



## شناسایی خرابی سکوی دولفین اسکله پهلوگیری کشتی از طریق بهنگام سازی مدل اجزای محدود

مسعود پدram<sup>۱</sup>، محمدرضا خدمتی<sup>۲\*</sup>، اکبر اسفندیاری<sup>۳</sup>، حسین کاظم<sup>۴</sup><sup>۱</sup>فارغ التحصیل دکتری، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران<sup>۲</sup>استاد، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران<sup>۳</sup>استادیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران<sup>۴</sup>شرکت ملی و مهندسی ساختمان نفت ایران، تهران، ایران

## تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۵ آبان ۱۳۹۶

بازنگری: ۲۰ تیر ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۱ تیر ۱۳۹۷

ارائه آنلاین: ۹ مرداد ۱۳۹۷

## کلمات کلیدی:

شناسایی خرابی  
بهنگام سازی مدل اجزای محدود  
سکوی دولفین  
اسکله پهلوگیری کشتی  
طیف چگالی توان پاسخ

**چکیده:** سازه های مستقر در تاسیسات ساحلی نظیر اسکله های پهلوگیری کشتی در طول عمر خود شرایط کارکرد سختی را تحمل مینمایند و بنابراین در معرض خرابی و افت سختی در اجزا قرار دارند. در این مقاله، کارکرد روش شناسایی خرابی مبتنی بر طیف چگالی توان پاسخ، در مورد سکوی دولفین اسکله تامین خوراک نفت خام پالایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی با استفاده از مدلسازی عددی صورت گرفته و خرابی به صورت افت درصدی از سختی اجزا لحاظ شده است. مدل اجزای محدود دولفین توسط نرم افزار متلب ایجاد شده و اثر آب مجاور به صورت جرم افزوده بر المانها افزوده شده است. چند سناریوی خرابی فرضی برای بررسی کارکرد روش در مورد خرابیهای کم و زیاد در مناطق مختلف سازه در نظر گرفته شده است. به علاوه، راهکاری برای محاسبه طیف چگالی توان نیروی تحریک با استفاده از تابع پاسخ فرکانسی تقریبی معرفی شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که روش در شناسایی پارامترهای این مدل علیرغم صلبیت زیاد آن، موفق است. همچنین، بررسی ها نشان میدهد که جرم افزوده آب تاثیر زیادی بر شناسایی پارامترها دارد. کیفیت نتایج به دست آمده در مطالعه عددی، الهام بخش برای توسعه روش در فاز عملیاتی با داده برداری از سازه سکوی دولفین می باشد.

## ۱- مقدمه

تاسیسات و سازه های مورد استفاده در دریا، شرایط کارکردی سختی دارند، لذا وقوع خرابی و گسترش آن در این تاسیسات علاوه بر ایجاد اختلال در عملکرد واحدهای عملیاتی در کوتاه مدت، در دراز مدت منجر به شکست فاجعه بار، به خطر افتادن جان عوامل انسانی، عواقب زیست محیطی و زیان اقتصادی میشود. بنابراین، کنترل وضعیت این سازه ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این بین سازه های عمل کننده در محیط دریایی نظیر اسکله ها در معرض بارگذاریهای طبیعی و ناشی از عملیات، قرار دارند. از این رو ارزیابی وضعیت آنها، نیازی اساسی است. بنابراین، تحقیقات گسترده های در این زمینه از زمانهای گذشته در جریان بوده است که امروزه سرعت بیشتری پیدا کرده است. در گذشته، بگ و همکاران، وندیور<sup>۱</sup> [۱] و سالوا<sup>۲</sup> [۲]، به مطالعه شناسایی خرابی در تاسیسات نفتی از طریق فرکانس طبیعی پرداختند. در روند مطالعات شناسایی خرابی، استفاده از شاخصهای شکل مود، انرژی کرنشی مودال، نیز در مطالعه سازه های دریایی مورد

نظر قرار گرفته است. لی<sup>۳</sup> و همکاران [۳] در راستای توسعه پایش سلامت در کاربردهای دریایی، یک روش بهنگام سازی مبتنی بر حساسیت شکل مودهای سازه، که آن را میان مدل-میان مود<sup>۴</sup> تعبیر مینمایند، جهت شناسایی خرابی در اعضای جکت یک سکوی دریایی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه فرض آن بود که تنها به بخشی از اطلاعات مربوط به شکل مودها (در درجات آزادی اندازه گیری شده) دسترسی وجود دارد. عسگریان و همکاران [۴] با استفاده از نگرش انرژی کرنشی مودال<sup>۵</sup> و انرژی کرنشی میان مود به شناسایی اندازه و محل خرابی در یک سکوی شابلونی دریایی پرداختند. از آنجا که روشهای مودال منحصر به اطلاعات سازه در فرکانس های طبیعی سازه هستند، در حضور خطای اندازه گیری، تعیین اندازه خرابی با سختی صورت میگیرد. لیو<sup>۶</sup> و همکاران [۵] با استفاده از روش بهبود یافته استفاده از انرژی کرنشی مودال به شناسایی خرابی در مدل فونداسیون یک توربین دریایی پرداختند. مسائلی مانند عدم امکان اندازه گیری کامل و خطای اندازه گیری در این مطالعه مدنظر قرار گرفت ولی با این وجود، کارکرد روش در مقابل این دو مقوله، به دلیل کمبود

3 Li

4 Cross model-Cross mode (CM-CM)

5 Modal Strain Energy

6 Liu

1 Vandiver

2 Salawu

نویسنده عهده دار مکاتبات: khedmati@aut.ac.ir

محدود سازه های دریایی اختصاص نیافته است [۱۱]. در این مطالعه، ضمن معرفی مدل اجزا محدود سکوی دولفین، به بررسی عددی و مطالعه چندین حالت خرابی در مورد این سکو پرداخته میشود. در این بررسیها، اثر خطای اندازه‌گیری و جرم افزوده آب مجاور پایه های سکو در نظر گرفته شده است، که دومی دارای تاثیر زیادی بر نتایج شناسایی پارامترها میباشد. بعلاوه بر اساس جایگزین سازی تابع پاسخ فرکانسی تقریبی، راهکاری جهت محاسبه طیف چگالی تحریک در محدودهای از فرکانسها معرفی میشود. نتایج این مطالعه نشانگر قابلیت شناسایی خرابی در سازه های دریایی از طریق بهنگامسازی با دقت مناسب است.

## ۲- معرفی روش شناسایی خرابی از طریق بهنگام سازی مدل اجزا محدود

به منظور شناسایی خرابی از روش بهنگام سازی معرفی شده توسط پدram و همکاران [۹] استفاده شده است. این روش مبتنی بر استفاده از حساسیت طیف چگالی توان پاسخ سازه میباشد. این روش قابل اجرا با استفاده از دادههای شتاب، سرعت و جابجایی است [۱۰]. همچنین قابلیت اجرا با استفاده از دادههای کرنش نیز وجود دارد. در این مطالعه از حساسیت طیف کرنش برای بهنگام سازی استفاده شده است. دادههای کرنش از حساسیت بیشتر به خرابی برخوردارند و بنابراین شناسایی خرابی به وسیله آنها از دقت بیشتری برخوردار خواهد بود. معادله حساسیت تابع چگالی طیفی توان کرنش به صورت معادله ۱ معرفی میشود.

$$\Delta S_{\varepsilon\varepsilon}(\omega) = -\mathbf{B}\mathbf{H}_d^*(\omega)\Delta\mathbf{Z}^*(\omega)\mathbf{H}^*(\omega)\mathbf{S}_{FF}(\omega)\mathbf{H}_d(\omega)\mathbf{B}^T - \mathbf{B}\mathbf{H}^*(\omega)\mathbf{S}_{FF}(\omega)\mathbf{H}(\omega)\Delta\mathbf{Z}(\omega)\mathbf{H}_d(\omega)\mathbf{B}^T \quad (1)$$

$$\Delta\mathbf{Z} = \Delta\mathbf{K} = \sum_{n=1}^{ne} \mathbf{K}_n \Delta p_n^S \quad (3)$$

بنابراین به منظور شناسایی پارامترهای سختی المانی از معادله ۴ استفاده میشود.

