ارزیابی یک الگوریتم استخراج مشخصه جهت عیب‌یابی سازه جکتی فراساحلی با استفاده از مدل فیزیکی و بروزرسانی مدل المان محدود

فرهاد حسینلو[۱*]، علیرضا مجتهدی[۲]، محمدعلی لطف‌اللّهی یقین[۳]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشگاه تبریز؛ F.Hosseinlou@tabrizu.ac.ir
[۲] استادیار، دانشگاه تبریز؛ Mojtahedi@tabrizu.ac.ir
[۳] استاد، دانشگاه تبریز؛ Lotfollahi@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۲

کلمات کلیدی:
سکوی جکتی فراساحلی،
عیب‌یابی،
بروزرسانی مدل،
روش کاهشی گویان،
تحلیل حساسیت.

چکیده

برآورد ایمنی یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در حوزه‌ی مهندسی و طراحی سازه‌ها می‌باشد. این موضوع به دلیل عدم قطعیت موجود در تعیین بسیاری از پارامترهای حائز اهمیت در طرح نهائی، معمولاً امر پیچیده‌ای قلمداد می‌گردد. در این مقاله با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش بر روی یک مدل فیزیکی از نوع سکوی جکتی فراساحلی، روش جدیدی برای بروزرسانی ماتریس سختی سازه با قابلیت تشخیص آسیب در تک تک اعضاء و با بهره‌گیری از اطلاعات مودی اندازه‌گیری شده محدود ارائه شده است که در آن با استفاده از تحلیل حساسیت پاسخ سیستم به یک تحریک پایه و رویه انتخاب درجات آزادی غیرفعّال در مرحله کاهش مدل با یک معیار مناسب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این عملکرد منجر به همگرائی سریع‌تر آلگوریتم تکرار می‌شود. هم‌چنین در این مطالعه با استفاده از فرآیند بروزرسانی مدل المان محدود بر اساس مدل تجربی، تا حد امکان فائق آمدن بر مسئله عدم قطعیت در مدل‌سازی نیز در طول فرآیند در نظر گرفته شده است.

Evaluating A Feature Extraction Algorithm For Damage Detection of Offshore Jacket Platforms Using Physical Model And Finite Element Model Updating

Farhad Hosseinlou [1*], Alireza Mojtahedi[2], Mohammad Ali Lotfollahi[3]

[1] Ph.D Condidait, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, F.Hosseinlou@tabrizu.ac.ir
[2] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Mojtahedi@tabrizu.ac.ir
[3] Professors, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Lotfollahi@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 19 Apr. 2015
Accepted: 10 Apr. 2016

Keywords:
Offshore jacket platforms,
Damage detection,
Model updating,
Model reduction,
Sensitivity analysis.

ABSTRACT

One of the most important items in the field of engineering and design of structures is safety assessment. It is usually complicated, due to uncertainty in determining the most important parameters in the final design. This paper describes a new method for updating stiffness matrix structure that is capable of identifying the damage to individual members, when limited modal data is available by using results of the experiment on physical model of the offshore jacket platforms. We evaluated selection procedure inactive degrees of freedom in the process reduced model with a reasonable criterion by using the sensitivity analysis of system response under base excitation. This performance leads to faster convergence of iterative algorithm. Also, in this study, with using the finite element model updating based on the empirical models, it was considered during the process as much as possible to overcome the problem of uncertainty in modeling.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.3.8]

۱ - مقدمه

سکوهای فولادی از نوع جکت، متداول‌ترین نوع از سازه‌های دریایی هستند که به طور گسترده‌ای جهت بهره‌برداری از منابع نفتی و گازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سازه‌های دریایی در طول عمر خدمت خود، به طور مداوم در معرض آسیب‌های ناشی از وقوع عیوب قرار دارند. این عیوب شامل اثر خستگی، خوردگی اعضاء، برخورد کشتی و شناورها، افتادن اشیاء از عرشه سکو، نیروهای ناشی از طوفان‌های شدید و فعالیت‌های نصب و راه اندازی و تعمیر و نگهداری می‌باشند که می‌توانند منجر به کاهش مدول الاستیسیته در اعضاء سازه‌ای گردند [۱]. توسعه تکنیک‌های مؤثر برای تشخیص آسیب‌های اولیه، در جلوگیری از وقوع شکست‌های سازه‌ای فاجعه بار بسیار موثر می‌باشند. از آن‌جایی که آسیب‌های موجود باعث تغییر در پارامترهای جرم و یا توزیع سختی سیستم سازه‌ای می‌شوند، در نتیجه منجر به ایجاد تغییر در خواص مودال نظیر فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی می‌گردند. روش‌های تشخیص آسیب با استفاده از تکنیک بروزرسانی بر اساس پارامترهای مودال را می‌توان به دو بخش، روش‌های مستقیم و روش‌های تکرارشونده تقسیم نمود. در روش بروزرسانی مستقیم، با حل یک مساله بهینه‌سازی مقید، ماتریس‌های بروزرسانی شده به‌دست می‌آیند. اختلاف بین روش‌های مستقیم گوناگون به واسطه اختلاف در تابع هدف انتخابی، قیدهای تعریف شده و روش عددی مورد استفاده برای بهینه‌سازی است. مشخصه مهم روش‌های مستقیم بازسازی صحیح اطلاعات اندازه‌گیری شده است. هم‌چنین این روش‌ها نیاز به تکرار نداشته و در نتیجه امکان واگرایی در محاسبات وجود ندارد. از معایب اصلی روش‌های مستقیم این است که پارامترهای مودال مدل بروزرسانی‌شده اغلب دارای مفهوم فیزیکی نبوده و تغییر در ماتریس‌های جرم و سختی را نمی‌توان به تغییرات فیزیکی در المان‌های مدل اصلی وابسته نمود. روش‌های تکرارشونده نسبت به روش‌های مستقیم، ارجحیت دارند، زیرا که پارامترهای بروزرسانی‌شده در این روش‌ها دارای مفهوم فیزیکی هستند. از طرفی، در روش‌های بروزرسانی تکرارشونده، فرآیند اصلی شامل حل یک مساله بهینه‌سازی است که در آن اختلاف بین پارامترهای مودال تحلیلی و اندازه‌گیری‌شده با استفاده از تنظیم پارامترهای مجهول مدل به حداقل رسانده می‌شود. پارامترهای مودال همان فرکانس‌ها و شکل‌های مودی هستند و پارامترهای مجهول مدل همان پارامترهای بروزرسانی (ضرایب تصحیح بدون بعد) می‌باشند. در این روش‌ها باید مودهای تحلیلی و اندازه‌گیری‌شده به طور صحیح با هم ترکیب شوند [۲ و۳]. تمرکز این مقاله در راستای بروزرسانی ماتریس سختی در یک سکوی فولادی نوع جکت با هدف شناسائی آسیب‌های موجود در سازه مورد نظر با بهره‌گیری از اطلاعات مودی اندازه‌گیری‌شده در چند مود اول می‌باشد، به نحوی که با دسترسی به تعداد کمی از پارامترهای مودال قابل استخراج، اقدام به تشخیص آسیب می‌نماید. روش حاضر (روش CMCM[1] بهبود یافته) از مزایای هر دو روش مستقیم و تکرارشونده بهره می‌گیرد. همان‌طور که گفته شد، ردگیری تغییرات پارامترهای مودال می‌تواند به عنوان پایه و اساس روش‌های مختلف تشخیص آسیب مبتنی بر ارتعاش مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال، نسبت تغییرات ایجاد شده در فرکانس بین پارامترهای مودال تحلیلی و اندازه‌گیری‌شده به عنوان یک شاخص خسارت در نظر گرفته می‌شود [۴]. فرکانس‌های طبیعی را می‌توان از پاسخ‌های منحصربه‌فرد به دست آمده در هر نقطه بر روی یک سازه محاسبه و دقیقاً شناسایی نمود. بر این اساس، اخیراً روش‌های متعددی برای تعیین محل و برآورد شدت آسیب با استفاده از فرکانس‌های مودال توسعه یافته است [۵]. روش‌های شناسایی آسیب معمولاً در چهار سطح طبقه‌بندی می‌شوند که به ترتیب سطح اول؛ تنها شامل تعیین آسیب موجود در سازه، سطح دوم؛ شامل تعیین آسیب موجود با شناسایی مکان هندسی آن، سطح سوم؛ شامل تعیین آسیب موجود با شناسایی مکان هندسی و شدت خسارت و نهایتاً سطح چهارم؛ شامل سطح سوم همراه با پیش‌بینی عمر باقیمانده از سازه می‌باشند [۶]. در این زمینه، تحقیقات مختلفی در ارتباط با سکوهای دریایی نوع جکت انجام گرفته است. از جمله می‌توان به مطالعاتی بر مبنای استفاده از روش‌های انرژی کرنشی مودال، روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، روش تجزیه انرژی کرنش مودال، روش انرژی کرنش مودال متقابل و روش انرژی کرنش مودال تکرارشونده اشاره نمود [۷-۱۱]. ولی همان‌طور که از مراجع مذکور بر می‌آید، این روش‌ها در مکان‌یابی اعضای آسیب دیده مؤثر ولی در ارزیابی شدت آسیب با مشکل مواجه می‌باشند. بنابراین روش پیشنهادی در این مطالعه در راستای بهبود و ارتقاء سطح سوم روش‌های شناسایی آسیب مطرح گردیده است.

