

Evaluation of the Performance of the Inverse Vibration Algorithm in Damage Detection of a 2D Shear Model in a Damped Offshore Platform

Roohollah Najafi¹, Mohammad Ali Lotfollahi Yaghin^{2*} , Alireza Mojtahedi²

1. PhD Candidate, Civil Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2. Professor, Civil Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract

Fixed-jacket offshore platforms are among the most complex civil engineering structures, subjected to various damaging loads throughout their operational lifespan. The failure of such structures can lead to catastrophic consequences, including significant loss of human life and severe environmental and economic damages. Given the critical importance of uninterrupted oil extraction on these platforms, continuous structural health monitoring (SHM) has become a fundamental necessity. Effective SHM requires a thorough understanding of the platform's vibrational response, which is inherently dependent on its intrinsic and dynamic properties, including stiffness, mass, damping matrices, and natural frequencies. Without access to these fundamental parameters, an accurate assessment of the dynamic behavior of the platform remains unattainable. One of the key challenges in offshore structural health monitoring is the precise identification and estimation of these dynamic parameters under real-world environmental and operational loads. Damage detection techniques rely heavily on changes in these parameters to diagnose structural deficiencies at an early stage. The inverse vibration method has emerged as a promising approach for damage detection by evaluating variations in dynamic properties and structural matrices. This method leverages modal data obtained from structural responses to irregular and environmental wave loads to identify and localize potential damage. Given that offshore platforms are subjected to complex and highly variable loading conditions, robust numerical and computational approaches are required to extract meaningful insights from vibrational data. In this study, the proportional Rayleigh damping model was employed as a method for estimating the stiffness matrices before and after structural damage. Rayleigh damping is a widely used technique in structural dynamics that considers mass and stiffness proportional damping. By implementing inverse vibration methods, this study systematically analyzed structural behavior under dynamic loading conditions. The effectiveness of this approach was evaluated through numerical simulations on simplified and constrained 2D shear models. These models served as an idealized representation of offshore platforms, enabling controlled assessment of the proposed methodology. The results of this study revealed a significant correlation between the damping ratio and the accuracy of damage detection calculations. Specifically, increasing the damping ratio within the software model led to a noticeable reduction in the precision of the damage identification process. This finding underscores the importance of carefully selecting damping parameters when implementing inverse vibration methods for real-world applications. Furthermore, the study highlights the need for refined computational techniques that can mitigate the adverse effects of high damping on damage detection accuracy. Overall, this research contributes to the advancement of offshore structural health monitoring by demonstrating the feasibility of inverse vibration methods in detecting damage through changes in dynamic properties. The study also provides valuable insights into the limitations posed by high damping ratios in numerical models and underscores the importance of refining SHM techniques for enhanced reliability. The findings presented in this work can serve as a foundation for future investigations into advanced numerical modeling approaches and experimental validations aimed at improving damage detection capabilities in offshore structures. By integrating high-fidelity simulations with field data, future research can further enhance the applicability of these methodologies in real-world offshore engineering scenarios, ultimately improving the safety and resilience of offshore platforms.

Review History

Received: Apr 5, 2025

Revised: Aug 5, 2025

Accepted: Dec 28, 2025

Keywords

Damage Detection

Damage Localization

Inverse vibration technique

Rayleigh damping

* Corresponding Author Email: lotfollahi@tabrizu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-7935-2126



ارزیابی عملکرد الگوریتم ارتعاش معکوس در تشخیص خرابی در مدل دو بعدی برشی در سکوی دریایی میرا

روح الله نجفی^۱، محمدعلی لطف الهی یقین^{۲*} , علیرضا مجتهدی^۲

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران- گرایش سواحل، بندر و سازه های دریایی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

در سال های اخیر، پایش سلامت سازه های و تشخیص خرابی در سکوهای فراساحلی به یکی از نیازهای اساسی در مهندسی سازه های دریایی تبدیل شده است. این سازه ها به طور مستمر در معرض نیروهای محیطی شدید از جمله امواج، باد، زلزله و بارهای بهره برداری قرار دارند که می تواند به آسیب های تدریجی در اجزای سازه ای منجر شود. یکی از روش های مؤثر در شناسایی آسیب در چنین سیستم هایی، الگوریتم ارتعاش معکوس است که با بهره گیری از پارامترهای مودال شامل فرکانس های طبیعی و اشکال مودی، تغییرات سختی را در سازه استخراج کرده و محل و شدت خرابی را تخمین می زند. با این حال، بیشتر مطالعات پیشین این روش را برای سیستم های بدون میرایی یا با میرایی ناچیز بررسی کرده اند و اثر میرایی، به ویژه میرایی رایلی، بر دقت عملکرد این الگوریتم به طور جامع ارزیابی نشده است. در این پژوهش، تأثیر میرایی رایلی بر دقت الگوریتم ارتعاش معکوس در شناسایی آسیب در سکوی جکت فراساحلی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، یک مدل قاب دو بعدی برشی از سکوی دریایی در محیط OpenSeesPy مدل سازی شد و بارگذاری موج به صورت طیف نامنظم JONSWAP با دوره بازگشت صد

کلمات کلیدی

تشخیص خرابی
تعیین محل خرابی
الگوریتم ارتعاش معکوس
میرایی رایلی

ساله اعمال شد. میرایی رایلی در سه سطح (۳، ۵ و ۷ درصد) در مودهای اول و سوم لحاظ شد. سناریوهای خرابی با کاهش سختی تراز سوم (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) اعمال شدند و از طریق الگوریتم ارتعاش معکوس، ماتریس سختی تخمینی استخراج و با ماتریس اولیه مقایسه شد. نتایج عددی نشان داد که افزایش میزان میرایی منجر به کاهش دقت الگوریتم در تخمین محل و شدت خرابی می شود. به طور خاص، در سطح میرایی ۷ درصد، انحراف قابل توجهی بین شدت خرابی واقعی و مقدار پیش بینی شده مشاهده شد، در حالی که در میرایی ۳ درصد، هماهنگی بسیار خوبی به دست آمد. این یافته ها بیانگر آن است که میرایی یکی از پارامترهای کلیدی مؤثر بر درستی الگوریتم های ارتعاشی است و عدم در نظر گرفتن آن می تواند منجر به نتایج گمراه کننده شد.

۱- مقدمه

انواع خطرات و آسیب های محیطی و غیر محیطی خواهند بود.

عوامل آسیب، زیر ساخت ها را در دوره بهره برداری دچار تغییراتی در هندسه سازه، اتصالات و مولفه های سختی و مقاومت اجزای

سازه هایی که توسط بشر ساخته می شوند، دارای عمر محدودی هستند و از زمانی که مورد بهره برداری قرار می گیرند در معرض

* رایانامه نویسنده مسئول: lotfollahi@tabrizu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-7935-2126

کپی رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه ای کپی، باز نشر و باز آفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیر تجاری استفاده کنید.