$$\mathbf{S}^S = -\mathbf{B}\mathbf{H}_d^*(\omega)\mathbf{S}_{FF}(\omega)\mathbf{H}(\omega)\mathbf{K}_n\mathbf{H}_d(\omega)\mathbf{B}^T - \mathbf{B}\mathbf{H}^*(\omega)\mathbf{K}_n\mathbf{H}(\omega)\mathbf{S}_{FF}(\omega)\mathbf{H}_d(\omega)\mathbf{B}^T \quad (4)$$

این معادله حساسیت جهت تعیین ارتباط تغییرات طیف کرنش با پارامترهای سختی سازه های مورد استفاده قرار میگیرد. حل این معادله از طریق روش حداقل سازی مربعات خطا، قابل وصول است [۹].

$$\min_{\Delta p} \|\mathbf{S}^S \Delta p^S - \Delta S_{\varepsilon\varepsilon}\|_2 \quad \text{Subject to } -1 \leq \Delta p \leq 1. \quad (5)$$

با توجه به استخراج دقیق این معادله حساسیت، باندهای بالا و پایین مورد نیاز برای همگرایی حل حداقل مربعات بدون پیش قضاوت و به صورت ۱- و ۱ تعیین میشوند. روندنمای شکل ۱، نحوه اجرای روش بهنگامسازی را نشان میدهد. این روش به محاسبه چگالی طیفی،

اطلاعات با مشکل روبرو بود. لیو<sup>۱</sup> و همکاران [۶] با استفاده از انرژی کرنشی مودال به تعیین محل خرابی در سکوهای شابلونی پرداختند. در مطالعه صورت گرفته، انرژی کرنشی مودال وابسته به کشش-فشار یا انرژی کرنشی مودال وابسته به خمش مبنای شناسایی محل خرابی قرار گرفته است. ارزیابی انرژی کرنشی مودال کششی-فشاری و خمشی المان هایی که خرابی در آنها شبیه سازی شده بود و المانهای اطراف آنها، منجر به شناسایی محل خرابی شد، هرچند که در واقعیت پیش فرضی در مورد محل خرابی وجود ندارد و این یک عامل محدود کننده است. شناسایی خرابی از طریق پردازش سیگنالهای ارتعاشی برای شناسایی محل و حوزه خرابی نیز در ارتباط با سازه های دریایی مورد مطالعه قرار گرفته است. الشافی<sup>۲</sup> و همکاران [۷] با استفاده از ترکیبی از روشهای کاهش تصادفی و شبکه عصبی به شناسایی خرابی در سازه سکوی شابلونی پرداختند. عسگریان و همکاران [۸] از نرخ انرژی سیگنال به این منظور استفاده کرده اند. این مطالعات به تشخیص وجود خرابی و شناسایی مکان آن اختصاص میابند.

استفاده از دادههای حوزه فرکانس به گونهای که منجر به شناسایی اندازه و محل خرابی در سکوهای دولفین شود، مدنظر این مطالعه است. به این منظور، روشی که بیشتر توسط نویسندگان بر اساس بهنگامسازی مدل اجزا محدود ایجاد و معرفی شده است [۹ و ۱۰]، برای شناسایی خرابی در سازه سکوی دولفین اسکله تامین خوراک پالایشگاه مورد بررسی قرار میگیرد. شناسایی خرابی از طریق بهنگام سازی منجر به شناسایی محل و میزان خرابی میشود. تاکنون مطالعات زیادی به بهنگامسازی مدل اجزا

در این رابطه، تابع  $\mathbf{H}_d(\omega)$  تابع پاسخ فرکانسی سازه آسیب دیده است که به دلیل مشکل عدم امکان اندازه گیری کامل، نمی تواند در تمام درجات آزادی در دسترس باشد. بنابراین از یک تابع پاسخ فرکانسی تقریبی به صورت معادله ۲ برای غلبه بر مشکل عدم امکان اندازه گیری کامل استفاده می شود [۱۰].

$$\mathbf{H}_d^{approx.}(\omega) = \sum_{j=1}^m \frac{\phi_j \phi_j^T}{\Omega_{jd}^2 - \omega^2 + 2i\xi_{jd}\Omega_{jd}\omega} + \sum_{j=m+1}^{nd} \frac{\phi_j \phi_j^T}{\Omega_j^2 - \omega^2 + 2i\xi_j\Omega_j\omega}$$

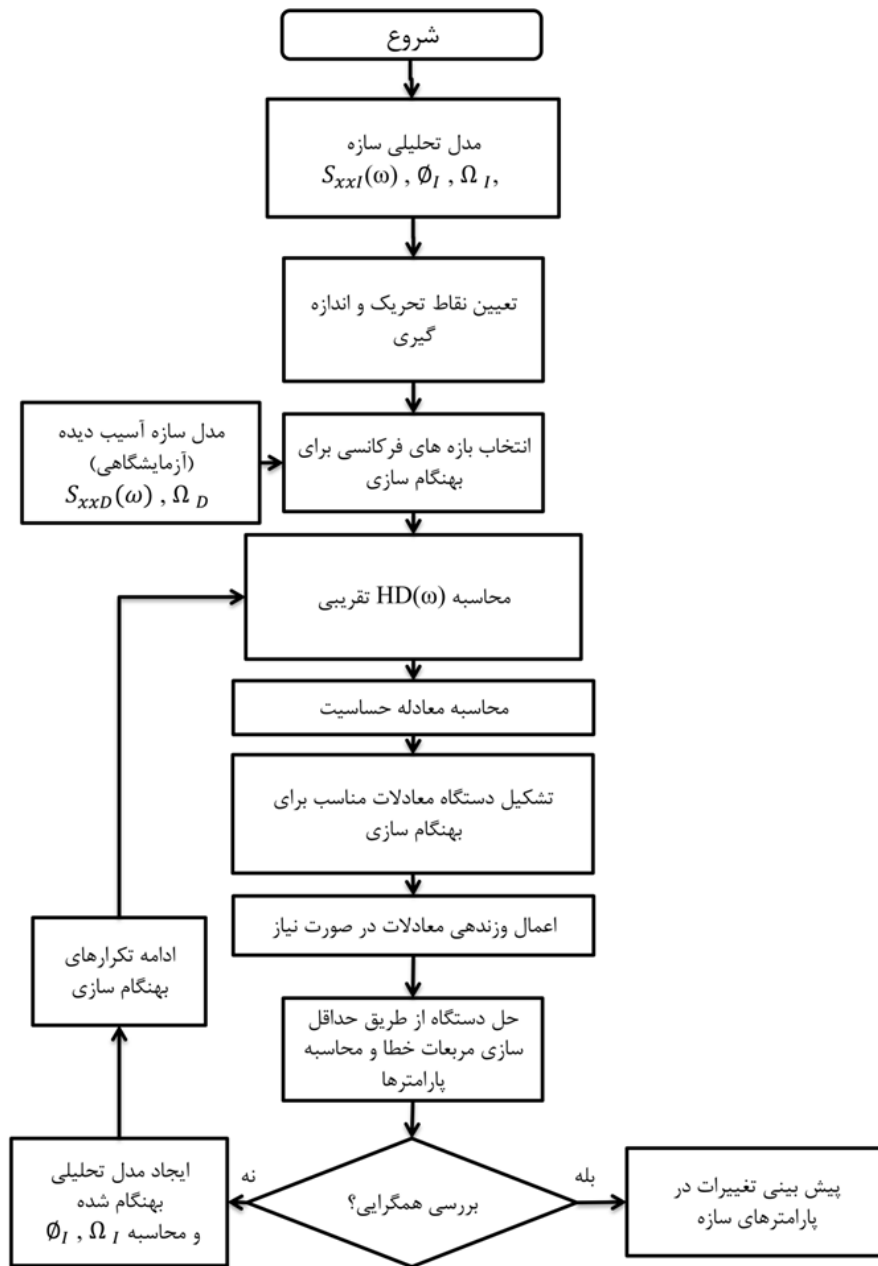
این معادله شامل فرکانس های طبیعی اندازه گیری شده مدل سازه واقعی (آسیب دیده) در چند فرکانس طبیعی اول و فرکانسهای طبیعی و شکل مودهای سازه سالم (مدل اجزا محدود) در بقیه مودها میباشد. فرض آن است که جرم سازه با وقوع خرابی تغییر نکند و خرابی به صورت تغییر خطی در پارامتر سختی سازه شبیه سازی شود (معادله ۳).