روش تنظیم خصوصیات فیزیکی برای بروزرسانی مدل و هم‌چنین تشخیص آسیب در یک سازه فولادی جکتی با روش CMCM اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. نیاز به تنها تعداد کمی از مودهای سازه آسیب‌دیده و هم‌چنین عدم نیاز به ترکیب مودهای اندازه‌گیری‌شده و مودهای تحلیلی از ویژگی‌های مهم اجرای این روش به شمار می‌روند. با این حال، محدودیت اصلی در آن، نیاز به شکل کامل مودهای تجربی (بر اساس تعداد درجات آزادی مدل سازه‌ای) می‌باشد [۳ و۱۲]. بنابراین در استفاده از روش CMCM برای تشخیص آسیب در سازه‌های فولادی ثابت با دو چالش عمده، عدم هماهنگی تعداد سنسورهای اندازه‌گیری و درجات آزادی مدل تحلیلی (ناتمامیت فضایی) و اندازه‌گیری داده‌های نویزدار روبرو هستیم که برای رفع چالش‌های مذکور (مشکل اندازه‌گیری شکل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.3.8]

مود کامل) می‌توان از روش کاهشی گویان[۲] بهره جست. روش‌های ارزیابی سازه را می‌توان به طور گسترده به دو گروه روش‌های حوزه فرکانس و حوزه زمان طبقه‌بندی نمود. روش‌های ارزیابی در حوزه فرکانس بر مبنای تغییرات در پارامترهای مودال و روش‌های ارزیابی در حوزه زمان بر مبنای میزان ارتباط بین پاسخ دریافتی از سیستم سازه و نیروی تحریک‌کننده شکل می‌گیرند. روش مبتنی بر حساسیت پاسخ توسط جان در سال۱۹۴۰میلادی ارائه گردید. به مرور زمان پیشرفت‌های چشمگیری در استفاده از روش حساسیت در حوزه زمان برای ارزیابی سازه‌ها حاصل گردیده است [۱۳و۱۴]. لوو و لاو حساسیت پاسخ سیستم به تحریک‌های مختلف دینامیکی اعمالی را مورد بحث و بررسی قرار دادند. هم‌چنین یک روش مبتنی بر حساسیت را ارائه و معرفی نمودند که قابلیت شناسایی هم‌زمان آسیب‌های محلی و نیروهای خارجی تحمیل شده بر سازه را دارا می‌باشد [۱۵و۱۶]. هدف اصلی مطالعه حاضر، تعیین محل و برآورد دقیق شدت آسیب با کمترین اطلاعات موجود از سازه واقعی آسیب‌دیده در کمترین زمان، با هزینه پایین و با دقت بالا تحت روش پیشنهادی جدید می‌باشد. ویژگی دیگر این تحقیق انجام آزمایش مودال تجربی بر روی یک مدل فیزیکی آزمایشگاهی جهت ارزیابی مدل المان محدود به کار برده شده در صحت‌سنجی روش پیشنهادی می‌باشد. روش المان محدود یکی از ابزارهای قدرتمندی است که به طور گسترده در تشکیل مدل‌های تحلیلی سیستم‌های سازه‌ای به منظور ارزیابی نحوه رفتار و بررسی عملکرد سازه‌ها در هنگام وقوع بارهای متعارف و بیش از حد انتظار مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولی به دلایل گوناگون از جمله عدم توجّه به جزییات مناسب و گاه لازم در شکل‌گیری مدل سازه، ساده سازی‌های هندسه مدل و عدم قطعیّت‌های موجود در برآورد صحیح پارامترهای ورودی از جمله درجه‌گیرداری اتّصالات، مقدار مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و غیره، باعث می‌گردد نتایج چنین مدل‌هایی 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 بر 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 نمودن فاصله بین مدل عددی و سازه حقیقی، مدل عددی سازه باید با استفاده از اطلاعات مودی اندازه‌گیری‌شده تصحیح یا بروزرسانی شود. باید توجه داشت که امکان خطاهای اندازه‌گیری نیز نباید غیرمحتمل در نظر گرفته شود.

در روش پیشنهادی حاضر، تحلیل حساسیت پاسخ سیستم به یک تحریک پایه و رویه انتخاب درجات آزادی غیرفعّال، در مرحله اعمال روش کاهش مدل با یک معیار مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد. این عملکرد منجر به همگرائی سریع‌تر آلگوریتم تکرار می‌شود. هم‌چنین در این مطالعه با استفاده از فرآیند بروزرسانی مدل المان محدود بر اساس مدل تجربی، تا حد امکان فائق آمدن بر مسئله عدم قطعیت در مدل‌سازی نیز در طول فرآیند، در نظر گرفته شده است. از آن‌جایی که مسئله اصلی در مسائل مرتبط با تحلیل دینامیکی سازه‌ها، پرهزینه و زمان بر بودن محاسبات می‌باشد، بنابراین با استفاده از این روش هم در زمان و هم در هزینه صرفه‌جویی خواهد شد.

۲- روش CMCM و کاربرد آن در شناسائی و کلاس‌بندی عیب

چهارچوب اصلی آلگوریتم مورد استفاده در این تحقیق، بر مبنای ساختار روشی شبیه به روش CMCM می‌باشد. بنابراین در این بخش، این روش به طور خلاصه مطرح می‌گردد و جهت مطالعه بیشتر به مرجع [۳] ارجاع داده می‌شود.

ابتدا معادله ارتعاش آزاد سیستم نامیرا با معادله دیفرانسیلی مرتبه دوم زیر ارائه می‌شود:

$$M\ddot{X} + KX = 0 \qquad (۱)$$

که در آن، M ماتریس جرم، K ماتریس سختی، X بردار جابه جائی و $\ddot{X}$ بردار شتاب می‌باشد. با استفاده از حل مقدار مشخصه سیستم مورد نظر، مقادیر مشخصه و بردارهای مشخصه به‌دست می‌آیند. مقدار ویژه و بردار ویژه i ام در سازه سالم را می‌توان طبق معادله (۲) به‌دست آورد:

$$K\Phi_i = \lambda_i M\Phi_i \qquad (۲)$$

که در این رابطه M و K به ترتیب ماتریس‌های جرم و سختی در سازه سالم و λ_i (i امین مقدار ویژه متناظر با ماتریس‌های M و K) و Φ_i (i امین بردار ویژه متناظر با ماتریس‌های M و K) می باشند. در این‌جا، علایم M و K برای شرایط سالم (مدل پایه) به کار می‌روند و فرض می‌شود که از یک مدل عددی المان محدود (فرضاً با استفاده از نرم‌افزار انسیس[۳]) به‌دست می‌آیند. علامت K^* نیز برای ماتریس سختی مدل معیوب یا مدلی که در آن مؤلفه‌های مربوط به ماتریس مورد نظر با ضرایبی تغییر داده شده‌اند، با فرمول زیر نشان داده می‌شود:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.3.8]

$$K^* = K + \sum_{n=1}^{N_e} \alpha_n K_n \qquad (۳)$$

در این رابطه، K ماتریس سختی سازه سالم، K_n ماتریس سختی متناظر با عضو nام و یک ماتریس $N_e \times N_e$ می‌باشد که در آن مؤلفه‌های غیرمربوط به عضو nام صفر می‌باشند. N_e تعداد اعضای سازه (درجات آزادی) و α_n ضریب تصحیح نامعلومی هستند که با استفاده از آن یک پارامتر از ماتریس سختی را می‌توان بروزرسانی نمود. با توجه به این که بر اثر وقوع آسیب در سازه‌ها (در اکثر مطالعات عیب‌یابی به خصوص در ارتباط با سازه‌های دریایی) معمولاً تغییر ماتریس جرم ناچیز و قابل صرف‌نظر است. ماتریس جرم سازه بروزرسانی‌شده را برابر با ماتریس جرم اولیه در نظر گرفته و روند بروزرسانی فقط در مورد ماتریس سختی صورت می‌پذیرد. لذا خواهیم داشت:

$$M = M^* \qquad (۴)$$

مشابه رابطه (۲) با فرض λ_j^* (j امین مقدار ویژه متناظر با ماتریس‌های K^* و M^*) و Φ_j^* (j امین بردار ویژه متناظر با ماتریس های K^* و M^*) رابطه زیر برقرار است:

$$K^* \Phi_j^* = \lambda_j^* M^* \Phi_j^* \qquad (۵)$$

Φ_j^* و λ_j^* را می‌توان از اندازه‌گیری‌های تجربی نیز به‌دست آورد. بنابراین در فرآیند فرمول‌بندی مربوط به روش حاضر، در واقع می‌توانند بیانگر مقادیر هدف برای یک آلگوریتم بروزرسانی و یا مقادیر مربوط به سازه در حالت معیوب باشند که نهایتاً با تعیین ضریب α_n مشخص می‌گردند. در ادامه، در فرمول‌بندی‌ها فرض بر این است که تعداد محدودی از Φ_j^* و λ_j^* از اندازه‌گیری‌های تجربی در دسترس می‌باشند. با پیش‌ضرب $(\Phi_i)^t$ (ترانهاده Φ_i) در معادله (۵) داریم:

$$(\Phi_i)^t K^* \Phi_j^* = \lambda_j^* (\Phi_i)^t M^* \Phi_j^* \qquad (۶)$$

با جاگذاری معادلات روابط (۳) و (۴) در رابطه (۶)، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$C_{ij}^{\int} + \sum_{n=1}^{N_e} \alpha_n C_{n,ij}^{\int} = \lambda_j^* \left(D_{ij}^{\int}\right) \qquad (۷)$$

که در آن داریم:

$C_{n,v}^{\int} = (\Phi_i)^t K_n \Phi_j^*$ ، $C_v^{\int} = (\Phi_i)^t K \Phi_j^*$ و $D_v^{\int} = (\Phi_i)^t M \Phi_j^*$.

اگر به‌جای اندیس ij، به طور فشرده‌تر از نماد v، استفاده شود، رابطه به صورت زیر خواهد بود:

$$C_v^{\int} + \sum_{n=1}^{N_e} \alpha_n C_{n,v}^{\int} = \lambda_j^* \left(D_v^{\int}\right) \qquad (۸)$$

با بازنویسی معادله (۸) داریم:

$$\sum_{n=1}^{N_e} \alpha_n C_{n,v}^{\int} = f_v^{\int} \qquad (۹)$$

که در آن $f_v^{\int} = -C_v^{\int} + \lambda_j^* D_v^{\int}$ می‌باشد. با استفاده از مدل المان محدود (مدل پایه) N_i مود و از مدل تجربی (سازه معیوب) N_j مود استخراج می‌شود.

در عمل از معادله (۹) تعداد $N_v = N_i \times N_j$ معادله حاصل می‌شود. معادلات حاصل از رابطه (۹) به معادلات CMCM معروفند، چرا که شامل دو دسته مود از دو مدل (فرضاً عددی و تجربی) می‌باشند. فرم ماتریسی معادله (۹) به شرح زیر می‌باشد:

$$C_{N_v \times N_e}^{\int} \alpha_{N_e \times 1} = f_{N_v \times 1} \qquad (۱۰)$$

اگر اطلاعات مودی اندازه‌گیری‌شده بیش از پارامترهای بروزرسانی مجهول باشند (اگر N_v از N_e بزرگتر باشد) در این صورت پارامتر های بروزرسانی را می‌توان با استفاده از روش حداقل مربعات به صورت زیر به‌دست آورد:

$$\alpha = \left(C^t C\right)^{-1} C^t f^{\int} \qquad (۱۱)$$

۳- روش‌های کاهش مدل و نقصان داده‌ها

از آن جایی که فرکانس‌های طبیعی سیستم (با میرایی صفر) به عنوان پارامترهای مشخصه مطلوب در نرم‌افزارهای المان محدود در نظر گرفته می‌شوند، از این رو فرکانس‌های طبیعی متناسب با درجات آزادی را می‌توان با حل معادله دیفرانسیل ارتعاش آزاد سیستم بدون میرایی (معادله ۱) با اعمال شرایط اولیه مناسب به دست آورد. به عبارتی دیگر، مسئله مقادیر ویژه مطابق با معادله زیر باید حل گردد:

$$\det\left|[K] - [M]\omega^2\right| = 0 \qquad (۱۲)$$

معادله (۱۲) بر حسب ω^2 از درجه n بوده و برای n، ω^2 جواب مثبت به‌دست می‌آید. بنابراین n مود ارتعاشی داریم که هر مود دارای یک فرکانس مودی ω_i و شکل $[u_i]$ است. بر اساس مفهوم اساسی تحلیل ارتعاش، فرکانس‌های طبیعی که از معادله بالا نتیجه می‌شوند، فرکانس‌های بدون میرایی هستند. مسئله مقادیر ویژه را می‌توان از طریق نرم‌افزار متلب[۴] با استفاده از دستور $eig\ (A)$ حل نمود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.3.8]

۳-۱- روش کاهشی گویان

مسئله اصلی در تحلیل دینامیکی سازه، پرهزینه و زمان‌بر بودن محاسبات می‌باشد. از آن‌جائی که مدل‌های المان محدود شامل درجات آزادی زیادی هستند، محاسبه تمامی فرکانس‌ها و شکل‌های مودی ـ تحلیل مودال ـ بسیار پرهزینه است. با توجه به شرایط قابل قبول به‌دست آوردن یک تقریب مناسب برای پاسخ دینامیکی، حل کامل مسئله مقدار مشخصه چندان لازم نیست. با توجه به مطالب مذکور، اغلب کاهش ابعاد ماتریس‌ها مفید خواهد بود. مسئله کاهش یافته تنها دارای درجات آزادی اصلی است. به هر حال تعداد درجات آزادی کافی برای ارائه کوچک‌ترین مودهای ارتعاشی که اغلب مهم‌ترند باید در نظر گرفته شود. [۱۷].

اولین مدل کاهشی (کاهش استاتیکی) توسط گویان ارائه گردید [۱۸]. در این روش ماتریس‌های جرم و سختی و بردارهای جابه‌جایی در معادله ارتعاشی به درجات آزادی اصلی[۵] و وابسته[۶] تقسیم می‌شوند:

$$\begin{bmatrix}[M_{mm}] & [M_{ms}]\\ [M_{sm}] & [M_{ss}]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\ddot{X}_m\\ \ddot{X}_s\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}[K_{mm}] & [K_{ms}]\\ [K_{sm}] & [K_{ss}]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}X_m\\ X_s\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}0\\ 0\end{Bmatrix} \quad (۱۳)$$

اندیس‌های s و m به ترتیب برای درجات اصلی و وابسته به‌کار برده شده است. هدف به دست آوردن یک ماتریس تبدیل T_s می‌باشد تا بر اساس درجات آزادی اصلی و وابسته از مرتبه ماتریس‌های جرم و سختی کاسته شود. از عبارت اینرسی در مرحله دوم صرف نظر می‌شود:

$$[K_{sm}]\{X_m\}+[K_{ss}]\{X_s\}=[T_s]\{X_m\} \quad (۱۴)$$

در اینجا T_s، از روابط زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{Bmatrix}X_m\\ X_s\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}[I]\\ -[K_{ss}]^{-1}[K_{sm}]\end{bmatrix}\{X_m\}=[T_s]\{X_m\} \quad (۱۵)$$

$$[T_s]=\begin{bmatrix}[I]\\ -[K_{ss}]^{-1}[K_{sm}]\end{bmatrix} \quad (۱۶)$$

بدین ترتیب، ماتریس‌های کاهشی گویان، جرم و سختی به قرار زیر می‌باشند:

$$[M_R]=[T_s^t]\,[M]\,[T_s] \quad (۱۷)$$

$$[K_R]=[T_s^t]\,[K]\,[T_s] \quad (۱۸)$$

با توجه به این که در شرایط نقصان داده می‌توان از اسکیم مدل کاهشی استفاده کرد.

