است. نتایج تحلیل مودال عددی برای مدل دوبعدی سکوی جکته نیز در شکل (۱۲) ارائه شده است. برای انطباق شکل‌های مودی عددی و تجربی (نزدیک کردن فرکانس‌ها و شکل مودها) از به‌روزرسانی استفاده شده است. این کار با نرم‌افزار ام‌اس‌کوپ انجام گرفته است. در مورد اخذ پاسخ لرزه‌ای مدل فیزیکی نیز می‌توان گفت که در حل معادله دینامیکی عددی تحت زلزله ال سنترو، از ماتریس‌های دینامیکی به‌روزرسانی شده منطبق بر ویژگی‌های مودال مدل فیزیکی استفاده شده است.

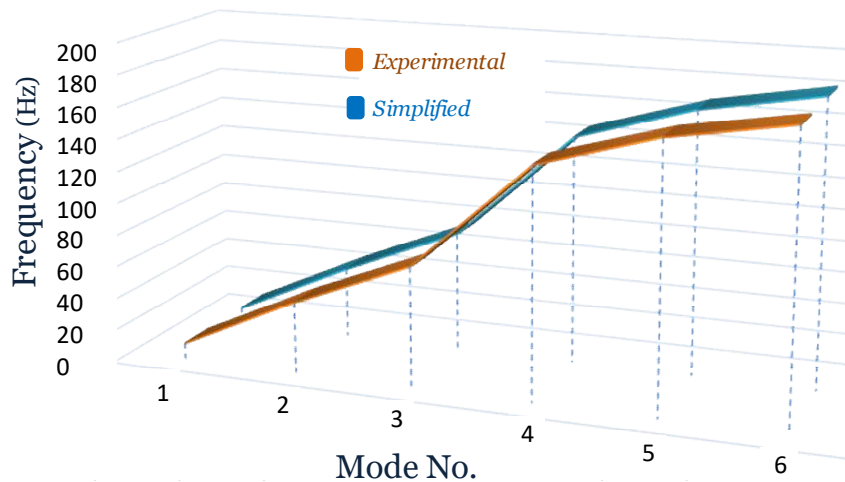
#### ۳-۴- پاسخ‌های دینامیکی سکوی جکته مدل تجربی و

##### مدل ساده شده

با توجه به این‌که در شبه‌سازی مدل براساس تیر طره‌ای از توابع ویژه تجربی در راستای فائق آمدن بر عدم قطعیت‌های احتمالی بهره گرفته شده است، انتظار این می‌رود که پارامترهای مشخصه هر دو مدل نزدیک به هم باشند. در این مطالعه از معیار اطمینان مودال برای مقایسه شکل‌های مودی اندازه‌گیری شده و به‌روزرسانی شده استفاده شده است. در بیشتر مواقع، معیار اطمینان مودال برای به‌روزرسانی مدل دینامیکی اعمال می‌شود. اطمینان مودال توسط معادله زیر ارائه می‌شود:



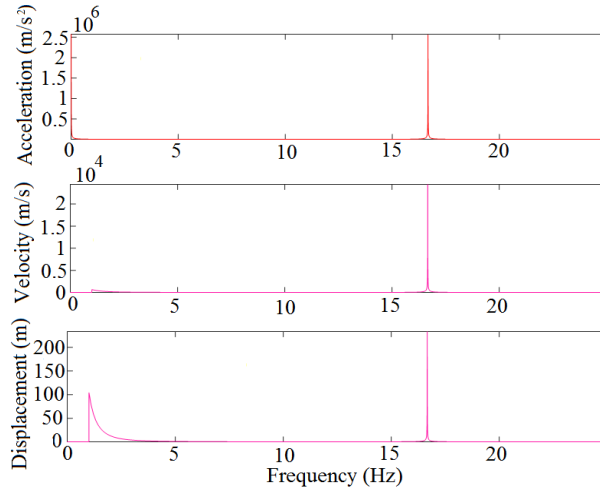
شکل ۱۳- مقادیر معیار MAC، بین شکل های مودی مدل محاسباتی ساده شده و شکل های مودی اندازه گیری شده از مدل تجربی