1 Liu

2 Elshafey

تکرارهای بهنگام سازی آغاز میشود و تا شناسایی تغییر در پارامترهای سازه‌های، ادامه مییابد. این فرآیند برای هر دسته چگالی طیفی خطای شبیهسازی شده در مدلسازی مونت-کارلو تکرار شده و میانگین و ضریب تغییرات پارامترها به عنوان نتایج بهنگامسازی گزارش میشود. در استفاده از این روش و سایر روشهای حوزه فرکانس، دانش نسبت به طیف نیروی تحریک کننده (ضربه) ضروری است. در مطالعه عددی اجرای روش برای سازه دولفین، نیروی تحریک برای مدل تحلیلی و آسیب دیده به صورت طیف نویز سفید در نظر گرفته شده است تا شرایط کارکرد روش در شناسایی پارامترها بررسی شود.

فرکانسهای طبیعی و ضرایب میرایی مودال سازه آسیب دیده نیاز دارد. همچنین شکل مودها، ضرایب میرایی، فرکانسهای طبیعی، تابع پاسخ فرکانسی و چگالی طیفی سازه تحلیلی نیز باید محاسبه شود. براساس این دادهها، تابع پاسخ فرکانسی مدل آسیب دیده ( $H_D(\omega)$ ) با استفاده از معادله ۲ تخمین زده می شود. به بیان بهتر  $H_D^{approx}(\omega)$  به جای  $H_D(\omega)$  در معادله حساسیت پیشنهاد شده مورد استفاده قرار میگیرد. بعد از انتخاب بازههای فرکانسی و تعیین نقاط تحریک و اندازهگیری، با ایجاد معادله حساسیت، ترتیب دادن دستگاه معادلات خطی و اعمال باندهای بالا و پایین بر پارامترهای سازه‌های،



شکل ۱. روندنمای روش بهنگام سازی

Fig 1. Flowchart of model updating method

### ۳- جرم افزوده و تاثیر آن

تستهای داده برداری ارتعاشی عموماً در آب آرام و در شرایط کنترل شده، انجام میشود. با فرض شرایط عدم وجود موج و صرفنظر از اندرکنش سازه و سیال، برای لحاظ شدن تاثیر آب بر پاسخ سازه مورد تحریک تاثیر جرم اضافی سیال مجاور به جرم سازه افزوده میشود. با فرض کوچک بودن دامنه نوسانات سازه در آب از اثر درگ سیال بر سازه صرفنظر شده است. تاثیر جرم سیال مجاور به صورت جرم افزوده برالمانهای مغروق در نظر گرفته میشود. برای محاسبه جرم افزوده از رابطه موریسون [۱۲] استفاده میشود که به صورت زیر تعریف می شود.

$$m = \rho \pi C_A \frac{D^2}{4}$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $D$  قطر لوله،  $C_A$  ضریب جرم افزوده میباشد که برای نسبت طول به قطر زیاد عدد یک تعیین میشود. در نظر گرفتن جرم افزوده منجر به واقعیت شدن فرکانسهای طبیعی و شکلمودهای محاسبه شده برای سازه میشود.

### ۴- مدل دولفین دسترسی و پهلوگیری شناور

اسکله پهلوگیری شناورهای تامین خوراک خام پالایشگاه جنوب کشور که دارای دو راهرو دسترسی شرقی و غربی ساخته شده از فولاد است، به منظور مطالعه حاضر انتخاب شده است. طول کلی اسکله ۳۲۰ متر و ۷ دولفین اصلی پهلوگیری کشتی، در سرتاسر آن قرار دارد. شکل ۲ نمایی از بخش شرقی اسکله را نشان میدهد. طول هر کدام از دو بخش شرقی و غربی ۱۳۸/۵ و بخش میانی ۴۳ متر است.



شکل ۲. نمای بخش شرقی اسکله فولاد

Fig 2. The view of east side of steel wharf

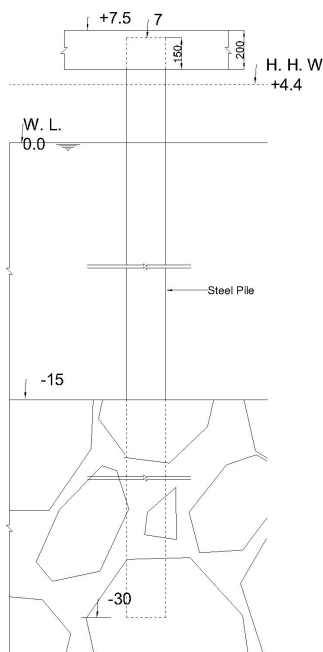
دولفینها سازه‌هایی هستند که بر حسب مورد برای پهلوگیری، مهاربندی، یا کمک به مانور شناورها مورد استفاده قرار میگیرند. بر اساس دسته بندی صورت گرفته درآیین نامه طراحی بنادر و سازههای دریایی ایران، دولفینهای مورد کاربری در اسکله مورد نظر، از نوع

دولفینهای انعطاف پذیر هستند [۱۳]. این دولفینها در معرض بارهای ناشی از پهلوگیری شناور هستند. دولفین مورد مطالعه، دارای ۱۵ متر ارتفاع از بستر دریا تا خط آبخور و ۷/۵ متر ارتفاع تا بالای روسازه صلب بتونی میباشد. همچنین طول گیرداری پای شمعیهای دولفین ۱۵ متر است. بر روی هر دولفین در محل پهلوگیری شناور یک ضربهگیر ساخته شده از مواد لاستیکی فشرده نصب شده است. شکل (۳-الف) سازه دولفین مورد نظر را نشان میدهد. شکل ۳-ب نمای کامل از یک پایل دولفین را نشان میدهد.



الف) نمای دولفین مورد بررسی

A. Percentage of overpressure loss compared

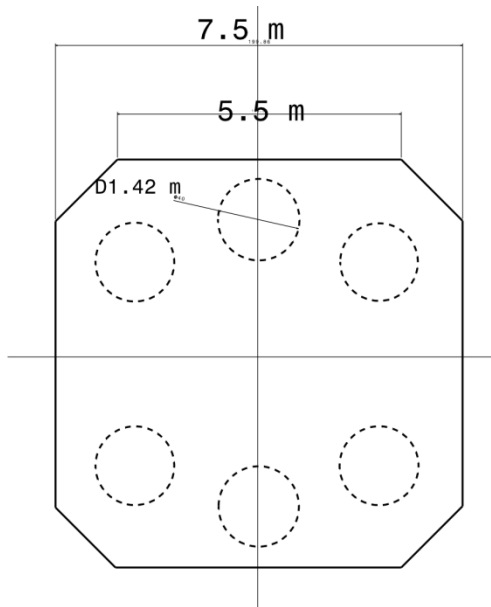


ب) نمای کامل از یک پایل دولفین  
B. Complete view of dolphin's pile

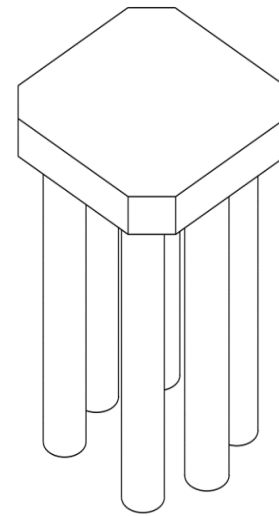
شکل ۳. نمای دولفین و پایل آن

Fig 3. Percentage of overpressure loss compared

چیدمان پایل ها در نمای ایزومتریک شکل ۴-الف و نما از بالای دولفین شکل ۴-ب و ارتفاع خط آب از بستر دریا در نمای از جلو آن، شکل ۴-ج به نمایش درآمده است.