اگر Tماتریس تبدیل درجات آزادی اصلی از درجات مرتبه کامل (برای مدل پایه) باشد آنگاه با فرض $T_s=T$ در مدل کاهشی با جاگذاری روابط، $\Phi_i=T(\Phi_i)_m$ ($(\Phi_i)_m$، i امین شکل مودی سازه پایه در درجات آزادی اصلی) و $\Phi_j^*=T^*(\Phi_j^*)_m$ ($(\Phi_j^*)_m$، j امین شکل مودی سازه معیوب در درجات آزادی اصلی) در روابط به‌دست آمده قبلی، روابط نهایی حاصل می‌گردد که در آن‌ها T^* همتای Tدر سازه معیوب می‌باشد. این روابط به شرح زیر می‌باشند:

$$C_v^j=[(\Phi_i)_m]^t T^t K T^*(\Phi_j^*)_m \quad (۱۹)$$

$$C_{n,v}^j=[(\Phi_i)_m]^t T^t K_n T^*(\Phi_j^*)_m \quad (۲۰)$$

$$D_v^j=[(\Phi_i)_m]^t T^t M T^*(\Phi_j^*)_m \quad (۲۱)$$

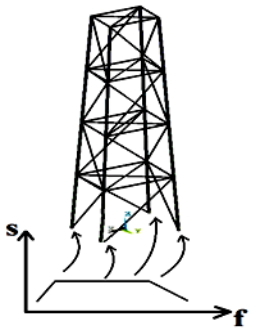
که در این‌جا، $[K_R]=[T^t][K][T^*]$، برابر با ماتریس کاهش سختی می‌باشد. برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی ابتدا ماتریس‌های جرم و سختی تحت تحلیل ساب‌استراکچر[۷] از نرم‌افزار انسیس استخراج شده، سپس تمام محاسبات اعم از، محاسبه فرکانس‌ها و بردارهای جابه‌جایی و مقادیر ویژه، انتخاب درجات آزادی اصلی، محاسبه ماتریس تبدیل، تشکیل و حل معادله (۱۰) در نرم‌افزار متلب صورت می‌گیرد. با فرض عاری بودن $(\Phi_j^*)_m$ از نویز، منبع خطا از T^* بوده (به دلیل ناشناخته بودن آن) بنابراین برای شروع فرایند محاسبات با فرض $T^*=T$ از مقادیر K استفاده می‌کنیم. سپس با استفاده از αهای حاصل از حل دستگاه، آن را اصلاح کرده و فرآیند محاسبات تکرار می‌شود تا به یک همگرایی دست پیدا کنیم.

۳-۲- اصلاح و کاهش مدل سازه‌ای بر مبنای تحلیل حساسیت دینامیکی

در این تحقیق، به منظور بهبود کارآئی روش CMCM مرسوم، در یک مرحله قبل از آلگوریتم اشاره شده در بخش قبلی، با استفاده از یک فرآیند تحلیل حساسیت، اقدام به حذف برخی از اعضا با تاثیر ضعیفتر در پاسخ مربوطه سیستم، می‌گردد. توسط این فرآیند، کارآئی روش پیشنهادی، با توجه به حجم محاسبات و زمان همگرائی آلگوریتم مربوطه، ارتقا می‌یابد. تحلیل حساسیت تکنیکی است که به‌وسیله آن یک تحلیل‌گر پی می‌برد که اصلاح خواصی از سازه چون شرائط مرزی، خواص مصالح، هندسه و غیره چه تاثیری بر پاسخ‌های سازه‌ای مدل دارد. تحلیل حساسیت می‌تواند جهت تشخیص حساسیت و عدم حساسیت نواحی از سازه‌ها برای پاسخ‌های معین به‌کار رود. در این مطالعه از تحلیل طیف پاسخ تک نقطه‌ای که شامل مراحل مدل‌سازی، حل تحلیل مودال، حل تحلیل طیفی، گسترش مودها، ترکیب مودها و اخذ نتایج می‌باشد، جهت تحلیل حساسیت استفاده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.3.8]



شکل ۱- تحلیل طیفی از نوع تک نقطه‌ای (شدت طیف- فرکانس)

در این روش، مطابق شکل ۱ مدل سازه‌ای (سکو) تحت تحریک نوسانی در راستای عمودی در محدوده مود اول قرار می‌گیرد. به عبارتی در محدوده فرکانسی ۱ تا ۵۵ هرتز، جابه‌جایی به صورت نوسانی به پایه‌های سازه سکو وارد می‌شود که همان طیف اعمالی می‌باشد. در نتیجه پاسخ سکو از نوع جابه‌جایی لرزه‌ای در قالب تنش معادل گره‌ای بررسی می‌شود. در مرحله ترکیب مودها از روش SRSS (جذر مجموع مربعات) استفاده شده است که به فرم زیر ارائه می‌شود:

$$R_a = \left(\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \varepsilon_{ij} R_i R_j \right)^{0.5} \qquad (۲۲)$$

که در آن، R_a پاسخ مودال کلی، N تعداد کل مودهای گسترش یافته، ε_{ij} ضریب ترکیب (اگر صفر باشد مودها مستقل از هم هستند)، R_i و R_j پاسخ مودال مربوط به مودهای iام و jام که $R_i = A_i \Psi_i$ و $R_j = A_j \Psi_j$ و A_i، A_j ضرایب مود برای مودهای i ام و jام، Ψ_i، i امین شکل مود و Ψ_j، j امین شکل مود می‌باشند.

شایان ذکر است در این مرحله، هم‌زمان با حذف المان‌های مهاری افقی مدل اولیه منطبق بر مدل تجربی (مدل بروزرسانی‌شده)، تحلیل حساسیت روی این مدل انجام می‌شود. سپس همین تحلیل روی مدل اولیه که بر اساس نتایج آزمایشگاهی بروزرسانی‌شده هم اعمال می‌شود. سپس نتایج با هم مقایسه می‌شوند. هدف تشخیص حساسیت پاسخ کلی سازه به حذف برخی از المان‌ها می‌باشد. یعنی می‌خواهیم هندسه مدل سازه‌ای منطبق بر مدل تجربی را در صورت امکان برای اعمال روش پیشنهادی کاهش دهیم.

۴- تحلیل مودال عددی، تجربی و بروزرسانی مدل المان محدود

در طراحی و ارزیابی سازه‌هایی که تحت تاثیر نوسانات به واسطه بارها و محرک‌های ارتعاشی می‌باشند، انجام تحلیل مودال کاملا ضروری است. در این مقاله از روش حل بلاک‌لانسوس[۸] برای حل تحلیل مودال استفاده شده است. تست مودال، تکنیکی تجربی برای به‌دست آوردن مدل مودال یک سیستم ارتعاشی خطی بر مبنای رابطه بین پاسخ ارتعاشی سازه با تحریک اعمالی (FRF[۹]) می‌باشد. دو نوع تحلیل مودال تجربی وجود دارد که یکی تحلیل مودال آزمایشگاهی (EMA[۱۰]) است و سازه مورد آزمایش تحت ارتعاش اجباری قرار گرفته و پارامترهای مودال به دست می‌آید. روش دیگر تحلیل مودال عملیاتی(OMA[۱۱]) می‌باشد. در این روش ارتعاش سازه واقعی تحت بارهای بهره‌برداری ثبت و پارامترهای مودال که همان فرکانس‌ها، شکل مودها و میرایی سازه است به دست می‌آیند. در مجموع، تحلیل مودال تجربی شامل سه مرحله؛ آماده‌سازی برای تست، اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی و استخراج پارامترهای مودال می‌باشد. آماده‌سازی تست شامل؛ انتخاب تکیه‌گاه سازه، نوع تحریک، نقاط تحریک، سخت افزارهای اندازه‌گیری نیرو و پاسخ، تعیین هندسه مدل با نقاط اندازه‌گیری معین و منابع خطاء می‌باشد. در طول تست، یک مجموعه FRF اندازه‌گیری شده و ذخیره می‌شود تا در مرحله بعد به منظور تعیین پارامترهای سازه تحلیل شوند [۱۹].

