



سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی





نهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی

ICOPMAS 2010

10-8 آذر ماه (تهران)



سلامت سنجی سازه سکوهای ثابت فراساحلی با استفاده از بسط روشی غیر حساس به نامعینی توسط به هنگام درآوری مدل المان محدود و سیستم منطق فازی

علیرضا مجتهدی، دانشجوی دکتری، دانشگاه تبریز، concciv@yahoo.com

محمد علی لطف الهی یقین، دانشیار، دانشگاه تبریز، a_lotfolahi@yahoo.com

میر محمد اتفاق، استادیار، دانشگاه تبریز، ettefagh@tabrizu.ac.ir

علیرضا نقاشی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، naghashi_alireza87@ms.tabriz.ir

کلمات کلیدی: سازه فراساحلی، به هنگام درآوری مدل المان محدود، عیب یابی.

چکیده

سکوهای جکته فولادی از جمله سازه های مرسوم می باشند که در فعالیتهای فراساحلی مورد توجه قرار گرفته اند. مهمترین معیار در فرآیند نگهداری این سازه ها، نظیر هر سازه مهندسی دیگر، کسب اطمینان از عملکرد مطلوب در طی دوره عمر بهره برداری طراحی شده می باشد [1]. این تحقیق شامل بررسی تجربی بر روی یک مدل آزمایشگاهی سکوی ثابت فراساحلی می گردد که جهت بسط تکنیکی موثر برای فرآیند عیب یابی با حداقل حساسیت به نامعینی های محاسباتی و داده برداری های عملی، انجام می گیرد. بدین منظور، سیستم منطق فازی و تحلیل آماری برای انجام عیب یابی سراسری و رده بندی گفتاری عیوب، بسط داده می شوند.

1- مقدمه

در شش دهه اخیر، صنعت سازه های دریایی با سرعت بالایی پیشرفت نموده است. Wisch [2]، تاریخچه ای از 50 سال اخیر این صنعت تهیه نموده است. سکوهای فلزی از نوع جکته، از رایج ترین انواع سازه های فراساحلی می باشند که به طور گسترده ای برای استفاده در اهداف مختلف نظیر حفاری و انجام فعالیتهای فراساحلی بکار رفته اند. به عنوان مثال، تعداد زیادی از این نوع سازه ها در منطقه خلیج فارس که از منابع سرشار نفت و گاز بهره مند بوده و بیش از 40 درصد سوخت فسیلی جهان را تامین می کند، ساخته شده اند. اصل شاخص در نگهداری یک سازه فراساحلی، نظیر شرایط سایر سازه ها، کسب اطمینان از این است که سازه از عملکرد ایمن در طول عمر بهره برداری برخوردار می باشد. وقایع مصیبت بار اخیر در خلیج مکزیکو، اهمیت مسئله را در ارتباط با صنایع فراساحلی، بیشتر مشخص می کند.

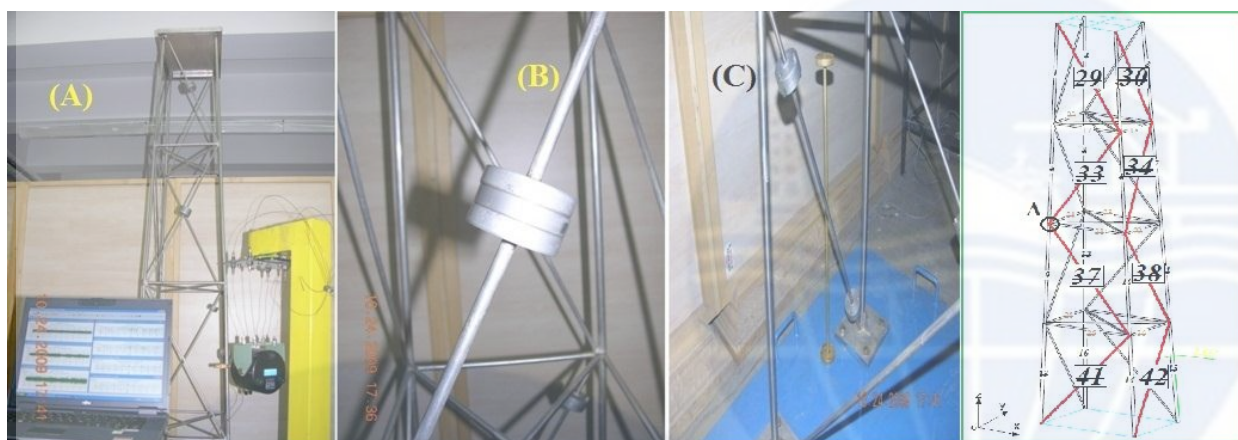
فرآیند سازه ای جهت کسب اطمینان از ایمنی آن امری اساسی است. این مسئله در ارتباط با سازه های فراساحلی از اهمیت بیشتری برخوردار است، چراکه بخش عمده ای از این سازه ها در زیر آب قرار دارد که بنابراین پروسه بازبینی آنها را دشوارتر می سازد. از سوی دیگر، این سازه ها در محیط نامالایم دریایی در معرض خطر آسیب های بیشتری می باشند [3]. در حال حاضر روشهای بسیاری جهت بازبینی و بررسی سازه ها وجود دارد [4]. قسمتی از این روشها، شامل انجام آزمایش برای بررسی وقوع تغییرات در فرکانسهای طبیعی و مدسکلهای سازه می گردد. Doebling et al. [1]، بررسی جامعی از پیشینه کارها و ادبیات فن روشهای شناسایی سیستم بر اساس رفتار ارتعاشی سازه، منتشر نموده اند. از سوی دیگر، در میان روشهای عیب یابی بر اساس رفتار ارتعاشی، آنهایی که بر اساس به روز درآوری پارامترهای مدل عددی سازه ای می باشند، قابل تبدیل به مسئله بهینه سازی مقید هستند [5]. در دو دهه اخیر، بخش عمده ای از تحقیقات مرتبط با روشهای سلامت سنجی سازه ای بر اساس ثبت داده، استخراج مشخصه و تکنیکهای کاهش داده ای، انجام گرفته اند.