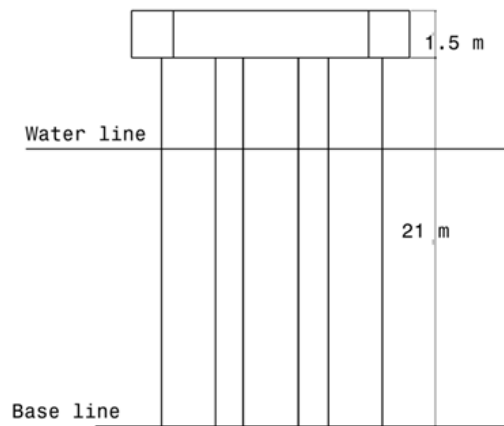


ب) نما از بالای دولفین  
B. Top view



Isometric view

الف) نمای ایزومتریک دولفین  
A. Isometric view



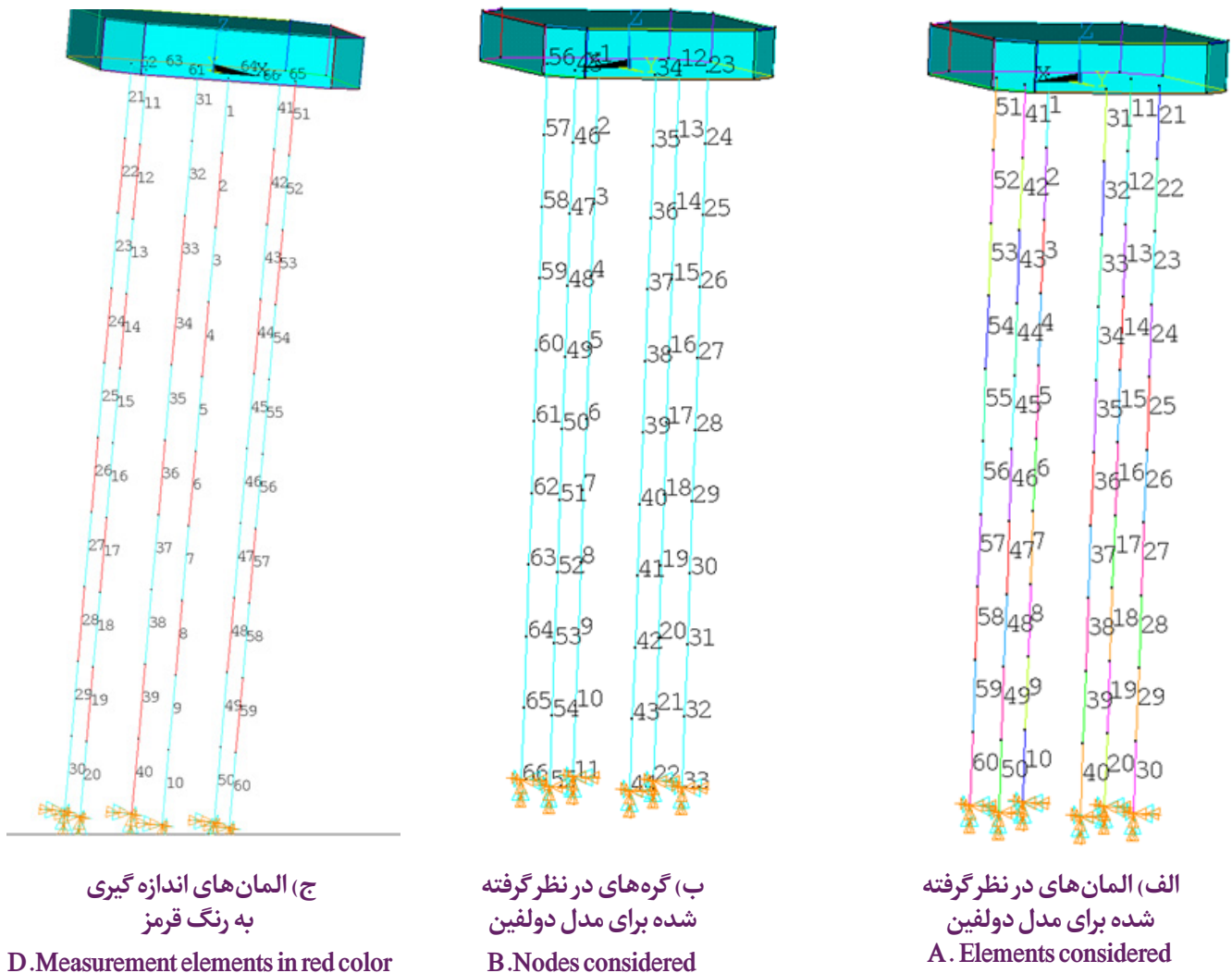
ج) نمای از جلو دولفین  
D. Front view

شکل ۴. نماهای مختلف و اندازه های دولفین مورد مطالعه

Fig 4. Three views of the dolphin platform and its dimensions

شده برای این دولفین دارای ۶۰ المان میباشد (برای هر پایل ده عضو در نظر گرفته شده است). در شکل ۵-الف و شکل ۵-ب گره ها و المان های در نظر گرفته شده برای مدل دولفین به نمایش درآمده است. همچنین در شکل ۵-ج المانهای اندازه گیری مشخص شده اند.

نظر به وجود روسازه صلب بتونی در بالای این سازه و وجود ۶ ستون قطور در ذیل آن، سازه از صلبیت زیادی برخوردار است. شناسایی پارامترهای سازه های مربوط به این ستونها به دلیل صلبیت سازه، از طریق بهنگام سازی نیازمند به روش قدرتمند و معادله حساسیت دقیق است. مدل اجزا محدود در نظر گرفته



شکل ۵. گره‌ها و المان‌های مدل دولفین و المان‌های اندازه‌گیری  
Fig 5. Elements, Nodes of the model and considered measurement elements

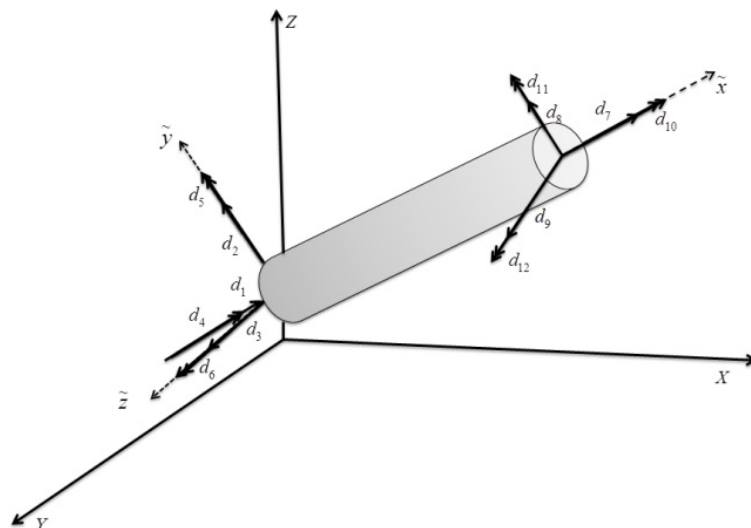
رفتار این المان همانگونه که در شکل نشان داده شده است، شامل خمش در دو صفحه، چرخش بدون وارپینگ و انتقال سه جهته در هر دو انتهای المان است. این المان در هر گره ۶ درجه آزادی دارد.

مشخصات مکانیکی و جرم افزوده آب در نظر گرفته شده برای مدل دولفین در جدول ۱ ارائه شده است. برای مدل‌سازی اجزا محدود پایه‌ها از المان قاب سه بعدی معرفی شده در شکل ۶ استفاده شده است.