مقایسه پیش‌بینی‌های حاصل از مدل عددی با داده‌های تجربی یک مرحله ضروری در روند بروزرسانی مدل می‌باشد. هدف این مقایسه ارزیابی نزدیکی مدل تجربی به مدل عددی متناظر بوده و مقایسه اغلب در دامنه مودال ما بین فرکانس‌های طبیعی و بردارهای شکل مودی انجام می‌پذیرد. اما به علت اینکه شکل مودهای تجربی اغلب ناقص و پیچیده هستند، شاخص‌های مختلف برای مقایسه شکل مودهای تجربی و عددی مطرح می‌شود. در عمل ابعاد بردارهای ویژه به دست آمده از مدل عددی Φ_i^a، بزرگتر از ابعاد بردار ویژه تجربی Φ_i^m متناظر می‌باشند. آن به این علت هست که پاسخ‌ها فقط می‌توانند در نقاط محدودی از سازه‌های فیزیکی اندازه‌گیری شوند. برای کاهش ابعاد بردار ویژه عددی به اندازه ابعاد بردار ویژه اندازه‌گیری‌شده می‌توان از تکنیک‌های کاهشی بهره برد. در این مطالعه، معیار اطمینان مودال (MAC[۱۲]) با بهره‌گیری از نرم افزار *FEMtools3.3.0* برای بروزرسانی مدل استفاده شده است. مقدار MAC، به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$MAC(\Phi_i, \Phi_j) = \frac{\left| \Phi_i^T \Phi_j^* \right|^2}{\left(\Phi_i^T \Phi_i^* \right)\left(\Phi_j^T \Phi_j^* \right)} \qquad (۲۳)$$

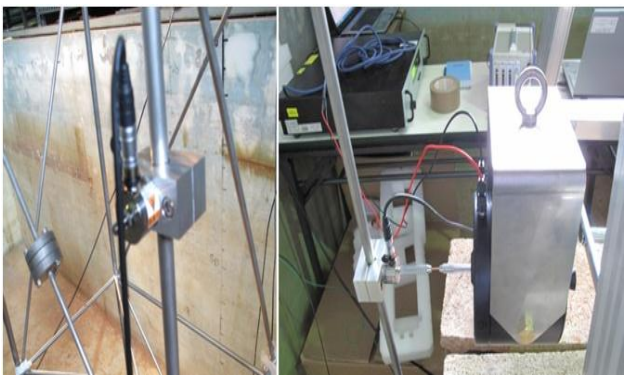
که Φ_j و Φ_i، j امین و i امین مود نرمال سازه‌ای (بردار مودال تحلیلی یا عددی و بردار مودال تجربی) هستند و علامت ستاره نشان دهنده مزدوج مختلط است. مقدارMAC بین صفر و یک تغییر می‌کند. مقدار یک نشان دهنده همبستگی کامل و مقدار صفر عدم همبستگی بین شکل مودهای تحلیلی و تجربی می‌باشد [۲۰].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

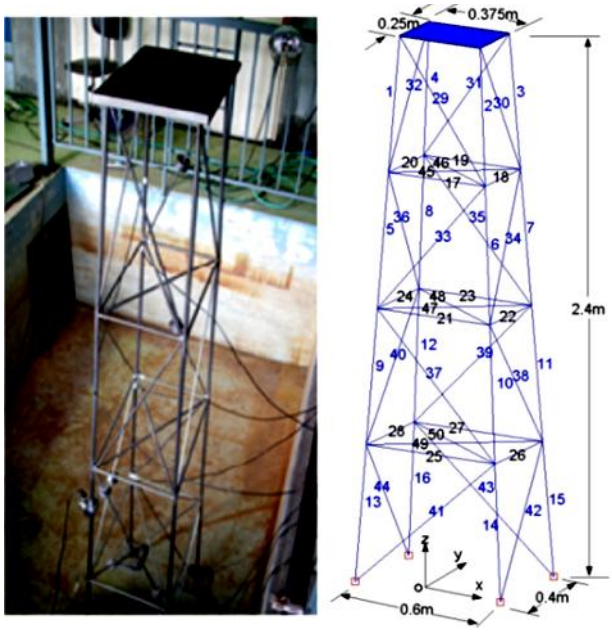
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.3.8]

۵- شرح مدل فیزیکی و چیدمان انجام آزمایش

مدل فیزیکی این تحقیق در قالب یک قاب فضائی با مشخصات، پایه های اصلی با قطر ۱۸ و ضخامت ۲/۵ میلی‌متر، اعضاء افقی (تیر و مهار) با قطر ۱۰ و ضخامت ۲ میلی‌متر و اعضاء مهاری قطری (در صفحه قائم) با قطر ۸ و ضخامت ۱/۵ میلی‌متر در چهار طبقه مطابق شکل ۳ ساخته شده است. در ضمن مدل مورد استفاده شامل ۱۲ گره اصلی (هر گره دارای سه درجه آزادی θ_z، U_y، U_x) و ۴۸ درجه آزادی می‌باشد. مدول یانگ $E = 2.07\times10^{11}\,pa$ و دانسیته $\rho = 7850\ \frac{kg}{m^3}$ در نظر گرفته شده است. آزمایش مودال تجربی در آزمایشگاه ارتعاشات و پردازش سیگنال دانشکده مکانیک دانشگاه تبریز انجام گرفت. پاسخ‌های ثبت شده از انجام آزمایش لرزاننده به‌دست آمدند که در طول اجرای آزمایش به صورت سیگنال‌های سری زمانی ذخیره شدند. سازه سکوی مورد آزمایش و ابزاربندی انجام آزمایش در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲- ارتباط بین آمپلی فایر، لرزاننده الکترودینامیکی، نیروسنج و سازه ی مدل



شکل ۳- ابزار و اندازه‌گیری‌های تجربی در مدل فیزیکی

تحریک خارجی (بر اساس سیگنال‌های نویز سفید) توسط یک لرزاننده الکترودینامیکی اعمال شد که به وسیله یک آمپلی‌فایر (مدل 2706 شرکت B & K) کنترل می‌گردید. فرکانس نمونه‌گیری آزمایش نیز برابر با ۱۰ کیلوهرتز و بازه فرکانسی بین ۰ تا ۲۰۰ هرتز در نظر گرفته شد.

۵-۱- نتایج بروزرسانی مدل المان محدود

همان‌طور که بیان شد، برای محدود نمودن فاصله بین مدل عددی و سازه حقیقی، مدل عددی سازه باید با استفاده از اطلاعات مودی اندازه‌گیری‌شده تصحیح یا بروزرسانی شود. اگرچه امکان خطاهای اندازه گیری نیز نباید غیرمحتمل در نظر گرفته شود. بایراکتار و همکاران اشاره دارند که برای مقادیر بیشتر از ٪۱۰ تفاوت ما بین مدل عددی و نتایج تجربی بایستی بروزرسانی صورت پذیرد [۲۱]. با انجام تحلیل مودال عددی و تجربی فرکانس‌های مربوط به مدل عددی و مدل تجربی و شکل مودهای اولیه مربوطه به ترتیب در شکل‌های ۴، ۵ و جدول (۱) آورده شده است. هم‌چنین، نتایج بروزرسانی و معیار MAC در جدول (۱) ارائه گردیده است. با توجه به نتایج (جدول ۱) و مطالب ذکر شده در این بخش، مشاهده می‌گردد تفاوت ما بین فرکانس‌های مدل عددی و نتایج تجربی کمتر از ٪۱۰ بوده و می‌توان چنین نتیجه گرفت که با نزدیک بودن مقادیر فرکانس‌های دو مدل، همبستگی کامل بین بردارهای مودال عددی و بردارهای مودال تجربی وجود دارد. یعنی مقدار معیار MAC به عدد یک نزدیک بوده یا به عبارتی مدل عددی در مقایسه با مدل تجربی دارای مطابقت مناسبی می‌باشد.