تشکیل دهنده می‌کند. این تغییرات در قالب فرآیندهایی مانند فرسایش، خستگی، بارگذاری‌های غیر استاندارد، آسیب‌های ناشی از تغییرات دما و افت کیفیت مصالح، سبب کاهش عملکرد مورد انتظار سازه‌ها و زیرساخت‌های عمرانی می‌شوند. به طور کلی آسیب‌ها و خرابی‌هایی که در سازه‌ها رخ می‌دهد باعث تغییر در مولفه و مشخصات دینامیکی سازه‌ها و کاهش سطح بهره‌وری سازه می‌شود. نکته حائز اهمیت این است که با اطمینان یافتن از یکپارچگی سازه‌ها و بازرسی‌های مداوم و به موقع در شرایطی که سازه‌ها در حال سرویس‌دهی می‌باشند، می‌توان مکان‌های آسیب دیده را شناسایی و از خرابی‌های مصیبت‌بار جلوگیری کرد. عملیات پایش می‌تواند نقش اثربخشی در رسیدن به بهینه‌ترین حالت نگهداری، تعمیر و تعویض عضوهای آسیب دیده در سازه داشته باشد. سکوهای فراساحلی از جمله سازه‌هایی هستند که همواره تحت اثر بارهای مختلفی قرار می‌گیرند به شکلی که می‌توانند آسیب‌های جزئی و کلی در سکو ایجاد کنند و باعث خسارات شدید در سکو و توقف بهره‌برداری آن شوند. از این رو در دهه‌های گذشته تحقیق روی سیستم‌های پایش سلامت سازه‌ای (Structural Health Monitoring (SHM)) به دلیل هزینه بالای تعمیر خرابی و افت عملکرد این سازه‌ها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران در حوزه شناسایی سیستم بوده است. روش‌های سنتی پایش برای سکوهای فراساحلی بیشتر نیازمند حضور فیزیکی غواصان و مهندسان است و به صورت بازرسی چشمی انجام می‌شود که به دلیل معایب و محدودیت‌های موجود در این سازه‌های پیچیده، این روش‌ها بسیار وقت‌گیر، پرهزینه و دارای خطای زیادی است. بنابراین وجود یک روش جامع و قوی به منظور به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز در امر پایش سلامت سازه در طول عمر بهره‌برداری در این نوع سازه‌ها ضروری است. استخراج مشخصات دینامیکی ذاتی سازه‌ها یکی از بخش‌های حیاتی در روند پایش سلامت سکوهای دریایی می‌باشد. با توجه به بررسی این مشخصات می‌توان تمایز بین سازه آسیب دیده و سالم را برای تشخیص ویژگی‌های حساس سازه به خرابی را مشخص نمود. با توجه به این نکته که تحریک‌های محیطی را به علت ذات اتفاقی آن‌ها، نمی‌توان به شکل توابع مشخصی از زمان بیان نمود، به همین علت از الگوریتم‌های احتمالاتی به منظور تعیین آن‌ها استفاده می‌شود. بررسی خواص دینامیک سازه به کمک

تحریک محیطی، ساده‌ترین روش به منظور سنجش مشخصات دینامیکی سازه و شناسایی پاسخ آن می‌باشد. روش ترکیبی تشخیص خرابی که توسط Zhang و Ma توسعه یافته است، با ادغام اطلاعات مودهای ارتعاشی و تغییرات میرایی، امکان شناسایی دقیق‌تر خرابی‌ها را فراهم می‌کند [1].

همچنین امروزه با قدرتمند شدن فناوری‌های مربوط به هوش مصنوعی و سنسورها، پیشرفت قابل توجهی در روش‌های پایش سلامت سازه ایجاد شده است. ضریب اطمینان بالا، حساسیت زیاد نسبت به تغییرات، کم کردن زمان تشخیص آسیب و کاهش هزینه‌های تعمیر و بازسازی تنها چند نمونه از مزایای استفاده از حسگر در حوزه پایش سازه‌های عمرانی است. در سیستم پایش ارزیابی رفتار پاسخ‌های سازه در لحظه، به ویژه بعد از تحریک‌های بحرانی مطرح است و به همین منظور برای پایش مستمر رسانه‌ها، استفاده از سنسورها و حسگرها ضروری است.

در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای پیرامون بحث پایش سلامت سازه‌ها انجام شده است. بسیاری از روش‌های پایش سلامت بر اساس تغییر در فرکانس‌های تشدید [2-4] و اشکال مودی [5 و 6] و کرنش مودال [7 و 8] هستند.

در روند تشخیص آسیب استفاده از انحنای اشکال مودی نتایج قابل اطمینان‌تری در برابر کاهش سختی ناشی از آسیب می‌دهد. در روش‌های نوین تشخیص آسیب، استفاده از انحنای اشکال مودی همراه با تبدیل موجک پیوسته به عنوان یک ابزار مؤثر معرفی شده است [9]. در گروهی از روش‌های پایش سلامت سازه از محاسبات ماتریسی برای انجام این فرآیند استفاده می‌شود [10]. در این روش‌ها نتایج حاصل از مدل‌ها با فرآیند بروزرسانی ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی اصلاح می‌شوند. استفاده از شبکه‌های هوش مصنوعی امکان در نظر گرفتن حالت‌های مختلف آسیب را به منظور اندازه‌گیری کرنش اعضا فراهم کرده است.

هادادارا و همکاران [11] روشی نوین مبتنی بر شبکه عصبی را برای شناسایی آسیب در سازه‌ها پیشنهاد کردند. آن‌ها به کمک داده‌های مودال اندازه‌گیری شده و با گسترش مدل‌های عددی در شبکه عصبی موفق به شناسایی سیستم تحت ارتعاشات محیطی شدند.

با توجه به اینکه بخش قابل توجهی از کشور ما در طیف نقاط زلزله خیز قرار دارد، روش‌هایی قابلیت اطمینان بیشتری دارند که در زمان واقعی وضعیت سازه را مشخص سازند، چرا که آسیب‌های

ω_p بیانگر فرکانس زاویه‌ای بیشینه طیف می‌باشد که موقعیت آن را روی محور افقی نمایش می‌دهد و با رابطه $\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$ به دست می‌آید. T_p ، دوره تناوب بیشینه طیف موج است. با توجه به مطالعات صورت گرفته در حوزه آب‌های خلیج فارس و داده‌های آماری موجود و به کمک روابط تخمینی، می‌توان دوره تناوب بیشینه را به کمک ارتفاع موج عمده از معادله ۳، تخمین زد.

$$T_p = a \times H_s^b \quad (3)$$

در مورد منطقه خلیج فارس، مقدار پیشنهادی $2/94$ برای a و $0/5$ برای b مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای پیدا کردن پارامترهای مجهول دیگر در طیف جانسواپ از روابط از معادله ۴ استفاده می‌شود. در این رابطه λ شدت نمونه و A و B پارامترهای توزیع گامبل می‌باشند که با توجه به اطلاعات ثبت شده در خلیج فارس به ترتیب مقادیر $1/04$ ، $0/71$ و $2/52$ برای آن‌ها پیشنهاد شده است:

$$\gamma = \exp \left(\frac{5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}}{\frac{T_p}{\sqrt{H_s}}} \right) \quad (4)$$

for $3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 5$

$$A_\gamma = 1 - 0.287 \ln(\gamma)$$

$$H_{S-n} = A \left\{ -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{\lambda n} \right) \right] \right\} + B$$