جدول ۱. خصوصیات مکانیکی در نظر گرفته شده برای مدل دولفین

Table1. Mechanical properties of the dolphins' elements

$I_{x,y} (m^4)$	$J (m^4)$	$A (m^2)$	$\nu$	$E (Gpa)$	$\bar{m} (kg / m)$	$m^* (kg / m)$
0/018	0/036	0/0711	0/3	210	557/91	71/7



شکل ۶. شماتیک المان قاب سه بعدی [۹]

Fig 6. Schematic of 3D frame elements

بالای پایله‌ها اعمال می‌شود. این دولفین با وجود وزن متمرکز در بخش فوقانی و سطح مقطع اعضا از صلبیت بالایی برخوردار است. به عبارتی دیگر ۶ پایل این سازه در وضعیت مشابه سازه‌های قرار دارند که این مساله شناسایی را برای هر روشی مشکل می‌سازد. بنابراین برای شناسایی این سازه در وضعیت عملیات دریایی با یک تحریک نیاز به اعمال حساسه‌های بیشتر وجود دارد. به منظور بهنگامسازی این سازه یک تحریک در راستای پهلوگیری شناور در نظر گرفته شده است. همچنین بیست و چهار المان از شصت المان در نظر گرفته شده برای پایله‌های نگهدارنده دولفین نیز به عنوان محل اندازه‌گیری فرض شده‌اند. این المانها عبارتند از المان‌های ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲، ۱۴، ۱۷، ۱۹، ۲۲، ۲۴، ۲۶، ۲۸، ۳۳، ۳۴، ۳۶، ۳۹، ۴۰، ۴۲، ۴۴، ۴۸، ۵۱، ۵۳، ۵۷ و ۵۹. این المانها قبلا در شکل ۵-ج به نمایش درآمده‌اند.

در ایجاد مدل اجزا محدود، وزن روسازه صلب بتونی به صورت جرم افزوده سازه‌های یکنواخت، بر ۶ المان در وجه بالایی و متصل کننده پایله‌ها به یکدیگر در نظر گرفته شده است. این المانها به دلیل واقع شدن در محل روسازه بتونی، در مساله بهنگامسازی شرکت داده نمی‌شوند. به طور کلی مدل اجزا محدود این سازه با ۶۶ گره ایجاد شده است که دارای ۳۹۶ درجه آزادی است. با احتساب مقید بودن درجات آزادی مدل در بستر دریا، تعداد درجات آزادی فعال به ۳۶۰ میرسد. فرکانسهای طبیعی این سازه با در نظر گرفتن المانهای بالای هر پایل (۱، ۱۱، ۲۱، ۳۱، ۴۱، ۵۱) به عنوان المان خشک (بالای سطح آب) به ترتیب عبارتند از: ۱٫۵، ۴٫۷، ۱۴٫۷، ۲۷٫۶، ۴۱٫۸، ۵۸٫۲، ۷۸٫۶، ۱۰۱٫۲، ۱۲۸٫۲ هرتز. المان‌های وجه بالایی در بهنگام سازی لحاظ نشده‌اند. تنها اثر جرم متمرکز ناشی از روسازه بتونی بر درجات آزادی فوقانی المان‌های

## جدول ۲. حالات خرابی و بازه‌های فرکانسی در نظر گرفته شده برای خرابی دولفین

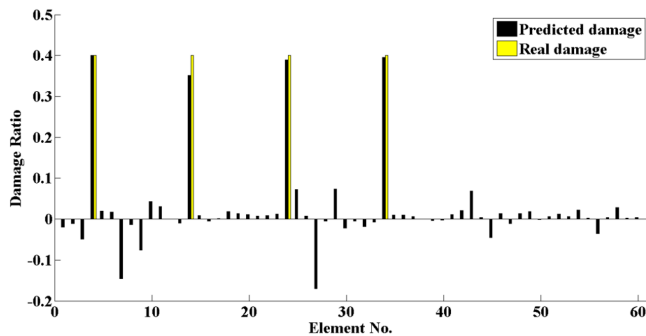
Table 2. Damage cases considered and frequency ranges

شماره حالت	کاهش سختی	بازه فرکانسی						
1	المان‌های آسیب دیده	4	14	24	34	4/7-5/1; 17/0-17/5		
	نسبت خرابی	4/0	4/0	4/0	4/0	18/3-18/7; 28/4-28/8		
2	المان‌های آسیب دیده	7	11	25	38	42	53	4/7-5/1; 16/9-17/4
	نسبت خرابی	3/0	25/0	2/0	25/0	3/0	2/0	18/3-18/7; 28/5-29
3	المان‌های آسیب دیده	1	17	22	35	43	58	4/8-5/3; 17/2-17/7
	نسبت خرابی	0/15	0/15	0/10	0/15	0/15	0/15	18/3-18/7; 28/5-29

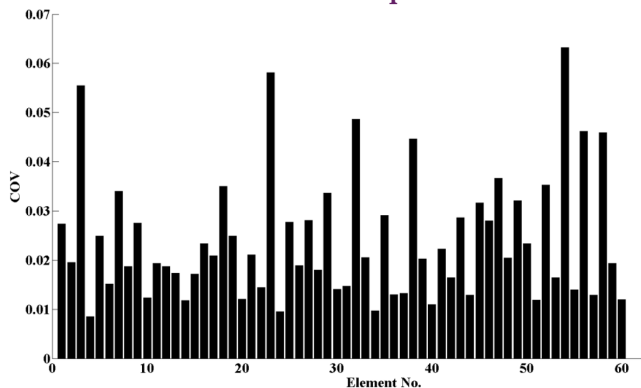
معرفی شده‌اند. میزان خرابی به صورت نسبتی از سختی اولیه مدل سازه که کاهش یافته است ارائه شده است. فرکانسهای تحریک برای این مساله

حالات خرابی مختلفی برای این سازه دولفین از نظر محل خرابی و سطح خرابی در نظر گرفته شده است. این حالات خرابی در جدول ۲

ایجاد شده پیش فرض<sup>۱</sup> و خرابیهای پیش بینی<sup>۲</sup> شده به وسیله روش رانسهیل مینماید. از نمایه ضریب تغییرات<sup>۳</sup> پارامترهای شناسایی شده برای تشخیص دقت شناسایی صورت گرفته استفاده میشود. در نتایج ارائه شده، محور افقی نشان دهنده شماره اجزا و در بخش (الف) محور عمودی نشانگر میانگین تغییر در پارامتر سختی اجزا و در بخش (ب) ضریب تغییرات پارامترهای شناسایی شده در اطراف میانگین در شبیه سازی مونت-کارلو میباشد. به این معنا که هر چه ضریب تغییرات پارامترهای شناسایی شده کمتر باشد، شناسایی صورت گرفته طی بهنگام سازی، از دقت بیشتری برخوردار است.



الف) میانگین پارامترهای شناسایی شده  
A. The mean estimated parameters



ب) ضریب تغییرات پارامترهای شناسایی شده  
B. COV of estimated parameters

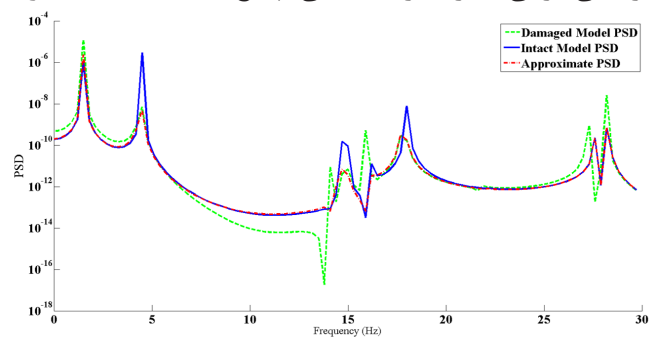
شکل ۹. حالت خرابی ۱- با در نظر گرفتن المان های خیس و خشک  
Fig 9. First damage case considering wet and dried elements

نتایج شکل ۹ نشان میدهد که با وجود شش المان با عدم برابری نسبت سختی به جرم و خطای اندازه گیری، روش همچنان در شناسایی المان های آسیب دیده در دولفین پهلوگیری شناور موفق است. البته به دلیل عدم برابری نسبت سختی به جرم در تمام المان ها کیفیت نتایج نسبت به نتایج شکل ۸ کاهش می یابد. نتایج سایر حالات شناسایی خرابی در شکل ۱۰ تا شکل ۱۲ ارائه شده است.

در شکل ۱۱ نتایج شناسایی حالتی از خرابی با میزان کمتر نشان داده شده است. شناسایی خرابیهای کمتر برای سازه های صلب در

بر اساس معیار مطرح شده توسط پدram و همکاران [۹] در اطراف فرکانسهای طبیعی اول انتخاب شده است و در جدول ۲ معرفی شده است. در هر مورد از این تحلیل ها، ۱۵ درصد خطای اندازه گیری به پاسخ سازه آسیب دیده افزوده شده است و شبیه سازی مونت-کارلو صورت گرفته است. برای واقعیت شدن تحلیل عددی، شرایط عدم امکان تحریک سازه و عدم امکان اندازه گیری پاسخ تافرکانسهای بالاتر نیز مدنظر قرار گرفته است.