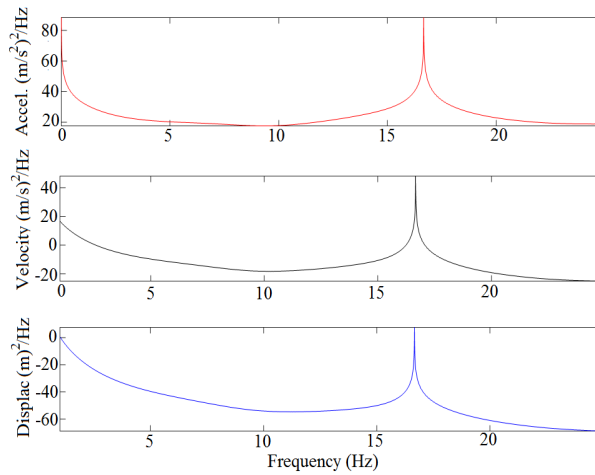
شکل ۱۴- مقایسه فرکانس های مدل محاسباتی ساده شده با فرکانس های تجربی اندازه گیری شده (رنگی در نسخه الکترونیکی)

با توجه به این که در شبیه سازی مدل براساس تیر طره ای از توابع ویژه تجربی در راستای فائق آمدن بر عدم قطعیت های احتمالی بهره گرفته شده است، انتظار این می رود که هر دو مدل دارای محتوای فرکانسی نزدیک به هم باشند. در این خصوص، با مقایسه شکل های (۱۶) و (۱۷) می توان این چنین اظهار نظر کرد که پاسخ های دینامیکی هر دو مدل دارای توان طیفی (محتوای فرکانسی) نزدیک به هم هستند. به عبارتی بهتر، هر دو مدل دارای مشخصات دینامیکی نزدیک به هم هستند. در این تحقیق، پاسخ لرزه ای مدل فیزیکی سکوی جکتی و

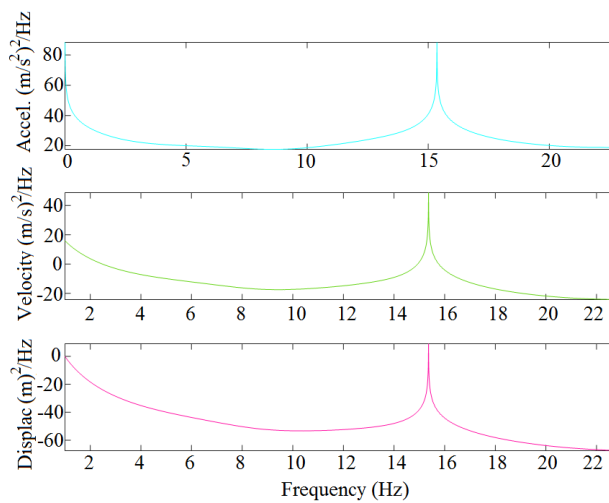
نتایج طیفی اخذ شده از مدل ساده شده براساس تیر تیموشنکو مقایسه شده است. چون آزمایش مودال مدل فیزیکی تحت نیروی نویز سفید انجام گرفته است، لذا پاسخ های دینامیکی مدل ساده شده نیز تحت نیروی نویز سفید با نرم افزار متلب استخراج شده است. رفتار تجربی مدل فیزیکی (شتاب، سرعت و جابه جایی) در حوزه فرکانس در شکل (۱۵) ارائه شده است. افزون بر این، پاسخ دینامیکی مدل فیزیکی و مدل ساده شده در قالب چگالی طیف توان (بر حسب شتاب، سرعت و جابه جایی) در شکل های (۱۶) و (۱۷) آورده شده است.