با توجه به اینکه امواج، دارای ماهیتی نامنظم و تصادفی می‌باشند، منطقی است که برای تولید موج، تنها روی مشخصات فرکانسی سیگنال نامنظم با استفاده از آنالیز سری فوریه، تمرکز شود. برای تولید رکورد مصنوعی سه ساعته با استفاده از طیف منطقه مورد نظر، می‌توان از معادلات ۵ استفاده نمود:

$$S_\eta(\omega_n) d\omega = \frac{1}{2} \eta_{a_n}^2 \quad (5)$$

$$\eta_{a_i} = \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega}$$

$$\eta = \sum_{i=1}^N \eta_{a_i} \cos(\omega_i t - \phi) \text{ that } N = \frac{\omega_f - \omega_0}{\Delta\omega}$$

که در آن N تعداد تقسیم بندی‌های صورت گرفته روی بازه فرکانسی و ω_0 و ω_f مقادیر ابتدایی و انتهایی بازه فرکانسی می‌باشد. همچنین Φ متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت و مقادیر بین صفر و 2π می‌باشد.

موضعی ناشی از زلزله در المان‌های مختلف سکوها پایه ثابت شابلونی می‌تواند منجر به خرابی‌های کلی در سازه شود [12]. حائری و همکاران [13] در پژوهشی گسترده، ضمن ارائه روش‌هایی برای پایش سلامت سکوها دریایی، سازه سکوی دریایی پایه ثابت SPD2 را نیز مورد ارزیابی و پایش قرار دادند. توسعه روابط به کار رفته برای مسائل معکوس ارتعاشی در مطالعات حائری، بدون در نظر گرفتن میرایی در حل معادلات مربوط به این الگوریتم بود. در این مطالعه با لحاظ کردن محاسبات میرایی رایی در انواع مدل‌های مرجع مرتبط با سکوی پایه ثابت به منظور تشخیص ترازهای آسیب دیده سکو، سعی شده است که تاثیر میرایی در سختی ترازها بعد از اعمال آسیب در مدل‌های نرم‌افزاری شناسایی شود.

۲- مواد و روش

ابتدا تئوری مورد استفاده امواج در حوزه خلیج فارس برای بارگذاری‌های دینامیکی روی سکوی مورد مطالعه با استفاده از طیف Jonswap (Hasselmann و همکاران ۱۹۷۳) ارائه می‌شود. این طیف از پروژه‌های تحقیقاتی امواج دریای شمال که توسط آزمایشگاه‌های چهار کشور انجام شده، به دست آمده است. اندازه‌گیری موج و باد، با مدت تداوم کافی و وزش باد، برای تهیه مدل طیفی در آب عمیق و شرایط حدی طول بادگیر، انجام شده است. طیف حاصل به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود:

(۱)

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \times H_s^2 \times \omega_p^4 \times \omega^{-5} \times \exp \left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right)$$

مدل طیف موج جانسواپ برای مناطق محدود به ساحل که امواج آن‌ها توسط باد تولید می‌شوند، توصیه شده است. بنابراین با توجه به موقعیت جغرافیایی آب‌های خلیج فارس و محدود بودن آن به سواحل اطراف، می‌توان از طیف موج جانسواپ برای تولید امواج استفاده نمود. در رابطه طیف جانسواپ، H_s ارتفاع موج عمده می‌باشد که طبق تعریف برابر با میانگین ارتفاع‌های یک سوم مرتفع‌ترین امواج در بازه زمانی مشخص می‌باشد. پارامتر عرض طیف که با σ نشان داده شده است با توجه به موقعیت فرکانس نسبت به فرکانس پیک از معادله ۲ مشخص می‌شود:

$$\begin{cases} \sigma = 0.07 & \text{for } \omega \leq \omega_p \\ \sigma = 0.09 & \text{for } \omega > \omega_p \end{cases} \quad (2)$$

ماتریسی مرتبه دوم به شکل معادله (۶) تعریف می‌شود:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{Q(T)\} \quad (6)$$

که در آن $[M]$ ماتریس جرم، $[K]$ ماتریس سختی، $[C]$ ماتریس میرایی^۴، $\{U(t)\}$ بردار جابه‌جایی، $\{\dot{U}(t)\}$ بردار سرعت و $\{\ddot{U}(t)\}$ بردار شتاب می‌باشد. همچنین $\{Q(t)\}$ بردار تابع نیرو است.

در صورتی که رفتار سیستم مورد نظر خطی باشد آنگاه خاصیت تعامد مودهای ارتعاشی نسبت به ماتریس‌های جرم و سختی برقرار است. مدل میرایی رایی (میرایی تناسبی) این خاصیت را در ماتریس میرایی نیز برقرار می‌کند. رایی در مطالعات خود نشان داد که اگر ماتریس میرایی $[C]$ با ماتریس جرم و سختی دارای تناسب باشد می‌توان معادله (۷) را نوشت:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (7)$$

در رابطه (۷)، α و β ضرایب ثابت جرم و سختی هستند و دارای بعد sec^{-1} و sec هستند که با توجه به فرکانس‌های طبیعی مربوط به دو مود (ω_i) و (ω_j) و نسبت میرایی^۵ محاسبه خواهد شد. به دلیل تعامد مودها رابطه ماتریس رایی را می‌توان به صورت معادله (۸) بازنویسی کرد:

$$\{\phi_n\}^T [C] \{\phi_n\} = \alpha \{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\} + \beta \{\phi_n\}^T [K] \{\phi_n\} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\} = M_j \\ \{\phi_n\}^T [K] \{\phi_n\} = K_j \\ \{\phi_n\}^T [C] \{\phi_n\} = C_j \end{cases} \quad (9)$$

در الگوریتم ارتعاش معکوس حالات مختلف بسط داده شده برای توسعه روند حل ماتریس‌ها معرفی می‌شود:

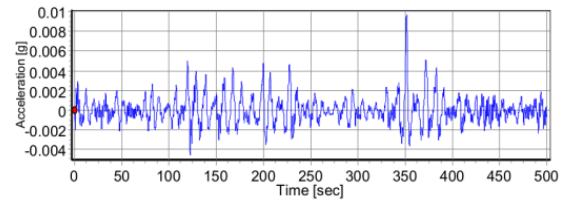
$$[K]\{\phi_i\} + \bar{\lambda}_i [C]\{\phi_i\} = -\bar{\lambda}_i^2 [M]\{\phi_i\} \quad (10)$$

$i=1, 2, \dots, N$

در رابطه (۱۰) درجات آزادی سیستم دینامیکی با N مشخص می‌شود. همچنین $\bar{\lambda}_i$ با مربع i امین فرکانس طبیعی سیستم ارتعاشی $\omega_i()$ قابل محاسبه می‌باشد و برابر i امین مقدار ویژه سیستم است.