همچنین یک نمونه از طیف چگالی توان پاسخ این دولفین در حالت سازه سالم و آسیب دیده در شکل ۷ ارائه شده است. از این شکل، مشخص است که وقوع خرابی در فرم کاهش سختی المانی منجر به اختلاف پاسخ سازه آسیب دیده (دارای خرابی) و مدل سازه سالم (تحلیلی) میشود که این اختلاف در فرکانسهای بالاتر محسوستر میشود. استفاده از رابطه تابع پاسخ فرکانسی تقریبی منجر به تقریب مناسبی از پاسخ سازه آسیب دیده میشود.

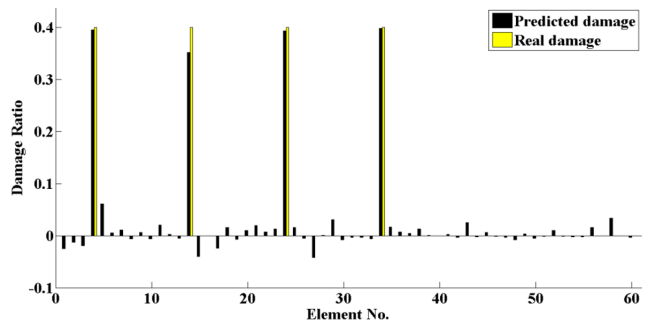


شکل ۷. طیف چگالی توان پاسخ نمونه برای مدل دولفین مورد مطالعه در حالات آسیب دیده و سالم

Fig 7. Typical power spectral density (PSD) of dolphin model in damaged and intact condition

به منظور مطالعه تاثیر عدم وجود جرم افزوده سیال در ردیف بالای المانهای ستونها، ابتدا حالت اول خرابی بدون احتساب جرم افزوده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شناسایی خرابی برای این حالت در شکل ۸ ارائه شده است.

سپس، حالت خرابی اول با در نظر گرفتن المانها به جز بالاترین المان های هر ستون به عنوان المان خیس، و خطای اندازه گیری، بررسی شده است. برای ارائه نتایج شناسایی خرابی، از نمودارهای میله ای استفاده میشود که مقایسه خرابی



شکل ۸. حالت خرابی ۱- بدون در نظر گرفتن المان های خیس و خشک  
Fig 8. Damage case 1 - without considering wet and dry elements

1 Real Damage

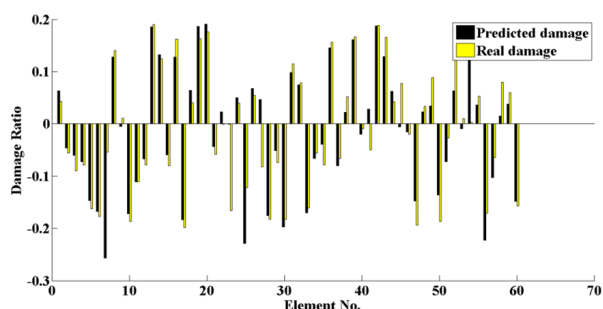
2 Predicted Damage

3 Coefficient of Variation

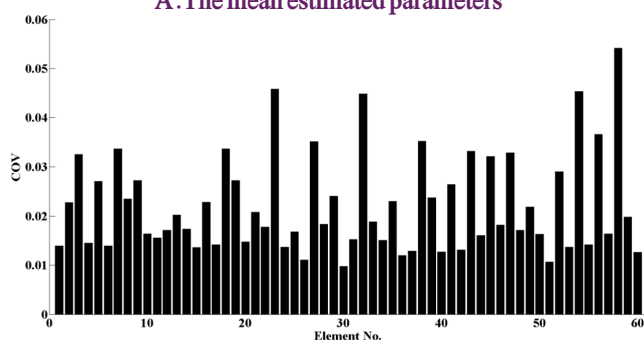


مدل آسیب دیده تحت تاثیر خطای اندازه‌گیری خواهد بود. نتیجه ارائه شده نشانگر آن است که هرچند که خطا در شناسایی نسبت به حالات قبل اندکی افزایش یافته است ولی دقت نتایج در شناسایی تمام المان‌ها خوب و قابل قبول است.

وقوع خرابی به صورت گسترده، حالتی از خرابی است که عمدتاً در محیط‌های خورنده دریایی به وقوع می‌پیوندد. در واقع این نوع از خرابی منجر به افت تصادفی و غیر یکنواخت سختی در تمام اجزا و یا بخشی از اجزای سازه می‌شود. در این مطالعه عددی برای نشان دادن



الف) میانگین پارامترهای شناسایی شده  
A. The mean estimated parameters



ب) ضریب تغییرات پارامترهای شناسایی شده  
B. COV of estimated parameters

شکل ۱۲. مطالعه شناسایی خرابی در مورد دولفین پهلوگیری شناور با در نظر گرفتن نویز و المان‌های خیس و خشک

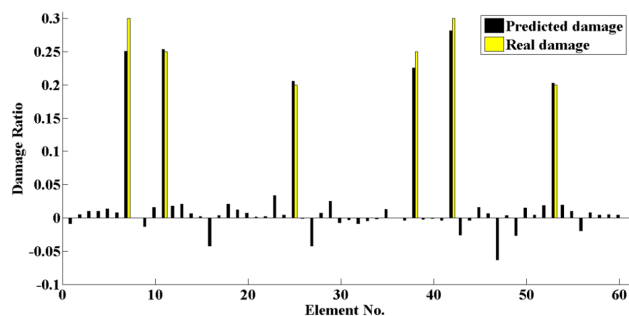
Fig 12. Distributed damage case considering wet, dried elements and measurement error

توانمندی روش بهنگام سازی افزایش پارامترها نیز در شبیه سازی خرابی گسترده مدنظر قرار گرفته است. بنابراین یک حالت خرابی گسترده نیز برای مدل دولفین در نظر گرفته شده است. نتایج ارائه شده در شکل ۱۲ نشانگر آن است که پارامترهای سختی اجزا در این حالت با دقت مناسبی شناسایی میشوند.

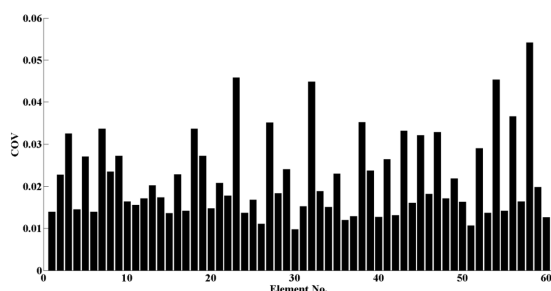
### ۵- تخمین طیف چگالی نیروی تحریک

مساله دیگری که در پایش سلامت سازه‌ها دارای اهمیت است، اندازه‌گیری و یا تقریب نیروی تحریک وارد شده بر سازه مورد نظر است

حضور جرم افزوده سیالی و سازه‌های دارای اهمیت بیشتری است. به این دلیل که با کم بودن خرابی، اختلاف میان پاسخ مدل تحلیلی و



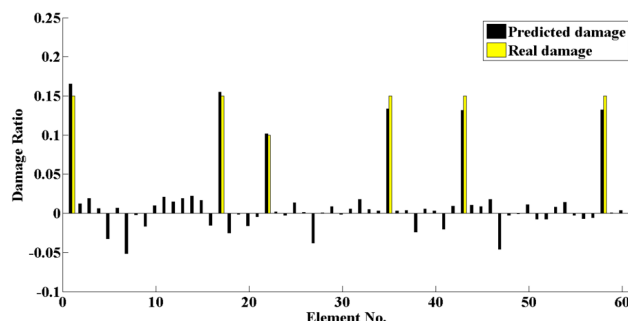
الف) میانگین پارامترهای شناسایی شده  
A. The mean estimated parameters