پس از مرور مختصر پیشینه کاری که در بالا ارائه گردید، چهارچوب اصلی این تحقیق به صورتی که در ادامه می آید، قابل بیان می باشد: در بخش 2، مدل فیزیکی، ابزار بندی آن و نحوه انجام آزمایشهای تجربی شرح داده می شود، آنالیز مودال عددی و تجربی مدل مربوطه در بخش 3 توضیح داده می شود، در بخش 4، به روز درآوری مدل المان محدود و کاربرد مدل المان محدود مینا برای اهداف این مطالعه (عیب یابی)

بررسی می‌گردد، در بخش 5، به الگوریتم مورد نظر برای فرآیند عیب‌یابی و ساختار سیستم منطق فازی اشاره می‌شود، نهایتاً بحث و نتایج در بخش 6 و 7 بیان می‌شوند.

2- مدل فیزیکی و شرح آزمایشهای تجربی

در این مطالعه، یک مدل آزمایشگاهی به منظور انجام آزمایشهای تجربی در آزمایشگاه ارتعاشات و آنالیز مودال جهت بررسی روش ارائه شده عیب‌یابی، ساخته شده است. مدل فیزیکی این تحقیق، یک مدل سکوی فراساحلی جکتی می‌باشد که بر اساس مشخصات و ابعاد پیشنهادی توسط [6] ساخته و آزمایشها به صورت نشان داده شده در (شکل 1)، در آزمایشگاه ارتعاشات و آنالیز مودال دانشکده مکانیک دانشگاه تبریز انجام گرفته است. این مدل از لوله های استیل زنگ نزن (ST304) تهیه و اجزای آن توسط جوش آرگون به هم متصل شده اند. شکل کلی این مدل، به صورت یک قاب فضایی با چهار پایه اصلی می‌باشد که به یک عرشه که از صفحه استیل با ضخامت 20 میلی متر ساخته گردیده، به صورت نشان داده شده در شکل (A-1) جوش شده است. قاب مدل دارای اعضای مهاربندی افقی و قائم در هر طبقه می‌باشد. هر انتهای پایه‌های اصلی این مدل، به یک صفحه مربعی شکل با ابعاد 100 در 100 میلی متر جوش شده است که این صفحات به یک صفحه فولادی سنگین پیچ گردیده اند.



شکل 1 (A): ابزار بندی آزمایش مودال، B&C: سناریوهای عیبوب تجربی

به منظور بررسی تجربی کارایی روش پیشنهادی، برخی از اعضای مدل فیزیکی به گونه ای قابل تعویض ساخته شدند که بتوان سناریوهای عیب را با آن تعریف نمود (شکل B-1 و C-1). این سناریوها در دو حالت کلی قابل اعمال می‌باشند. در حالت اول، با در آوردن قطعه فلزی تعبیه شده در وسط عضو (که به منظور سبکی و تاثیر کم در رفتار دینامیکی سازه، از آلومینیوم ساخته شده بود) حالت خرابی از بین رفتن کامل عضو، شبیه سازی می‌گردید. در حالت دیگر، برخی از اعضای سازه به شکل قابل تعویض با عضوهایی از مصالح دیگر (شامل آلومینیوم، مس و برنج که سختی متفاوت نسبت به استیل دارند) ساخته شدند.

ارتعاش اجباری با استفاده از یک محرک الکترو دینامیکی (نوع Bruel & Kjaer 4809، دانمارک) اعمال یافت. ابزار بندی آزمایش شامل یک شتاب سنج تک محوره سبک (4508 B & K) بوده و سیگنالهای خروجی در نرم افزار PULS گردآوری گردیده است.