بردار $\{\phi\}_i$ ، بیانگر i امین شکل مودی است که با ماتریس جرم خاصیت تعامد دارد و نرمال می‌باشد.

به منظور حل مسائل مقدار ویژه با حضور میرایی، در مرحله اول معادله درجه دو به یک معادله خطی به کمک تغییر متغیرها تبدیل می‌شود (معادلات ۱۱).



شکل ۱. طیف موج خلیج فارس با دوره بازگشت ۱۰۰ سال

$$(T_p = 7.10 \text{ و } H_s = 5.83)$$

Fig. 1. The wave spectrum of the Persian Gulf with a 100-year return period ($H_s = 5.83$ & $T_p = 7.10$)

در مرحله بعد، نقشه‌های مهندسی مربوط به مدل‌سازی سکوی SPD2 در نرم‌افزار SAP2000 و روابط اصلی الگوریتم ارتعاش معکوس برای تشخیص خرابی و شناسایی سیستم سکو بعد از آسیب‌های اعمالی بررسی می‌شوند.

فولادی که در مدل‌سازی این سکو استفاده شده از نوع ST52 و مدول الاستیسیته آن $2E+06$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه پلان سکو از شش پایه اصلی تشکیل شده، جرم کلی سازه در هر تراز به طور مساوی به گره پایه‌ها در پلان تراز اختصاص داده شده است.

تحلیل دینامیکی صورت گرفته در این مرحله، با استفاده از امواج شبیه‌سازی شده بر اساس طیف با دوره بازگشت ۱۰۰ سال، منطبق با شرایط محلی انجام شده است. دلیل انتخاب این دوره بازگشت، تحریک حداکثری سکو برای فهم تعداد مودهایی است که در تاریخچه زمانی خروجی ظاهر می‌شود. فولاد بکار رفته در اعضای سکو دارای مدول الاستیسیته 200 Gpa و نسبت پواسون 0.3 و چگالی جرمی 7850 kg/m^3 است.

در مرحله بعدی به کمک مدل‌سازی نرم‌افزاری و با استفاده از طیف موج نامنظم خلیج فارس، تحلیل دینامیکی روی سکوی SPD2 انجام یافت. هدف از انجام این تحلیل دستیابی به اطلاعات ورودی به منظور توسعه روش‌های ماتریسی ارتعاش معکوس می‌باشد. این مدل در نرم‌افزار^۱ Opensees-py با میرایی رایی ۵٪ آنالیز شد.

۳- روابط الگوریتم ارتعاش معکوس^۲ برای شناسایی سیستم

سیستم دینامیکی چند درجه آزادی میرا^۳ به وسیله معادله

¹ Open System for Earthquake Engineering Simulation-python

² Inverse vibration technique

³ Damped Multiple Degree of Freedom system

⁴ Damping Matrice

$$[\bar{K}] = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, [\bar{M}] = \begin{bmatrix} -C & -M \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

سپس به منظور تشکیل مسأله برای حالت نامتقارن، معادله (12) نوشته می شود:

$$[\bar{K}]\{\bar{\phi}_i\} = \lambda_i[\bar{M}]\{\bar{\phi}_i\} \quad (12)$$

λ_i بردار مختصات مودال

$$(13)$$

$$\begin{cases} [M]_{N \times N} = \begin{bmatrix} m_1 & & & 0 \\ & m_2 & & \\ & & m_3 & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & m_{N-1} \\ & & & & & m_n \end{bmatrix} \\ [K]_{N \times N} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & \\ & -k_3 & k_3 + k_4 & & \\ & & & \ddots & \vdots \\ 0 & & & & k_{N-1} + k_N & -k_{N-1} \\ & & & & -k_{N-1} & k_{N-1} \end{bmatrix} \end{cases}$$

$$\begin{cases} ([B] - \lambda_i[I])\{u\}_i = 0 & i = 1, 2, \dots, N \\ [B] = [L]^{-1}[K][L]^{-1} = [M]^{-1/2}[K][M]^{-1/2} \\ [K] = [L][B][L] = [M]^{1/2}[B][M]^{1/2} \end{cases} \quad (18)$$

در مدل چند درجه آزادی، m_j جرم متمرکز هر تراز، u_j درجه آزادی انتقالی و θ_j درجه آزادی دورانی مربوط به هر کدام از ترازهای سیستم دینامیکی می باشند.

با در نظرگیری میرایی برای سیستم دینامیکی چند درجه آزادی با جرم متمرکز، شکل ماتریسی معادله دیفرانسیل حرکت به صورت رابطه (19) ارائه می شود:

$$[M]\ddot{Y} + [C]\dot{Y} + [K]Y = -[M][A][\ddot{y}_g] \quad (19)$$

$$Y = [y_1 \quad \theta_1 \quad \theta_2 \quad y_2 \quad \dots \quad y_n \quad \theta_n]^T$$

بردار تاثیر تحریکات با Λ قابل نمایش می باشد. برای محاسبه ماتریس حالت به شکل معادله (20) عمل می شود:

$$\dot{Y} = -[M]^{-1}[C]\dot{Y} - [M]^{-1}[K]Y + [A][\ddot{y}_g] \quad (20)$$

با استفاده از تغییر متغیر در رابطه (20) فرم ماتریسی معادله به صورت معادله (21) بدست می آید:

$$Z_1 = Y \rightarrow \dot{Z}_1 = \dot{Y} \quad (21)$$

$$\dot{Z}_2 = -[M]^{-1}[C]Z_2 - [M]^{-1}[K]Z_1 - [A][\ddot{y}_g]$$

$$Z_2 = \dot{Y} \rightarrow \dot{Z}_2 = \dot{Y} \quad (22)$$

$$\dot{Z} = AZ + BU \quad (23)$$

$$\begin{cases} \{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_i = 1 \\ \{\phi\}_i^T [K] \{\phi\}_i = 1 \end{cases} \quad (14)$$

به دلیل اینکه ماتریس جرم قطری است، می توان آنرا به شکل ضرب یک ماتریس قطری در ترانهاده آن مطابق رابطه (15) تجزیه کرد:

$$[M] = [L][L]^T \quad (15)$$

در معادله (15) به علت قطری بودن ماتریس جرم در معادلات، درایه های ماتریس $[L]$ با جذر درایه های متناظر آن در ماتریس جرم، برابر خواهد بود. به عبارت دیگر ماتریس $[L]$ با ترانهاده خود معادل است:

$$[L]_{N \times N} = [L]_{N \times N}^T = [M]^{1/2} = \text{diag}[m_1^{1/2}, m_2^{1/2}, m_3^{1/2}, \dots, m_{N-1}^{1/2}, m_N^{1/2}]_{N \times N} \quad (16)$$