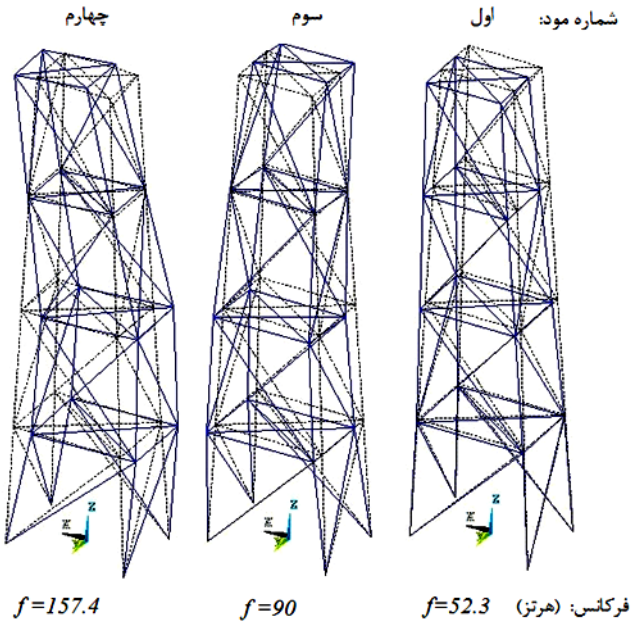
۵-۲- نتایج تحلیل حساسیت

اگر مدل المان محدود (مطابق با مدل تجربی) سکوی مورد نظر را تحت تحریک نوسانی در راستای عمودی در محدوده مود اول در نرم‌افزار انسیس طبق دستورالعمل ذکر شده در قسمت ۳ـ۲، تحلیل کنیم (تحلیل طیف پاسخ تک نقطه‌ای)، پاسخ و محدوده تغییرات تنش آن مشابه شکل ۶ و شکل ۷ـ الف خواهد بود. اگر همین تحلیل را روی مدل مورد نظر تحت اثر حذف مهارهای افقی در طبقات اعمال کنیم، نتایجی شبیه شکل ۷ـ ب اخذ می‌گردد. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که المان‌های مربوط به مهارهای افقی سکو دارای کمترین تنش بوده یا به عبارتی کمترین نقش را در باربری دارند (با توجه به شکل ۷ـ ب مشاهده می‌شود که حذف المان‌های مهاری افقی تأثیر محسوسی روی پاسخ سازه یا همان تغییرات تنش ندارند). لذا در راستای کاهش مدل و رسیدن به مدل نهائی و هم‌چنین اعمال روش پیشنهادی از المان‌های مربوط به مهارهای افقی سکو صرف نظر می‌شود. در نتیجه اولین قدم در راستای نیل به اهداف آلگوریتم مورد استفاده در این تحقیق

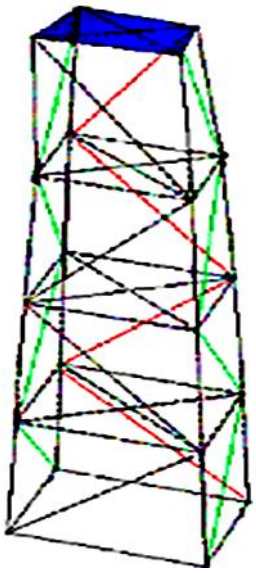
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.3.8]

برداشته می‌شود. بدین ترتیب مدل نهایی مورد استفاده مطابق شکل ۸ حاصل می‌گردد. کلیه مدل‌های المان محدود در این مطالعه در نرم‌افزار انسیس مدل شده است. شایان ذکر است که مش‌بندی المان‌ها با توجه به ماهیت روش پیشنهادی مبنی بر این که بایستی درجات آزادی و تعداد اعضاء سازه یکسان باشند به صورت دو گرهی (یک گره در ابتدا و یک گره در انتهای المان) اعمال شده است. مطابق شکل ۸ میزان کاهش سختی (مدول یانگ) در عضوهای ۱۰، ۱۸ و ۴۲ به ترتیب ۵۰، ۶۰ و ۴۰ درصد اعمال شده است.



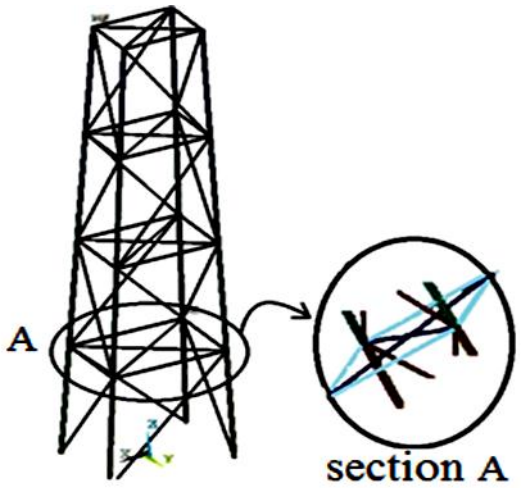
شکل ۴- شکل مودهای حاصل از تحلیل مودال عددی



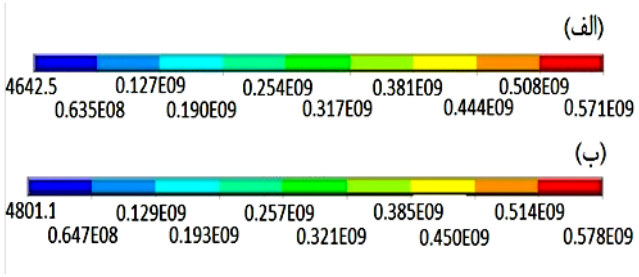
شکل ۵- تحلیل مودال تجربی به همراه شکل مود اول

جدول ۱ــ بروزرسانی مدل و مقادیر چهار فرکانس اول

MAC	بروزرسانی شده	تجربی	عددی
۱	۵۲/۹۱	۵۲/۸۵۳	۵۲/۳
۱	۷۲/۵۳	۷۲/۷۸۵	۷۱/۴۲
۱	۹۱/۷۳	۹۱/۶۲۵	۹۰
۱	۱۵۷/۶۵	۱۵۷/۸۲۲	۱۵۷/۴



شکل ۶- پاسخ سازه در قالب تنش معادل گرهی تحت معیار فون میسز



شکل ۷- محدوده تغییرات تنش معادل گرهی برای: الف) مدل المان محدود منطبق با مدل تجربی و ب) مدل بدون مهار افقی

۶- نتایج عیب‌یابی

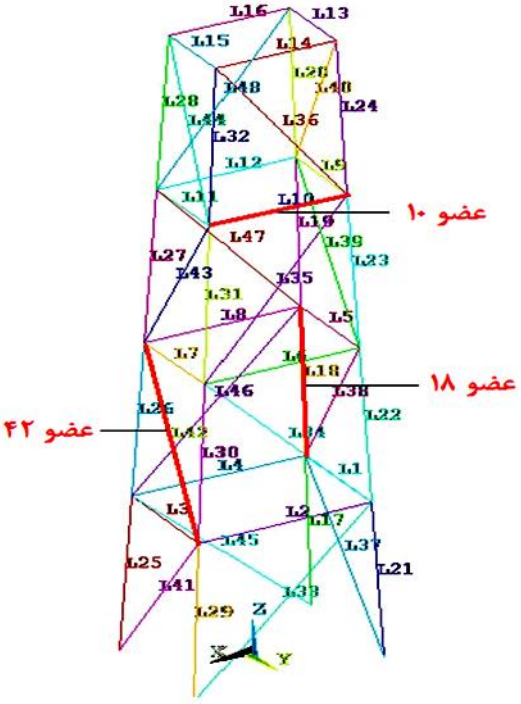
۶-۱- تشخیص شدت و محل آسیب

نتایج عیب‌یابی بر اساس مدل کاهشی گویان بدون تکرار و با تکرار و هم‌چنین اثرات حذف تعدادی از درجات آزادی مربوط به سازه در دو ناحیه مختلف آن در قالب شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه گردیده است. این نتایج با اتخاذ چهار مود از سازه معیوب و چهارده مود از سازه سالم به‌دست آمده است. مطابق شکل ۹ در مرحله اول که از فرض $T = T^*$ در محاسبات استفاده شده است، اعضاء ستونی ۳۱ و ۱۹ واقع در طبقه سوم اشتباه تخمین زده شده‌اند. اما با افزایش روند تکرار و با بهبود مقدار T^* (در هر مرحله T^* بر اساس مدل ناسالم اخذ شده از تکرار قبلی محاسبه می‌شود) به نتیجه مطلوب می‌رسیم. گاهی در عمل برای صرفه‌جوئی در هزینه یا به دلیل مشکلات اجرایی تعداد حسگرهای کمتری نسبت به درجات آزادی

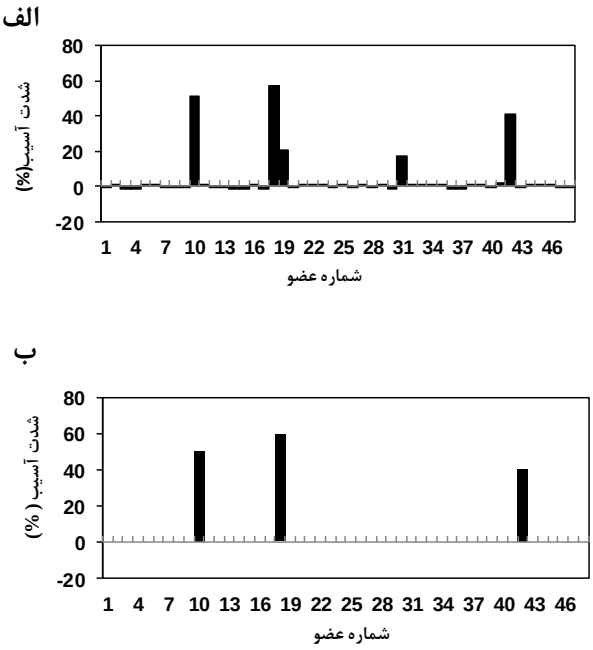
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.3.8]

استفاده می‌گردد. در این راستا از ۴۸ درجه آزادی موجود در سازه به تعداد ۸ درجه آزادی از نوع U_y از ۸ گره واقع در طبقه فوقانی (عرشه) و طبقه دوم در دو مرحله جداگانه حذف گردیده است، تا میزان اثرات حذف برخی درجات آزادی در روند تشخیص آسیب بررسی شود.