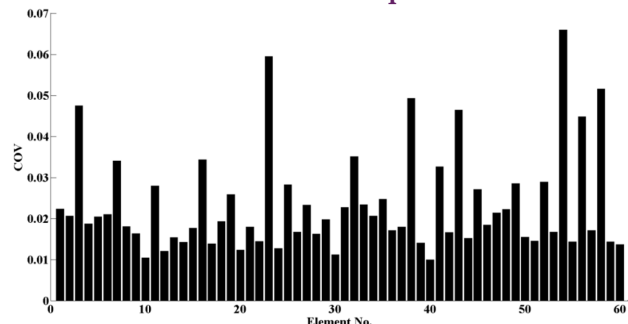
ب) ضریب تغییرات پارامترهای شناسایی شده  
B. COV of estimated parameters

شکل ۱۰. حالت خرابی ۲ با در نظر گرفتن نویز و المان‌های خیس و خشک

Fig 10. Second damage case considering wet, dried elements and measurement error



الف) میانگین پارامترهای شناسایی شده  
A. The mean estimated parameters

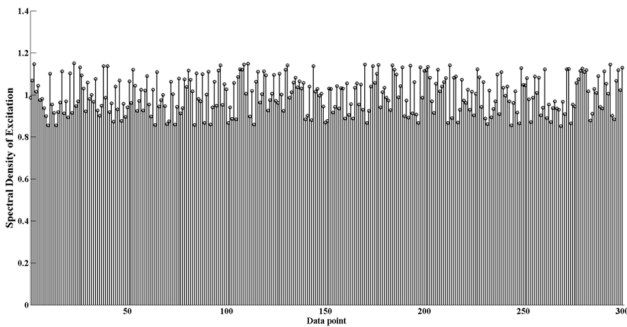


ب) ضریب تغییرات پارامترهای شناسایی شده  
B. COV of estimated parameters

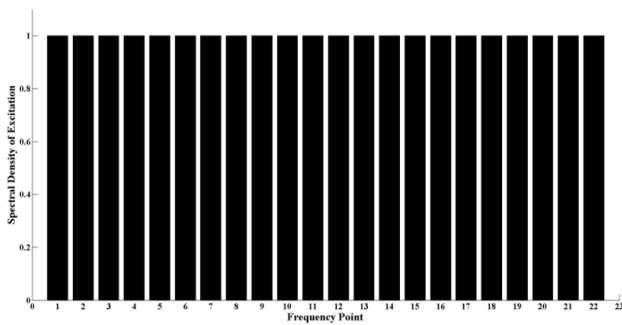
شکل ۱۱. حالت خرابی ۳ با در نظر گرفتن نویز و المان‌های خیس و خشک

Fig 11. Third damage case considering wet, dried elements and measurement error

میکنند. در قسمت (الف) این شکل، در یک نقطه فرکانسی مشخص، به ازای تمام نقاط داده مقدار طیف چگالی تحریک ارائه شده است. در قسمت (ب) این شکل میانگین چگالی محاسبه شده در تمام نقاط فرکانسی محاسبه شده است که تقریباً برابر با واحد است. بنابراین مشخص میشود که رابطه تقریبی قابلیت کاربرد برای محاسبه بخشی از طیف تحریک وارد شده بر مدل را داراست.



الف) طیف چگالی تحریک محاسبه شده در یک فرکانس در ۳۰۰ نقطه داده  
A. Calculated PSD in one frequency at 300 data points



ب) میانگین طیف تحریک محاسبه شده در نقاط فرکانسی

B. Mean calculated excitation PSD in frequency points

شکل ۱۳. شناسایی طیف چگالی تحریک با استفاده از راهکار پیشنهادی

Fig 13. Calculation of the excitation PSD using proposed method

### ۶- بررسی اثر خطا در طیف تحریک

از آنجا که اندازه گیری و محاسبه طیف تحریک با خطا همراه است و روش استفاده شده در این مقاله نیز به این اندازه گیری وابسته است، اثر وجود خطا در طیف تحریک بررسی شده است. برای این منظور حالت خرابی اول مجدداً با احتساب ۱۰ درصد خطای اتفاقی در طیف تحریک مورد مطالعه قرار گرفت. مقایسه نتیجه ارائه شده در شکل ۱۴ با شکل ۸، نشان میدهد که بهنگام سازی موفق در حضور این میزان خطا در طیف تحریک از طریق روش مبتنی بر طیف چگالی توان قابل حصول است.

[۱۴]. سازه دولفین مورد نظر در این مطالعه در اثر پهلوگیری شناورهای سوخت رسان تحریک میشود، لذا اندازه گیری و یا تقریب نیروی تحریک وارده دارای اهمیت میباشد. از طرفی با توجه به ابعاد این سازه و میزان نیروی وارده، نصب تجهیزات اندازه گیری مشکل می نماید. با فرض وجود تحریکات غیرهمبسته در چند درجه آزادی از سازه، درایه های چگالی طیفی در یک درجه آزادی ۱ و یا میان درجات آزادی ۲ به صورت روابط ۷ و ۸ خواهد بود.

$$S_{ll}^{EE}(\omega) = \sum_{i=1}^n H_{dli}^*(\omega) H_{dli}(\omega) S_{ii}^{ff}(\omega) \quad (7)$$

$$S_{lm}^{EE}(\omega) = \sum_{i=1}^n H_{dli}^*(\omega) H_{dmi}(\omega) S_{ii}^{ff}(\omega) \quad (8)$$

با توجه به دقت بالای رابطه تقریبی ۲ در بازه مناسب بهنگام سازی اطراف فرکانسهای طبیعی [۱۰، ۱۵]، در اینجا پیشنهاد میشود که به جای استفاده از پاسخ فرکانسی سازه واقعی از رابطه تقریبی استفاده شود. به این صورت که پس از محاسبه طیف چگالی توان پاسخ سازه مورد نظر (سمت چپ معادله ۵ و ۶)،  $H_{ed}^{approx}$  تقریبی در سمت راست روابط ۵ و ۶ جایگزین و آنگاه در نقاط فرکانسی مورد نظر  $S_{ii}^{ff}$  محاسبه میشود. با میانگینگیری از مقدار محاسبه شده در بین تمام چگالیهای طیفی و میان چگالیهای طیفی در هر فرکانس، مقدار  $S_{ii}^{ff}$  مورد نظر محاسبه میشود. براساس مطالعاتی که تاکنون صورت گرفته، شناسایی اندازه و محل چند تحریک به طور همزمان با مشکلات عدیده ای روبروست. لذا در این مجال بررسی رویکرد پیشنهادی در تخمین طیف چگالی تحریک با علم به تحریک مدل دولفین در یک درجه آزادی مشخص صورت می پذیرد.

به منظور مطالعه عددی راهکار پیشنهاد شده، فرض میشود که تحریک نویز سفید با دامنه طیف چگالی توانی واحد در درجه آزادی یک (متناظر با تحریک سازه از طریق اعمال ضربه به روسازه بتونی) و ۱۵ درصد خطای اندازه گیری فرض میشود. با استفاده از راهکار پیشنهادی، حالت خرابی شماره ۱ مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از ۲۴ حساسه اندازه گیری در هر فرکانس ۳۰۰ داده ایجاد میکند که با استفاده از راهکار پیشنهادی  $S_{ii}^{ff}$  محاسبه میشود. سپس در هر نقطه فرکانسی میانگینگیری صورت میگیرد که نهایتاً چگالی طیفی نیروی تحریک در نقاط فرکانسی مورد نظر به صورت شکل ۱۳ ارائه میشود. گفتنی است که بازه فرکانسی در نظر گرفته شده برای این مورد همان بازه فرکانسی مطرح شده در جدول ۲ است که به فواصل ۰/۱ هرتز مورد استفاده قرار گرفته و مجموعاً ۲۲ نقطه فرکانسی را ایجاد

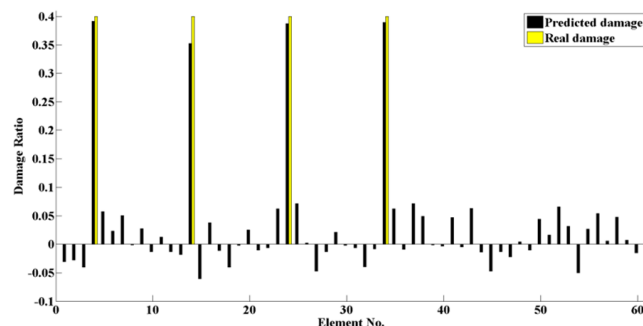
1 Auto Spectral Density (ASD)