شکل ۱۵- رفتار تجربی مدل فیزیکی در حوزه فرکانس

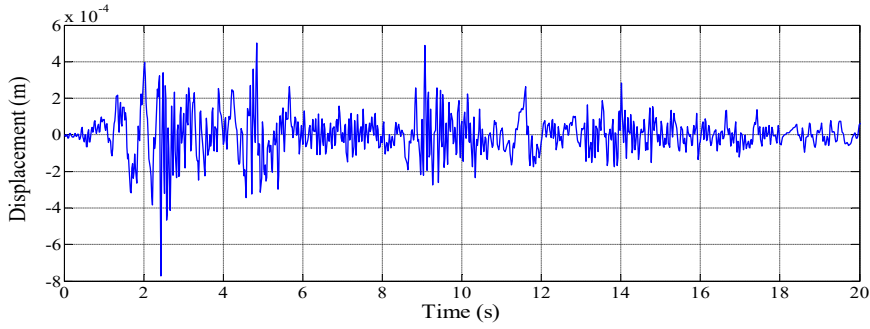


شکل ۱۶- پاسخ دینامیکی تحت نویز سفید مدل فیزیکی بر اساس چگالی طیف توان

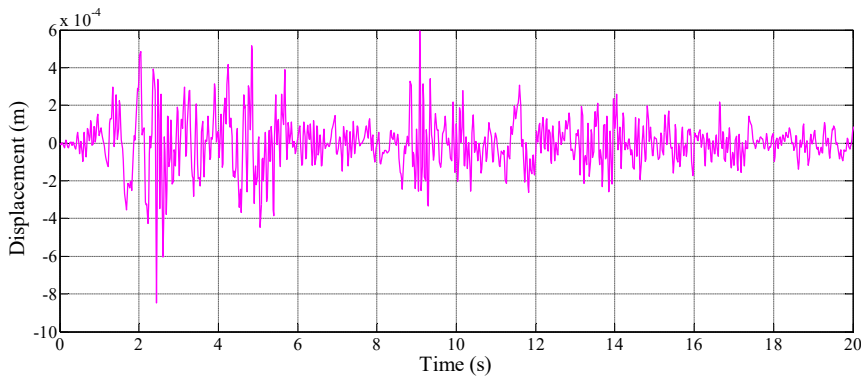


شکل ۱۷- پاسخ دینامیکی تحت نویز سفید مدل ساده شده بر اساس چگالی طیف توان

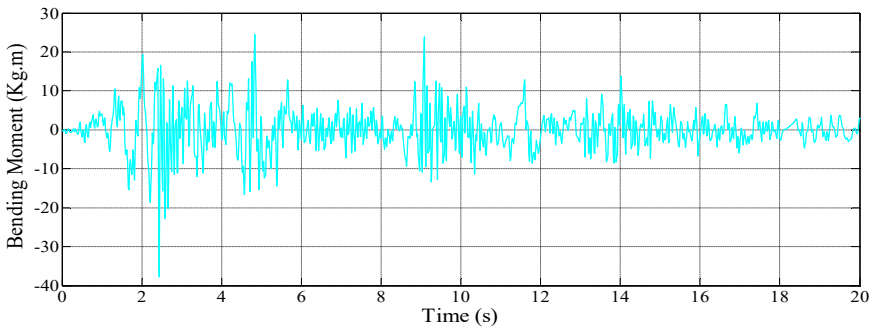




شکل ۱۸- پاسخ لرزه‌ای مدل فیزیکی تحت زلزله الاسترو در قالب جابه‌جایی



شکل ۱۹- پاسخ لرزه‌ای مدل ساده شده تحت زلزله الاسترو در قالب جابه‌جایی



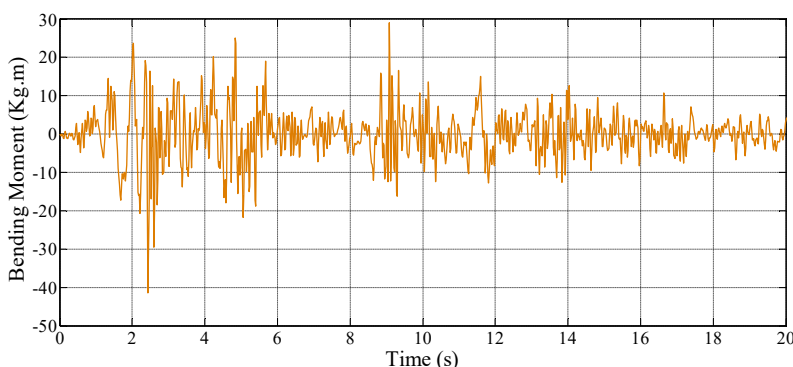
شکل ۲۰- پاسخ لرزه‌ای مدل فیزیکی تحت زلزله الاسترو در قالب لنگر خمشی

انطباق مناسبی هستند، در نتیجه رفتار دینامیکی نزدیک به هم دارند.