در رابطه (17) با ضرب ماتریس $[L]$ در بردار اشکال مودی، برداری به نام $\{u\}$ به دست می آید:

$$\{u\} = [L]\{\phi\} \Rightarrow \{\phi\} = [L]^{-1}\{u\} \quad (17)$$

در معادلات (18) الگوریتم ارتعاشی معکوس، ماتریس $[B]$ ، ماتریسی از نوع ژاکوبی می باشد و به ماتریس سختی نرمال شده شناخته می شود. λ_i و $\{u\}_i$ به ترتیب مقادیر ویژه و بردارهای نرمال ویژه در این روابط هستند.

$$\xrightarrow{\{z_N\}^T \times} a_N = \{z_N\}^T [A] \{z_N\} \quad (33)$$

و رابطه (۳۲) به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$b_{N-1}\{z_{N-1}\} = a_N\{z_N\} - [A]\{z_N\} = \{r_N\} \quad (34)$$

در رابطه (۳۴) طرف دوم معادله قابل محاسبه است. با معلوم شدن درایه های بردار $\{r_N\}$ ، رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$b_{N-1}\|z_{N-1}\| = \|r_N\| \quad (35)$$

با تقسیم درایه های بردار $\{r_N\}$ بر b_{N-1} رابطه (۳۶) حاصل می شود:

$$-b_{N-2}\{z_{N-2}\} + a_N\{z_{N-1}\} - b_{N-1}\{z_N\} = [A]\{z_{N-1}\} \quad (36)$$

حال باید بردار $\{z_{N-1}\}^T$ را در طرفین معادله (۳۶) با توجه به اصل تعامد ضرب کرد:

$$\xrightarrow{\{z_{N-1}\}^T \times} a_{N-1} = \{z_{N-1}\}^T [A] \{z_{N-1}\} \quad (37)$$

با بازنویسی رابطه (۳۶) فرم معادله (۳۸) حاصل می شود:

$$b_{N-2}\{z_{N-2}\} = a_{N-1}\{z_{N-1}\} - b_{N-1}\{z_N\} - [A]\{z_{N-1}\} = \{r_{N-1}\} \quad (38)$$

با ادامه دادن این الگوریتم، علاوه بر یافتن بردارهای $\{z\}$ ، هم درایه های مربوط به ماتریس ژاکوبی $[B]$ که حاوی مشخصات مربوط به سختی و جرم سکو می باشد، بدست می آید و هم ماتریس شکل های مودی سازه، حاصل خواهد شد. در مرحله بعد برای بدست آوردن ماتریس های جرم و سختی از طریق ایجاد ماتریس ژاکوبی به صورت روابط (۳۹ و ۴۰) عمل می شود. تعریف بردار $\{p\}$:

$$\{p\} = \{1, 1, \dots, 1\}^T \quad (39)$$

با ضرب ماتریس سختی در این بردار می توان نوشت:

$$[K]\{p\} = \{k_1, 0, 0, \dots, 0\}^T \quad (40)$$

$$[L][B][L]\{p\} = \{k_1, 0, 0, \dots, 0\}^T \quad (41)$$

بردار $\{l\}$ که از ریشه دوم درایه های متناظر قطری از ماتریس جرم به دست می آید به صورت رابطه (۴۲) تشکیل می شود:

$$\{p\} = \{l_1, l_2, \dots, l_N\}^T \quad (42)$$

همچنین ماتریس ژاکوبی در این بردار ضرب شده و رابطه ای به فرم معادله (۴۳) حاصل می شود:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix}, \dot{Z} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_1 \\ \dot{Z}_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$Y = CZ + DU \quad (25)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_{2n \times 2n} & I_{2n \times 2n} \\ [M]^{-1}[K] & [M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} A = \begin{bmatrix} 0 \\ -[A] \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix} \\ D = 0 \\ U = [\ddot{y}_g] \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} Z = \{Y\} \\ \dot{Y} = \{y_1 \quad \theta_1 \quad y_2 \quad \theta_2 \quad \dots \quad y_n \quad \theta_n \quad x_d\}^T \end{cases} \quad (27)$$

$$\dot{Y} = \{\dot{y}_1 \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{y}_2 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dots \quad \dot{y}_n \quad \dot{\theta}_n \quad \dot{x}_d\}^T \quad (28)$$

در روابط (۲۳ تا ۲۸)، A ماتریس حالت، B ورودی، C خروجی و D بازخورد سیستم می باشد. $I_{2 \times 2}$ و $0_{2 \times 2}$ به ترتیب بیانگر ماتریس های همانی و صفر هستند. برای سهولت تحلیل در تحلیل خطی سیستم های دینامیکی، ماتریس میرایی به دو صورت رایلی و میرایی مودال در معادلات اعمال می شود که در این پژوهش از میرایی رایلی استفاده شده است.

۴- شناسایی ماتریس ژاکوبی با روش Block Lanczos

در رابطه $[B][U] = [U][A]$ ، ماتریسی جدید تحت عنوان $[Z]$ تعریف می شود که با ترانهاد ماتریس $[U]$ برابر است. مطابق روابط (۲۹ و ۳۰) می توان نوشت:

$$[U]^T[Z] \rightarrow [Z][Z]^T = [Z]^T[Z] = [I] \quad (29)$$

$$[U]^T \times [U]^T \{[B][U]\}[U]^T = [U]^T \{[U][A]\}[U]^T \quad (30)$$

$$\rightarrow [Z][B] = [A][Z]$$

معادله (۳۰) را می توان به فرم رابطه (۳۱) بازنویسی نمود:

$$\begin{bmatrix} \{z_1\} \\ \{z_2\} \\ \dots \\ \{z_N\} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} a_1 & -b_1 & & & \\ -b_1 & a_2 & -b_2 & & \\ & -b_2 & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & -b_{N-1} \\ & & & -b_{N-1} & a_N \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \{z_1\} \\ \{z_2\} \\ \dots \\ \{z_N\} \end{bmatrix}$$

در ادامه روند شناسایی می توان نوشت:

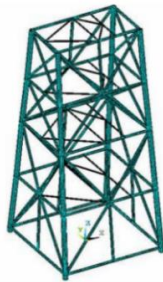
$$a_N\{z_N\} - b_{N-1}\{z_{N-1}\} = [A]\{z_N\} \quad (32)$$

با پیش ضرب بردار Z_N در دو سمت معادله (۳۲) و با توجه به خاصیت تعامد می توان نوشت:

میرایی بر روی نتایج تشخیص خرابی در ترازهای مختلف سکو، از سه درصد متفاوت برای میرایی رایلی استفاده شده است.