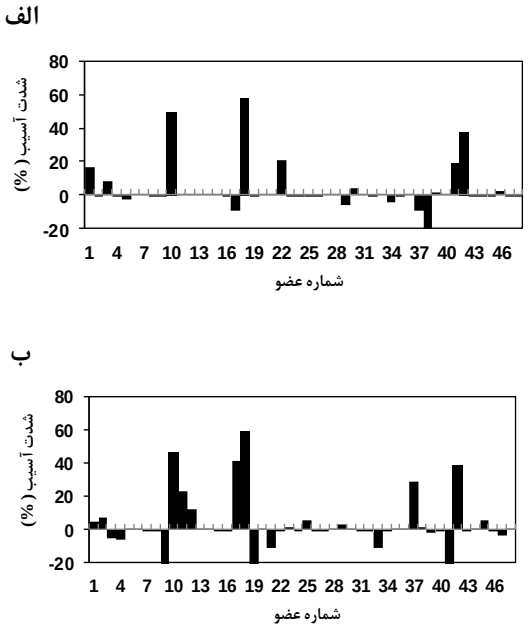


شکل ۸- مدل نهایی المان محدود با ۴۸ عضو



شکل ۹- نتیجه تشخیص آسیب بر اساس روش کاهشی گویان با ۴۸ درجه آزادی: (آ) بدون تکرار (ب) با تکرار

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود حالتی که درجات آزادی در طبقه فوقانی حذف گردیده است، دارای خطای بیشتری می‌باشد. پیش‌بینی می‌شود این خطا بر اساس ماهیت رفتار سکو در شکل مودی اول در مقایسه با حالت‌های دیگر دارای بیشترین مقدار باشد. لذا در شرایطی که اجباراً از تعداد حسگرهای کمتری استفاده می‌گردد، مناسب است که حسگرهای بخش‌های پایین‌تر سکو حذف و در قسمت‌های فوقانی حفظ شود. به عبارتی حسگرهای موجود هر چه در قسمت‌های بالایی سازه نصب شوند، نتایج بهتری اخذ می‌گردد.



شکل ۱۰- نتیجه تشخیص آسیب با ۴۰ درجه آزادی با حذف ۸ درجه آزادی از: (آ) طبقه عرشه (ب) طبقه دوم

۶-۲- تشخیص آسیب همراه با اعمال نویز در داده‌های اندازه‌گیری شده

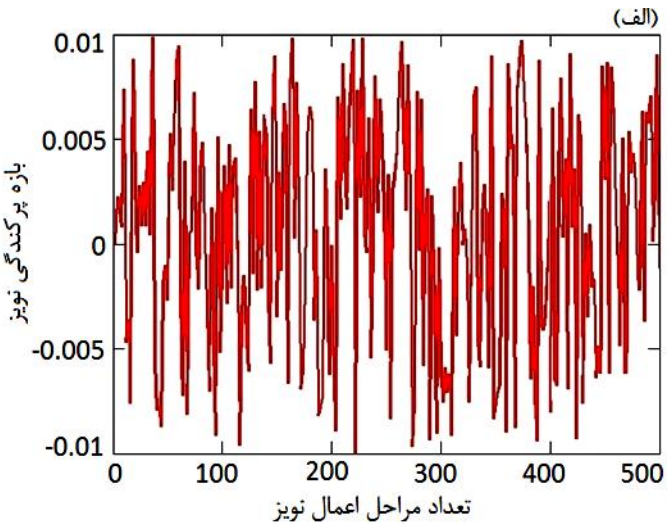
در عمل اندازه‌گیری پارامترهای مودال عاری از خطا نیست. منشاء این خطاها شامل تاثیر نویزهای موجود در محیط و یا نوسانات ناشی از اختلال در ابزار اندازه‌گیری می‌باشد. در این مطالعه به منظور در نظر گرفتن تأثیر این عامل در صحت عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از رابطه $\varphi_{j,noisy} = \varphi_j(1+\varepsilon\gamma)$ که در آن ε یک عدد تصادفی گاوسین با میانگین صفر و انحراف معیار واحد در بازه (۱- و۱) و ضریب γ (پارامتر تراز نویز) با مقادیر ٪۱ و ٪۲ می باشند، طی۵۰۰ مرحله محاسبات (۵۰۰ : i = ۱)، نویزی مطابق شکل ۱۱ به داده‌های اخذ شده در دو مرحله اعمال گردیده است. در نهایت با تعریف یک معیار مؤفقیت، عملکرد روش پیشنهادی ارزیابی می‌گردد.

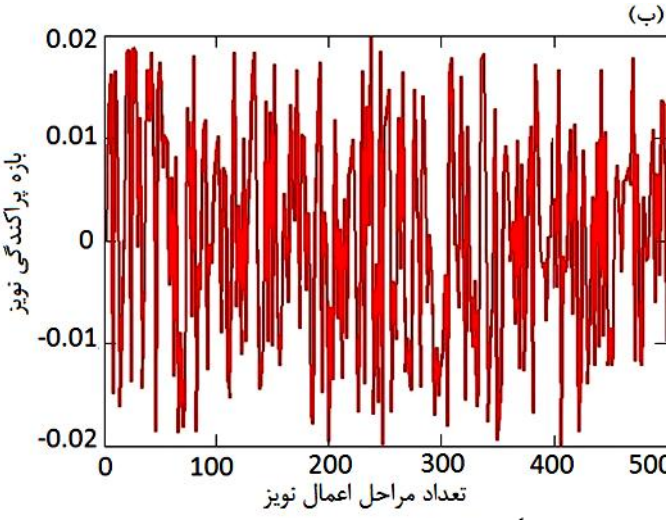
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.3.8]

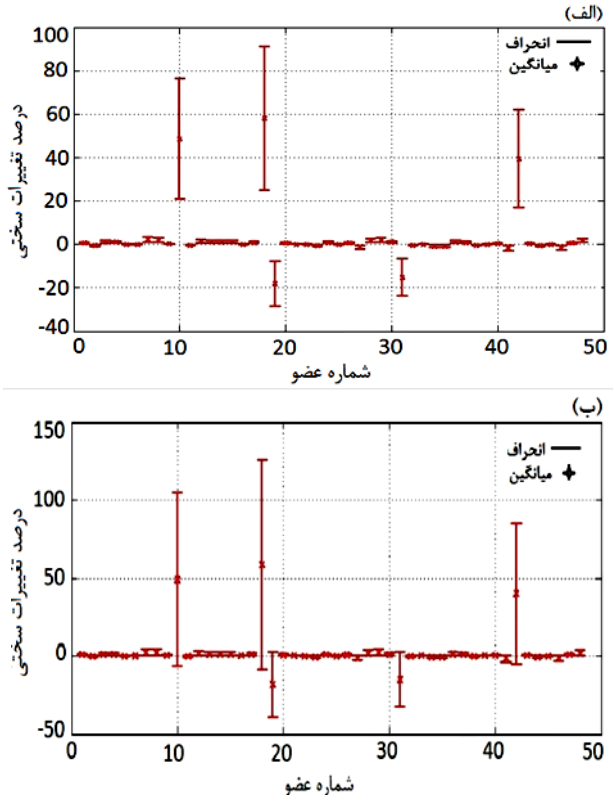
معیار مؤفقیت به صورت $S_R = (N_c/N_n) \times 100$ تعریف شده است که در آن N_n تعداد مشخصه‌های نویزدار شده جهت ارزیابی روش عیب‌یابی برابر ۵۰۰ در نظر گرفته شده است. پارامتر N_c (تعداد دفعات تشخیص صحیح آسیب در سیستم) طوری محاسبه می‌شود که به ازای هر مرحله محاسبات، اگر تشخیص عیب با مؤفقیت انجام پذیرد، یک واحد به آن اضافه می‌گردد ($N_c = N_{c_{\text{قبلی}}} + 1$جدید).