2 Cross Spectral Density (CSD)

آب مجاور به صورت جرم افزوده به المانهای مجاور اضافه شد. نتایج حاکی از شناسایی مناسب محل و میزان خرابی در المانها میباشد. همچنین از مطالعات صورت گرفته تاثیر جرم افزوده سیال با در نظر گرفتن المانهای تر (زیر آب) و خشک (بیرون از آب)، در نتایج بهنگام سازی مشخص شد. نتایج به دست آمده در مطالعه عددی، موید توانمندی روش در شناسایی پارامترهای این سازه مستقر در دریا میباشد. پایداری روش در مقابل خطای اندازگیری از طریق شبیه سازی مونت-کارلو با استفاده از خطای اتفاقی تحقیق و ارزیابی شد. نظر به اهمیت تخمین نیروی ایجاد شده ناشی از تحریک، راهکاری جهت تخمین طیف تحریک با استفاده از جانشینسازی تابع چگالی طیفی تقریبی در معادله طیف چگالی سازه ارائه شد که در مطالعه عددی از دقت خوبی برای تخمین طیف یک تحریک، برخوردار میباشد. اثربخشی نتایج به دست آمده در فاز عددی مارا به سوی عملیاتی سازی این روش در مطالعات و پژوهش های آینده سوق می دهد.

#### ۸- تقدیر و تشکر

این مقاله از نتایج مطالعات رساله دکتری با عنوان «شناسایی خرابی از طریق بهنگام سازی مدل اجزا محدود سازه ها با استفاده از طیف چگالی توان پاسخ»، مورد حمایت شرکت ملی و مهندسی ساختمان نفت ایران، مستخرج شده است. بدینوسیله از حمایت های شرکت ملی و مهندسی ساختمان نفت ایران، تشکر و قدردانی می شود. نویسندگان مراتب قدردانی خود را از خانم مهندس ناصحی و آقای مهندس محسن پور (کارشناسان و پرسنل پالایشگاه نفت بندرعباس)، به جهت یاری در بازدید از اسکله فولاد و جمع آوری اطلاعات فنی، اعلام می نمایند.



شکل ۱۴. حالت خرابی ۱- با در نظر گرفتن ده درصد خطا در چگالی طیفی تحریک  
Fig 14. First damage case considering percent error in excitation PSD 10

#### ۷- جمع بندی

در این مقاله، شاخص طیف چگالی توان پاسخ برای شناسایی خرابی از طریق بهنگام سازی مدل اجزا محدود مدل سکوی دولفین دریایی اسکله پالایشگاه نفت مورد مطالعه قرار گرفت. سکوهایی دولفین علاوه بر اینکه محل استقرار تجهیزات تخلیه کشتی میباشد، حائل میان اسکله و کشتیهای پهلوگیرنده هستند. لذا، پایش وضعیت آنها عاملی برای ارتقاء عملکرد و مانع از وقوع شکست فاجعه بار و خسارات جانی، مالی و اختلال در عملکرد آنها میشود. نتایج به دست آمده از بررسی بهنگام سازی مدل اجزا محدود این سازه، حاکی از موفقیت اجرای روش بهنگام سازی در شناسایی پارامترهای آن در فاز عددی میباشد. در فاز مطالعات عددی، حالات خرابی مختلفی از نظر اندازه و مکان خرابی مورد بررسی قرار گرفت. این حالات خرابی به گونهای در نظر گرفته شده است که محلها و اندازه های مختلفی را برای خرابی شامل شود و نمایندگی کند. همچنین اثر

#### فهرست علائم

ماتریس سختی	$K$	سطح مقطع	A
ماتریس سختی المان nام	$K_n$	ماتریس نگاشت کرنش-جابجایی	B
ماتریس جرم	M	ماتریس میرایی	C
جرم سازه های در واحد طول	$\bar{m}$	مدول الاستیسیته	E
جرم افزوده سیالی در واحد طول	$m^*$	ضریب تغییرات	COV
پارامترهای سازه های	P	ماتریس تابع پاسخ فرکانسی	H
چگالی طیفی نیروی تحریک	$S_{FF}$	مزدوج مختلط تابع پاسخ فرکانسی	$H^*$
چگالی طیفی پاسخ کرنش سازه	$S_{\epsilon\epsilon}$	ماتریس تابع پاسخ فرکانسی سازه آسیب دیده	$H_d$
تابع حساسیت سختی	$S^S$	ماتریس تابع پاسخ فرکانسی تقریبی سازه آسیب دیده	$H_d^{Approx.}$
ماتریس سختی دینامیکی	Z	ممان اینرسی قطبی	J
ضریب جرم افزوده	$C_A$	قطر لوله	D

- [7] A.A. Elshafey, M.R. Haddara, H. Marzouk, Damage detection in offshore structures using neural networks, *Marine Structures*, 23(1) (2010) 131-145.
- [8] B. Asgarian, V. Aghaeidoost, H.R. Shokrgozar, Damage detection of jacket type offshore platforms using rate of signal energy using wavelet packet transform, *Marine Structures*, 45 (2016) 1-21.
- [9] M. Pedram, A. Esfandiari, M.R. Khedmati, Finite element model updating using strain-based power spectral density for damage detection, *Structural Control and Health Monitoring*, (2016).
- [10] M. Pedram, A. Esfandiari, M.R. Khedmati, Damage detection by a FE model updating method using power spectral density: Numerical and experimental investigation, *Journal of Sound and Vibration*, 397 (2017) 51-76.
- [11] H. Malekzhehtab, A. Golafshani, Damage detection in an offshore jacket platform using genetic algorithm based finite element model updating with noisy modal data, *Procedia Engineering*, 54 (2013) 480-490.
- [12] J.F. Wilson, *Dynamics of offshore structures*, John Wiley & Sons, 2003.
- [13] Regulation, Management and planning organization of Iran, Port and Offshore structures design regulation (structure and berthing facility), (In persian), (1385).
- [14] D. Adams, *Health monitoring of structural materials and components: methods with applications*, John Wiley & Sons, 2007.
- [15] A. Esfandiari, F. Bakhtiari-Nejad, A. Rahai, M. Sanayei, Structural model updating using frequency response function and quasi-linear sensitivity equation, *Journal of sound and vibration*, 326(3) (2009) 557-573.

## علائم یونانی

بیان تغییرات	$\Delta$
فرکانس زاویه‌های	$\omega$
فرکانس طبیعی	$\Omega$
ضریب میرایی مودال	$\xi$
شکل مود	$\phi$
چگالی سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)	$\rho$

## مراجع

- [1] J.K. Vandiver, Detection of structural failure on fixed platforms by measurement of dynamic response, in: *Offshore Technology Conference*, Offshore Technology Conference, 1975.
- [2] O. Salawu, Detection of structural damage through changes in frequency: a review, *Engineering structures*, 19(9) (1997) 718-723.
- [3] H. Li, J. Wang, S.-L.J. Hu, Using incomplete modal data for damage detection in offshore jacket structures, *Ocean Engineering*, 35(17) (2008) 1793-1799.
- [4] B. Asgarian, M. Amiri, A. Ghafooripour, Damage detection in jacket type offshore platforms using modal strain energy, *Structural Engineering and Mechanics*, 33(3) (2009) 325-337.
- [5] F. Liu, H. Li, W. Li, B. Wang, Experimental study of improved modal strain energy method for damage localisation in jacket-type offshore wind turbines, *Renewable Energy*, 72 (2014) 174-181.
- [6] G. Liu, Y. Zhai, D. Leng, X. Tian, W. Mu, Research on structural damage detection of offshore platforms based on grouping modal strain energy, *Ocean Engineering*, 140 (2017) 43-49.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Pedram, M. R. Khedmati, A. Esfandiari, H. Kazem, Damage detection in dolphin platform of a wharf by finite element model updating, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(3)(2019)479-490.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13674.5458