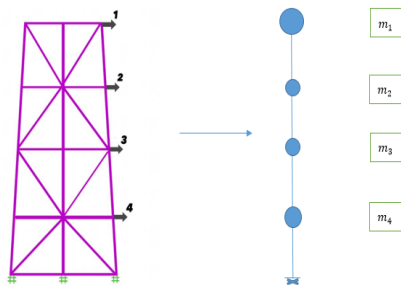
- حالت اول: میرایی رایلی ۳٪ در فرکانس مود اول و سوم
($\omega_j = \omega_3$ و $\omega_i = \omega_1$)
- حالت دوم: میرایی رایلی ۵٪ در فرکانس مود اول و سوم
($\omega_j = \omega_3$ و $\omega_i = \omega_1$)
- حالت سوم: میرایی رایلی ۷٪ در فرکانس مود اول و سوم
($\omega_j = \omega_3$ و $\omega_i = \omega_1$)

در شکل (۲) مدل سه بعدی و در شکل (۳) مدل دو بعدی نرم افزاری و مدل مرجع پیشنهادی برای توسعه روابط معکوس ارتعاشی نشان داده شده است. مقادیر سختی و جرم هر تراز در مدل دو بعدی سکوی SPD2 به شرح جدول (۱) می باشد.



شکل ۲. مدل المان محدود سه بعدی سکوی SPD2

Fig. 2. 3D Finite Element Model (FEM) of SPD2 Platform



شکل ۳. (سمت راست) مدل مرجع [13] و قاب دو بعدی (سمت چپ)

Fig. 3. (Right side) Reference Model and 2D Frame (Left side)

جدول ۱. جرم و سختی ترازها در سکو

Table 1. Mass and stiffness of the levels on the platform

Stiffness ($1000 \frac{KN}{M}$)	Mass (Ton)	Level
153.6	1156.9	1
147.8	88.7	2
146.1	81.3	3
913.8	90.2	4

$$[B]\{l\} = [B]\{l_1, l_2, \dots, l_N\}^T = \left\{ \frac{k_1}{l_1}, 0, 0, \dots, 0 \right\}^T \quad (43)$$

بردار مجهول $\{w\}$ در معادله (۴۴) صدق می کند:

$$[B]\{w\} = [B]\{w_1, w_2, \dots, w_N\}^T = \{1, 0, 0, \dots, 0\}^T = \{e_1\} \quad (44)$$

حال با انجام محاسبات ساده ماتریسی، $\{w\}$ به صورت رابطه (۴۵) بدست می آید:

$$\{w\} = [B]^{-1}\{e_1\} \quad (45)$$

با توجه به روابط (۴۳) و (۴۴) می توان رابطه (۴۶) را تشکیل داد:

$$\{l\} = c\{w\} \quad (46)$$

در این رابطه جرم کل سیستم سکو به صورت مجموع جرم ها در نظر گرفته می شود و ضریب c مقدار مثبت دارد.

همچنین با استفاده از رابطه (۴۲) معادله (۴۷) حاصل می شود:

$$M_T = \sum_{i=1}^n m_i = \sum_{i=1}^n l_i^2 = \|l\|^2 = c^2 \|w\|^2 \quad (47)$$

یکی از فرضیات مهم این پژوهش، معلوم و ثابت بودن جرم کل سیستم سکو می باشد. با علم بر این فرض و با استفاده از رابطه (۴۷) ابتدا ضریب ثابت c تعیین می شود. در مرحله بعد با استفاده از رابطه (۴۶) اطلاعات جرم تمامی درجات آزادی بدست می آید. با محاسبه این بردار، ماتریس $[L]$ و در نتیجه ماتریس $[M]$ محاسبه شده و در گام بعدی با استفاده از رابطه $[K] = [L][B][L] = [M]^{1/2}[B][M]^{1/2}$ ماتریس سختی نیز در هر لحظه از مرحله پایش بدست می آید. تمامی محاسبات مربوط به روند حل الگوریتم برای یافتن آسیب و تشخیص میزان تفاوت در ماتریس های سختی بعد از وقوع خرابی در نرم افزار متلب انجام شده است.

۵- بحث و بررسی نتایج

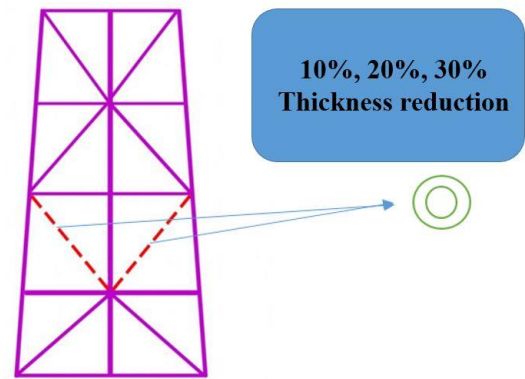
۵-۱- تعیین ضرایب میرایی رایلی

برای اینکه بتوان آثار مدل های میرایی رایلی روی پارامترهای مورد نیاز در سازه را با فرکانس های مودی کاملاً مجزا بررسی کرد، مدل های دو بعدی و سه بعدی سازه سکو در محیط محاسباتی Opensensepy ایجاد شده است.

اثر P-delta در همه ی تحلیل ها در نظر گرفته شده است و خواص دینامیکی خطی سازه از طریق تحلیل مقادیر ویژه خطی تعیین شده است. در این پژوهش برای نشان دادن آثار مدل های

خرابی‌ها به صورت مصنوعی در مدل‌های نرم‌افزاری اعمال می‌شود. همچنین اطلاعات مربوط به مودها و فرکانس‌هایی که برای محاسبات الگوریتم ارتعاش معکوس لازم است از مدل نرم‌افزاری استخراج می‌شود.

در این مرحله به سازه‌ای که به صورت دو بعدی برشی در نرم‌افزار المان محدود مدل شده است، آسیب تعمدی اعمال می‌شود. با توجه به اینکه سازه‌های دریایی همواره در معرض امواج و مواد خورنده قرار دارند، مطابق شکل (۴) این آسیب در ضخامت عضوهای تراز سوم سکو ایجاد شده است به گونه‌ای که سختی تراز مربوطه در سه حالت به میزان ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ کاهش داشته باشد.



شکل ۴. اعمال خرابی در مدل نرم‌افزاری با سه درصد مختلف در تراز سوم سکو

Fig. 4. Applying damage in the software model at three different percentages at the third level of the platform.

۳-۵- نتایج تشخیص خرابی در مدل دو بعدی برشی سکوی دریایی

مقادیر فرکانس برای حالت اول با آسیب به میزان ۱۰٪ به شرح جدول (۲) است.