### ۵- نتیجه‌گیری

در واقع این تحقیق براساس آزمایش تجربی مدل فیزیکی سازه‌های فراساحلی جک‌تی صورت گرفته است به‌طوری که براساس آن یک روش مناسب ارزیابی رفتار و عملکرد بلند

مدل ساده شده پیشنهادی تحت تحریک رکورد شتاب زلزله ال سترو مورد مطالعه قرار گرفته است. تاریخچه زمانی جابه‌جایی و لنگر خمشی به‌دست آمده هر دو مدل تحت تحریک مذکور در شکل‌های (۱۸) تا (۲۱) آورده شده است و همچنین مقادیر بیشینه جابه‌جایی و لنگر خمشی برای هر دو مدل در جدول (۲) ارائه شده است. با بررسی نتایج می‌توان مشاهده کرد که پاسخ دینامیکی مدل فیزیکی و مدل ساده شده پیشنهادی دارای



شکل ۲۱- پاسخ لرزه‌ای مدل ساده شده تحت زلزله الاسترو در قالب لنگر خمشی

جدول ۲- بیشینه پاسخ سازه تحت تحریک

مدل ساده شده	مدل فیزیکی	شماره مود
۰/۶	۰/۵۲	جابه جایی (mm)
۲۸/۴۶	۲۵/۰۵	لنگر خمشی (kg. m)

مدت برای این دست از سازه‌ها تهیه و پیشنهاد شود. بنابراین یک روش تحلیلی برای تهیه مدل ساده و اصلاح شده طوری طرح شد که در آن هر دو دسته از عدم قطعیت‌های ناشی از

اندازه‌گیری‌های عملی و مدل‌سازی عددی، به حداقل رسیده باشند. به عبارتی بهتر، برای فائق آمدن بر مشکلات و چالش‌های عملی موجود در حوزه پایش رفتار و عملکرد سازه‌های فراساحلی، یک تکنیک جدید ساده‌سازی و به‌روزرسانی مدل منطبق بر داده‌های مودال تجربی معرفی شد. در این مطالعه برای اطمینان بیشتر، مقادیر معیار MAC برای مقایسه شکل‌های مودی تحلیلی مستخرج از مدل ساده شده (به‌روزرسانی شده با داده‌های تجربی) و شکل‌های مودی اندازه‌گیری شده از مدل تجربی استفاده شده است. در این راستا نتایج حاکی از این است که معیار MAC بین شکل‌های مودی مدل ساده شده و شکل‌های مودی مدل تست شده سکوی جکتی، بیش از مقدار

۰/۹۹ است؛ یعنی یک مدل ساده و اصلاح شده مطلوب و منطبق بر مشخصات مدل واقعی تولید شده است. در این تحقیق، پاسخ لرزه‌ای مدل فیزیکی سکوی جکتی و مدل ساده شده پیشنهادی تحت تحریک رکورد شتاب زلزله ال سترو مورد مطالعه قرار گرفته است. با بررسی نتایج می‌توان مشاهده کرد که پاسخ دینامیکی مدل فیزیکی و مدل ساده شده پیشنهادی دارای انطباق مناسبی هستند، در نتیجه رفتار دینامیکی نزدیک به هم دارند. در نهایت، توسعه و به‌کار گرفتن چنین روش‌های پایش رفتار سازه‌های فراساحلی جکتی به‌طور گسترده‌ای مؤثر بوده و می‌تواند در زمان بهره‌برداری و طول عمر مفید سکوی به‌کار گرفته شود که منجر به صرفه‌جویی در زمان و هزینه نیز خواهد شد. نتایج حاکی از آن است که تکنیک پیشنهادی جدید، روشی مؤثر، کاربردی و مفید برای سکوی فراساحلی جکتی است.