در نهایت با استفاده از نتایج به دست آمده بر حسب خطاهای موجود نسبت S_R به‌دست می‌آید. نتایج حاصل‌شده در شکل ۱۲ ارائه شده‌اند. در مقایسه بین نتایج اخذ شده در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که با افزاش نویز مقدار انحراف معیار برای اعضاء افزایش یافته است. با استفاده از رابطه $S_R = (N_c/N_n) \times 100$، میزان موفقیت برای حالت اول ۹۲٪ و برای حالت دوم ٪۷۵ به دست آمد. در کل، اعضاء شماره ۳۱ و ۱۹ ستون‌های واقع در طبقه سوم بیشترین حساسیت را نسبت به اعمال نویز داشتند. عضوهای شماره ۱۲ تا ۱۵ (تیرهای طبقه فوقانی)، شماره ۱۷ عضو اصلی (پایه سکو) متصل به عضو معیوب در طبقه اول و عضوهای شماره ۴۶ و ۴۸ اعضاء مهاری طبقات دوم و چهارم از حساسیت کم و عضوهای شماره ۷ و ۸ (تیرهای طبقه سوم)، عضوهای شماره ۲۸ و ۲۹ اعضاء اصلی طبقات چهارم و اول از حساسیت نسبتاً بیشتری برخوردار هستند. در کل مشاهده گردید اعضایی که به اعضاء معیوب متصل و یا نزدیک به آن‌ها واقع هستند، حساسیت بیشتری از خود در قبال افزایش نویز در داده‌های اندازه‌گیری‌شده نشان می‌دهند. مورد اخیر بیشتر در خصوص اعضاء اصلی (پایه سکو) صدق می‌کند.





شکل ۱۱- دیاگرام توزیع نویز اعمالی برای دو مقدار مختلف ضریب خطا :
(آ) $\gamma = 1\%$ (ب) $\gamma = 2\%$



شکل ۱۲- دیاگرام میانگین و انحراف معیار برای نتایج تشخیص عیب با روش مدل کاهشی گویان برای دو مقدار مختلف ضریب خطا : (آ) $\gamma = 1\%$ (ب) $\gamma = 2\%$

۷- نتیجه‌گیری

تمرکز این مقاله در راستای بروزرسانی ماتریس سختی در یک سکوی فولادی نوع جکت با هدف شناسائی آسیب‌های موجود در سازه مورد نظر با بهره‌گیری از اطلاعات مودی اندازه‌گیری‌شده در چند مود اول می‌باشد. روش حاضر (روش CMCM بهبود یافته) از مزایای هر دو روش مستقیم و تکرارشونده بهره می‌گیرد. در آن با

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.3.8]

دسترسی به تعداد کمی از پارامترهای مودال قابل استخراج، شناسائی آسیب‌های موجود در سازه عملی می‌گردد. در اجرای روش CMCM بهبود یافته، معیار تحلیل حساسیت اعمالی روی یک مدل فیزیکی سکوی فراساحلی و تعیین یک معیار مناسب در انتخاب درجات آزادی در مرحله اعمال روش کاهش مدل استفاده شده است، که منجر به همگرائی سریع‌تر آلگوریتم تکرار می‌شود. مهم‌تر این که از مدل المان محدود بروزرسانی شده و هم‌چنین از شکل مودهای منطبق بر فرکانس‌های تجربی در فرایند این روش پیشنهادی استفاده شده است. در نتیجه با بروزرسانی مدل المان محدود بر اساس مدل تجربی، تا حد امکان بر عدم قطعیت‌های موجود فائق آمده و از آن‌جایی که مسئله اصلی در تحلیل دینامیکی سازه‌ها، پرهزینه و زمان‌بر بودن محاسبات می‌باشد، بنابراین با استفاده از این روش، هم در زمان و هم در هزینه صرفه جویی خواهد شد. دقت و کارائی روش پیشنهادی با استفاده از مدل فیزیکی یک سازه فراساحلی نوع جکت مورد ارزیابی قرار گرفت. با بررسی نتایج به دست آمده ملاحظه گردید که با استفاده از روش ارائه شده، توسط ضرایب به دست آمده برای اصلاح ماتریس سختی می‌توان موقعیت و میزان آسیب وارده بر سازه را با کمترین اطلاعات موجود از سازه آسیب دیده در کمترین زمان، با هزینه پایین و با دقت بالا تخمین زد. برای داده‌های نویزدار این روش تا درصد قابل قبولی جواب می‌دهد. برای داده‌ای نویزدار اعضاء اصلی سازه بیشترین حساسیت را نسبت به نویز اعمالی نشان دادند. هم‌چنین در این تحقیق میزان حساسیت آلگوریتم تشخیص آسیب ناشی از حذف برخی حسگرهای موجود مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه منجر به این گردید که حسگرهای واقع در طبقات بالایی سکو از نظر عملکرد و تأثیرگذاری روی روند تشخیص آسیب بیشترین نقش را دارند.

کلید واژگان

1. Cross-model Cross-mode
2. Guyan
3. ANSYS
4. MATLAB
5. MASTER
6. SLAVE
7. SUBSTRUCTUR
8. Block Lanczos
9. Frequency Response Function
10. Experimental Modal Analysis
11. Operational Modal Analysis
12. Modal Assurance Criterion

۸ - مراجع

1- Grewal, G.S., Lee, M.K., (2004), *Strength of minimum structure platforms under ship impact*. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 126(4), p. 368-375.

2- Ewins, D.J., (2000), *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. Second ed. Research Studies Press Ltd.

3- Hu, S.L.J, Li H., Wang, S.H., (2007), *Cross-model cross-mode method for model updating*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, p. 1690-1703.

4- Cawley, P., Adams, R.D., (1979), *The location of defects in structures from measurement of natural frequencies*. Journal of Strain Analysis, Vol. 14 (2), p. 49-57.

5- Wang, S.Q., Li, H.J., (2012), *Assessment of structural damage using natural frequency changes*. Acta Mechanica Sinica, Vol. 28(1), p. 118-27.

6- Rytter, A., (1993), Vibration based inspection of civil engineering structures. PhD dissertation. Aalborg University, Denmark.

7- Kim, J.T., Stubbs, N., (1995), *Damage detection in offshore jacket structures from limited modal information*. Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 5 (1), p. 58-66.

8- Mangal, L., Idichandy, V.G., Ganapathy, C., (1996), *ART-based multiple neural networks for monitoring offshore platforms*. Applied Ocean Research, Vol. 18, p. 137-143.

9- Li, H., Yang, H., Hu, S.L.J., (2006), Modal *strain energy decomposition method for damage localization in 3D frame structures*. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 132 (9), p. 941-951.

10- Hu, S.L.J., Wang, S.Q., Li, H.J., (2006), *Cross modal strain energy for estimating damage severity*. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 132(4), p. 429-37.

11- Wang, S.Q., (2013), Iterative *modal strain energy method for damage severity estimation using frequency measurement*. Structural Control and Health Monitoring, Vol. 20(2), p. 230-40.

12- Li, H., Wang, J., Zhang, M., Hu, S.L.J.,(2006), *Damage detection in offshore jacket structures by cross-model cross-mode method*. Proceedings of the Seventh International Conference on Hydrodynamics. Naples, Italy, vol. 1, p. 171-178.

13- Law, S.S., Zhu, X.Q., (2009), *Damage Models and Algorithms For Assessment of Structures under Operating Conditions*. Taylor and Francis, CRC Press/Balkema, the Netherlands.

14- Jahn, H.A., (1948), *Improvement of an approximate set of latent roots and modal columns of a matrix by methods akin to those of classical perturbation theory*. Quarterly Journal of Mechanics and Appllied Mathematics, Vol.1, p. 132-144.

15- Lu, Z.R., Law, S.S., (2007), *Features of dynamic sensitivity and its application in damage detection*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 303. (1-2) p. 305-329

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.3.8]

16- Lu, Z.R., Law, S.S., (2007), *Identification of system parameters and input force from output only*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21 (5) p. 2099-2111.

17- Hutton, D.V., (2004), Fundamentals *of Finite Element Analysis*. McGraw-Hill, New York.

18- Guyan, R.J., (1965), *Reduction of stiffness and mass matrices*. AIAA Journal, Vol. 3(2), p. 380.

19- Fu, Z.H, He, J., (2001), Modal *Analysis*. Butterworth-Heinemann. oxford.

20- Tshilidzi, M., (2010), *Finite Element Model Updating Using Computational Intelligence Techniques*. Applications to Structural Dynamics. Heidelberg, Springer.

21- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunisik, A.C., (2011), *Finite element model updating effects on nonlinear seismic response of arch dam–reservoir–foundation systems*. Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 47, p. 85-97.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.3.8]