۲-۵- چگونگی اعمال خرابی به سکوی پایه ثابت در مدل نرم‌افزاری

به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات دقیق و واقعی از محل سکو،

جدول ۲. مقادیر فرکانس مدل دوبعدی قبل و بعد از اعمال آسیب ۱۰٪

Table 2. Frequency values of the 2D model before and after applying 10% damage

The natural frequency of the model before damage. rad/sec	The natural frequency of the model after damage. rad/sec
5.83	5.69

جدول ۳. سختی ترازها در مدل مرجع دو بعدی برشی با اعمال میرایی رایلی و آسیب ۱۰٪

Table 3. Stiffness of the decks in the 2D shear reference model with the application of Rayleigh damping and 10% damage

Stiffness parameters of the levels($10^6\text{ }N/m$)			Values of the eigenvectors [B]		Level
Percentage of change	After Damage	Before Damage	After Damage	Before Damage	
Rayleigh damping %3					
-1.62	151.6	153.6	0.9334	0.9763	1
1.08	149.4	147.8	0.1901	0.1912	2
-5.61	137.9	146.1	0.1067	0.1000	3
-0.02	911.1	913.8	0.0126	0.0146	4
Rayleigh damping %5					
-0.09	152.1	153.6	0.9078	0.9763	1
1.01	149.3	147.8	0.1891	0.1912	2
-4.99	138.8	146.1	0.1062	0.1000	3
-0.03	910.6	913.8	0.0119	0.0146	4
Rayleigh damping %7					
-1.6	151.1	153.6	0.9098	0.9763	1
-2.4	144.2	147.8	0.1865	0.1912	2
-4.58	139.4	146.1	0.1022	0.1000	3
-0.05	909.2	913.8	0.0140	0.0146	4

جدول ۴. مقادیر فرکانس مدل دوبعدی قبل و بعد از اعمال آسیب ۲۰٪

Table 4. Frequency values of the 2D model before and after applying 20% damage

The natural frequency of the model before damage. rad/sec	The natural frequency of the model after damage. rad/sec
5.83	5.56

جدول ۵. سختی ترازها در مدل مرجع دو بعدی برشی با اعمال میرایی رایلی و آسیب ۲۰٪

Table 5. Stiffness of the decks in the 2D shear reference model with the application of Rayleigh damping and 20% damage

Stiffness parameters of the levels($10^6\ N/m$)			Values of the eigenvectors [B]		Level
Percentage of change	After Damage	Before Damage	After Damage	Before Damage	
Rayleigh damping %3					
0.07	154.8	153.6	0.9229	0.9763	1
-0.06	147.7	147.8	0.1886	0.1912	2
-15.2	123.8	146.1	0.1082	0.1000	3
-0.09	912.9	913.8	0.0131	0.0146	4
Rayleigh damping %5					
1.1	155.3	153.6	0.9183	0.9763	1
-0.02	147.4	147.8	0.1872	0.1912	2
-14	125.5	146.1	0.1086	0.1000	3
-0.13	912.6	913.8	0.0129	0.0146	4
Rayleigh damping %7					
1.3	155.7	153.6	0.9171	0.9763	1
-0.03	147.3	147.8	0.1860	0.1912	2
-12.7	127.4	146.1	0.1089	0.1000	3
-0.06	913.2	913.8	0.0136	0.0146	4

جدول ۶. مقادیر فرکانس مدل دوبعدی قبل و بعد از اعمال آسیب ۳۰٪

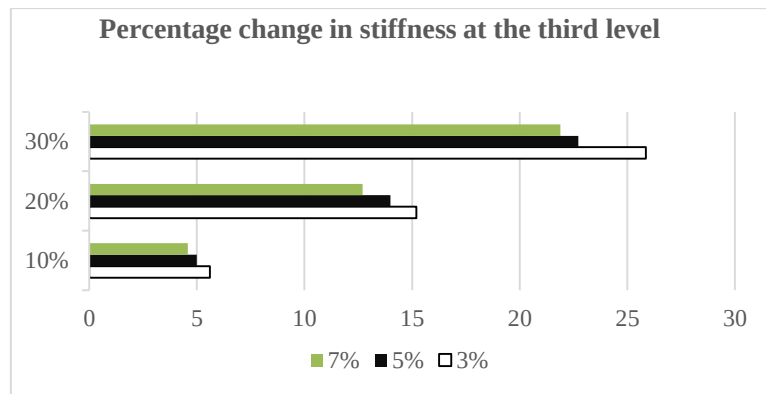
Table 6. Frequency values of the 2D model before and after applying 30% damage

The natural frequency of the model before damage. rad/sec	The natural frequency of the model after damage. rad/sec
5.83	5.31

جدول ۷. سختی ترازها در مدل مرجع دو بعدی برشی با اعمال میرایی رایلی و آسیب ۳۰٪

Table 7. Stiffness of the decks in the 2D shear reference model with the application of Rayleigh damping and 30% damage

Stiffness parameters of the levels($10^6\text{ N}/m$)			Values of the eigenvectors [B]		Level
Percentage of change	After Damage	Before Damage	After Damage	Before Damage	
Rayleigh damping %3					
-4.8	146.1	153.6	0.9801	0.9763	1
-3.5	142.6	147.8	0.1975	0.1912	2
-25.87	108.3	146.1	0.1102	0.1000	3
-0.9	905.4	913.8	0.0149	0.0146	4
Rayleigh damping %5					
-4.1	147.2	153.6	0.9804	0.9763	1
-3	143.3	147.8	0.1987	0.1912	2
-22.72	112.9	146.1	0.1093	0.1000	3
-0.84	906.1	913.8	0.0154	0.0146	4
Rayleigh damping %7					
-2.8	149.2	153.6	0.9814	0.9763	1
-2.6	143.9	147.8	0.1977	0.1912	2
-21.9	114.1	146.1	0.1091	0.1000	3
-0.6	907.5	913.8	0.0148	0.0146	4



شکل ۵. نمودار تشخیص درصد خرابی مدل دوبعدی در ۳ حالت میرایی

Fig. 5. Diagram of damage percentage detection in 2D model under three damping conditions

سکوهای فراساحلی میرا، به منظور تشخیص خرابی ایجاد شده در سازه بررسی شد. الگوریتم ارائه شده در حوزه فرکانس و با استفاده از مودهای نرمال شده توسعه داده شده است. با توجه به اهمیت تعامد مودهای ارتعاشی در این روش نسبت به ماتریس های سختی و جرم، سیستم مورد نظر به صورت خطی و میرایی آن نیز به صورت کلاسیک در نظر گرفته شده است. با این حال با انتخاب مدل میرایی از نوع میرایی رایلی، این خاصیت در ماتریس میرایی نیز برقرار خواهد بود. در ادامه روند پژوهش برای مشخص نمودن اطلاعات مودی مورد نیاز این الگوریتم مانند شکل های مودی، بردارهای مقادیر ویژه و دیگر ماتریس های اصلی سیستم به انجام یک تحلیل دینامیکی روی مدل دوبعدی سکوی SPD2 و تحت بار امواج حوزه خلیج فارس پرداخته شد. نتایج حاکی از آن بود که تنها مودهای اول و اصلی سکوی مورد مطالعه، قابل اندازه گیری می باشد. میرایی رایلی در سه حالت مختلف (۳، ۵ و ۷ درصد) برای تشخیص آسیب مورد بررسی قرار گرفت. مزیت استفاده از این مدل میرایی در توسعه روش های مودال این بود که اشکال مودی مورد استفاده در محاسبات دستخوش تغییری نسبت به سکوی نامیرا نمی شود. پس می توان فقط با انجام عملیات ریاضی بیشتر برای محاسبه ماتریس سختی در معادلات ارتعاشی اقدام نمود. محاسبات الگوریتم ابتدا در مدلی از نوع برشی ساده انجام شد. محاسبه سختی ترازها با اعمال این روش بعد از آسیب تعمدی ایجاد شده در یکی از ترازهای سکو بیانگر آن بود که الگوریتم مورد نظر در سطح شناسایی خرابی و تشخیص موقعیت آسیب، عملکرد قابل قبولی دارد. همچنین با افزایش درصد میرایی، دقت محاسبه میزان آسیب کاهش می یابد. با مقایسه نمودارهای تشخیص آسیب مربوط به تراز سوم سکوی دریایی مورد مطالعه، مناسب ترین حالت های تشخیص آسیب مربوط به

مرحله بعد بدست آوردن پارامترهای سختی ترازها و مقادیر بردارهای نرمال ویژه مربوط به مدل مرجع پیشنهادی، مطابق اطلاعات مودی و فرکانسی بدست آمده از مدل نرم افزاری، قبل و بعد از اعمال خرابی می باشد.