## واژه‌نامه

1. offshore structures (jacket)
2. modal
3. pseudo-excitation
4. elastic modulus

1. Park, M., Koo, W. and Kawano, K., "Dynamic Response Analysis of an Offshore Platform Due to Seismic Motions", *Engineering Structure*, Vol. 33, No. 5, pp.1607-1616, 2011.
2. Hosseinlou, F., Mojtahedi, A. and Yaghin, M. A. L., "Developing a SIM Strategy for Offshore Jacket Platforms Based on the FE Model Updating and A Novel Simplified Method", *Ocean Engineering*, Vol. 145, pp. 158-176, 2017.
3. Mojtahedi, A., Hokmabady, H., Yaghubzadeh, A. and Mohammadyzadeh, S., "An Improved Model Reduction-Modal Based Method for Model Updating and Health Monitoring of an Offshore Jacket-Type Platform", *Ocean Engineering*, Vol. 209, 107495, 2020.
4. He, X. and Li, H., "Torsionally Coupled Dynamic Performance Analysis of Asymmetric Offshore Platforms Subjected to Wave and Earthquake Loadings", *Earthquake Engineering Structure Vibration*, Vol. 9, No. 2, pp. 247-258, 2010.
5. Bargi, K., Hosseini, S., Tadayon, M. and Sharifian, H., "Seismic Response of a Typical Fixed Jacket-Type Offshore Platform (SPD1) Under Sea Waves," *Open Journal Marine Science*, Vol. 1, pp. 36-42, 2011.
6. Han, X., Ma, J., Zhao, D. and Zhou, B., "A Simplified Calculation Method for Non-Stationary Random Seismic Response of Jacket Platform", *Journal Shanghai Jiaotong University*, Vol. 13, No. 4, pp. 413-417, 2008.
7. Hokmabady, H., Mojtahedi, A. and Mohammadyzadeh, S., "Uncertainty Analysis of an Offshore Jacket-Type Platform Using a Developed Numerical Model Updating Technique", *Ocean Engineering*, Vol. 211, p.107608, 2020.
8. Kim, H., Lee, D. and Kim, C., "Efficient Three-Dimensional Seismic Analysis of a High-Rise Building Structure With Shearwalls", *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 6, pp. 963-976, 2005.
9. Wilson, E., *Three Dimensional Static and Dynamic Analyses of Structures*, Berkeley (CA): Computer and Structures, Inc., 2000.
10. Ren, X. and Bai, Y., "Comparison Study of Jack-Up Drilling Unit's Dynamic Behavior", *Ships Offshore Structures*, Vol. 8, No. 5, pp. 457-467, 2013.
11. Bea, R. G. and Stear, J. D. "Simplified Strength-Level Earthquake Assessment of Jacket-Type Platforms", *Proceedings of the 8th International Offshore and Polar Engineering Conference*; Montreal, Canada, 1998.
12. Asgarian, B., Mohebbinejad, A. and Soltani, R. H., "Simplified Method to Assess Dynamic Response of Jacket Type Offshore Platforms Subjected to Wave Loading", *23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*; June 20-25, Vancouver, British Columbia, Canada, 2004.
13. Zhou, B., Guo, W., Han, X. and Tan, S. K., "Random Seismic Response Analysis of Jacket Structure with Timoshenko's Beam Theory", *Ships and Offshore Structures*, Vol. 11, No. 4, pp. 438-444, 2015.
14. Hosseinlou, F. and Mojtahedi, A., "Developing a Robust Simplified Method for Structural Integrity Monitoring of Offshore Jacket-Type Platform Using Recorded Dynamic Responses", *Applied Ocean Research*, Vol. 56, pp. 107-118, 2016.
15. Barltrop, N. D. P. and Adams A. J., *Dynamics of Fixed Marine Structures*, Butter worth Heinemann, Ltd, Third Edition.1991.
16. Minoo H., P., *Dynamics of Offshore Structures*, Butterworths, London. 1989.
17. Passon, P. and Branner, K., "Load Calculation Methods for Offshore Wind Turbine Foundations", *Ships Offshore Structures*, Vol. 9, No. 4, pp. 433-449, 2014.
18. Mousavi, Z., Varahram, S., Etefagh, M. M., Sadeghi, M. H., and Razavi, S. N., "Deep Neural Networks-Based Damage Detection using Vibration Signals of Finite Element Model and Real Intact State: An Evaluation Via a Lab-Scale Offshore Jacket Structure", *Structural Health Monitoring*, Vol. 20, No. 1, pp. 379-405, 2021.