در این مرحله از سه مدل میرایی رایلی معرفی شده به منظور توسعه روابط الگوریتم استفاده شده است و نتایج هر یک از مدل ها در جدول (۳) ارائه شد. مقادیر فرکانس برای حالت اول با آسیب به میزان ۲۰٪ به شرح جدول (۴) است. بطور مشابه سختی ترازها در مدل مرجع دو بعدی برشی با اعمال میرایی رایلی و آسیب ۲۰٪ در جدول (۵) ارائه شده است.

مقادیر فرکانس برای حالت اول با آسیب به میزان ۳۰٪ به شرح جدول (۶) و سختی ترازها در مدل مرجع دو بعدی برشی با اعمال میرایی رایلی و آسیب ۳۰٪ در جدول (۷) ارائه شده است. ضمناً نمودار تشخیص درصد خرابی مدل دوبعدی در ۳ حالت میرایی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در شکل (۵) ارائه شده است.

همان گونه که در جداول (۲ تا ۷) مشاهده می شود، الگوریتم ارتعاش معکوس به خوبی تراز آسیب دیده در سکو را (تراز سوم) مشخص کرده است اما به دلیل اختلاف ماهیتی مدل سازی مرجع و مدل نرم افزاری در تشخیص دقت میزان خرابی در تراز عملکرد خوبی نشان نمی دهد. فرکانس های طبیعی مدل نیز در اثر اعمال خرابی مطابق انتظار کاهش داشته اند. در بین مدل های میرایی رایلی وارد شده در روند حل محاسبات نیز در خرابی های مختلف، حالت اول (میرایی رایلی ۳٪)، عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش روش کلی مبتنی بر الگوریتم ارتعاش معکوس در

محاسبات با میرایی رایلی ۳٪ می باشد.

به منظور بررسی های بیشتر به پژوهشگران آتی پیشنهاد می شود که روند حل معادلات در قاب های سه بعدی میرا شده توسعه دهند.

قدردانی نویسندگان

از حمایت های دانشکده عمران دانشگاه تبریز جهت فراهم کردن شرایط مناسب تحقیق و پژوهش قدردانی می گردد.

تعارض منافع

در این پژوهش، هیچ تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

روح الله نجفی ۳۵٪، محمدعلی لطف الهی یقین ۳۵٪ و علیرضا مجتهدی ۳۰٪ در فرآیند انجام این پژوهش نقش داشته اند.

منابع مالی

این تحقیق بدون پشتیبانی منابع مالی و در قالب پژوهش دانشگاهی انجام شده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در انجام این تحقیق، نوشتن متن آن و ویرایش ها از هیچ ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

References

- [1] Zhang, W. and Ma, H., 2020. A hybrid damage detection method based on vibration modes and damping variation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 143, p.106822.
- [2] Khosravan, A., Asgarian, B. and Shokrgozar, H.R., 2021. Improved modal strain energy decomposition method for damage detection of offshore platforms using data of sensors above the water level. *Ocean Engineering*, 219, p.108337. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108337.
- [3] Khan, M.W., Akmal Din, N. and Ul Haq, R., 2020. Damage detection in a fixed-fixed beam using natural frequency changes. *Vibroengineering Procedia*, 30, pp.38-43. doi: 10.21595/vp.2019.21081.
- [4] Liu, G., Chen, G., Jiao, J. and Jiang, R., 2015. Dynamics modeling and control simulation of an autonomous underwater vehicle. *Journal of Coastal Research*, 73(SI), pp.741-746..
- [5] Alavinezhad, M., Hassanabad, M.G., Ketabdari, M.J. and Nekooei, M., 2022. Numerical and experimental structural damage detection in an offshore flare bridge using a proposed modal strain energy method. *Ocean Engineering*, 252, p.111055. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111055.
- [6] Huang, Z., Zang, C., Zhang, G. and Friswell, M.I., 2020. Mode shape transformation for model error localization with modal strain energy. *Journal of Sound and Vibration*, 473, p.115230.
- [7] Li, Y., Wang, S., Zhang, M. and Zheng, C., 2016. An improved modal strain energy method for damage detection in offshore platform structures. *Journal of Marine Science and Application*, 15(2), pp.182-192.
- [8] Kianian, M., Golafshani, A.A. and Ghodrati, E., 2013. Damage detection of offshore jacket structures using frequency domain selective measurements. *Journal of Marine Science and Application*, 12(2), pp.193-199. doi: 10.1007/s11804-013-1185-y.
- [9] Cosoli, G., Martarelli, M., Mobili, A., Tittarelli, F. and Revel, G.M., 2023. Damage identification in cement-based structures: A method based on modal curvatures and continuous wavelet transform. *Sensors*, 23(22), p.9292. doi: 10.3390/s23229292.
- [10] Dolatshahi, K.M. and Rofooei, F.R., 2014. Inverse vibration problem for un-damped 3-dimensional multi-story shear building models. *Journal of Sound and Vibration*, 333(1), pp.99-113. doi: 10.1016/j.jsv.2013.08.045.
- [11] Elshafey, A.A., Haddara, M.R. and Marzouk, H., 2008. The use of random decrement technique for health monitoring of structures. In: *5th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-V)*, Winnipeg, Manitoba, Canada, 22-24 September.
- [12] Gilbert, S. and Ayyub, B.M., 2016. Models for the economics of resilience. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2(4). doi: 10.1061/AJRUA6.0000867.
- [13] Haeri, M.H., Lotfi, A., Dolatshahi, K.M. and Golafshani, A.A., 2017. Inverse vibration technique for structural health monitoring of offshore jacket platforms. *Applied Ocean Research*, 62, pp.181-198. doi: 10.1016/j.apor.2016.11.010.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Najafi, R., Lotfollahi Yaghin, M.A. and Mojtahedi, A., 2026. Evaluation of the Performance of the Inverse Vibration Algorithm in Damage Detection of a 2D Shear Model in a Damped Offshore Platform. *Modares Civil Engineering journal*, 26(5), pp.35-46.