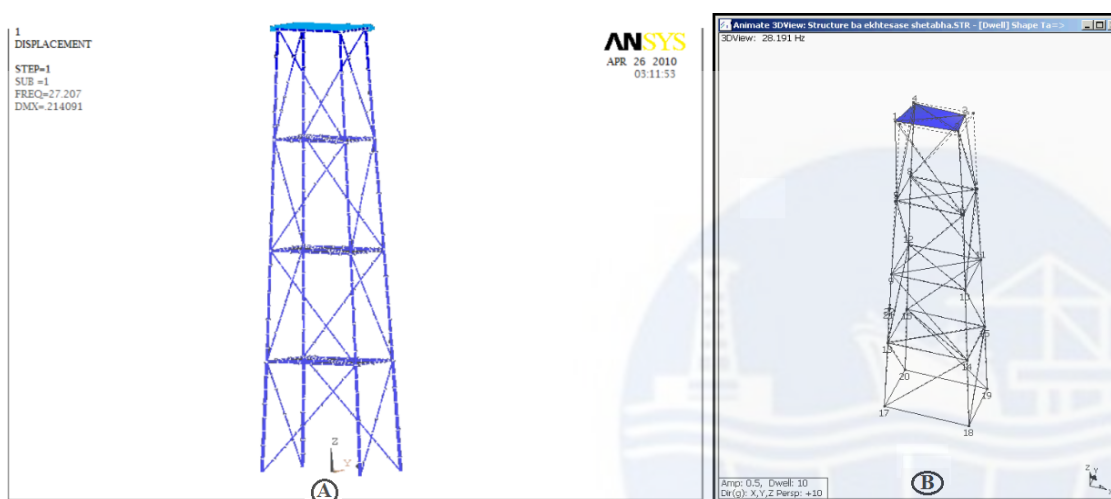
3- تحلیل مودال عددی و تجربی مدل

مدل المان محدود "اولیه" الاستیک سه بعدی با توجه به مشخصات مدل فیزیکی مذکور، به منظور آنالیز مودال و بدست آوردن خصوصیات دینامیکی عددی مدل، با استفاده از نرم افزار ANSYS تهیه گردیده است. در اینجا منظور از عبارت "اولیه" این است که این مدل المان محدود به علت نامطمئنای های مختلف ممکن است کاملاً صحیح نباشد و در واقع این مدل مبنایی برای انجام به روز درآوری عددی می‌باشد. مقدار عددی خصوصیات مواد و شرایط مرزی برای سازه های مهندسی نظیر مدل مربوط به این تحقیق، جنبه های بسیار مهمی می‌باشند. در این سازه، مدول الاستیسیته تمامی اعضا، نسبت پواسون و مقدار جرم در واحد حجم اولیه به ترتیب 207 GPa، 0/3 و 7850 Kg/m³ در نظر گرفته شدند. از سختی اعضای فنی در اتصال پایه سازه به ورق زیر صفحه، می‌توان به عنوان پارامتری تعدیلی در فرآیند به روز درآوری استفاده نمود. پایه های مدل با المان PIPE59 و عرشه با المان SHELL63 مدل گردیدند. به منظور در نظر گرفتن تاثیر اعضای تعبیه شده برای شبیه سازی عیب بر روی مدل فیزیکی، بر روی مدل عددی، جرمهای متمرکز با المان MASS21 دقیقاً مطابق با وزن و موقعیت هندسی آنها، در نظر گرفته شدند.

معادله دیفرانسیلی ماتریسی مرتبه دوم حرکت یک سیستم با چند درجه آزادی به صورت زیر قابل بیان می‌باشد:

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t) \quad (1)$$

که در اینجا M ، C و K به ترتیب نشان دهنده ماتریس جرم، ماتریس استهلاک و ماتریس سختی می‌باشند. متناظرا $X(t)$ ، $\dot{X}(t)$ و $\ddot{X}(t)$ بردارهای جابه جایی، سرعت و شتاب می‌باشند. حل معادله فوق با مساوی صفر قرار دادن سمت راست آن و در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب، فرکانسهای طبیعی متناظر با درجه آزادی سیستم را بدست می‌دهد. شکلهای تغییر یافته سازه که بازتابی از فرکانسهای طبیعی مربوطه می‌باشند، به عنوان مد شکلهای سازه شناخته می‌شوند. در این مطالعه، بعد از پردازش داده ها، با استفاده از نرم افزار ME³scopeTM [7] داده های مودال تجربی نیز بدست آمده اند. نتایج مربوطه برای مد اول در (شکل 2) آورده شده است.



شکل 2) مد شکل اول با استفاده از A: تحلیل مودال عددی، B: تحلیل مودال تجربی

4- به روز درآوری و بسط مدل مبنای المان محدود

Modak et al. [8]، مدل‌های سازه ای را با استفاده از روشهای به روز درآوری و در فرکانسهای بالاتر و پایین تر بررسی نمودند و نشان دادند که مدهای بالاتر در عمل چندان قابل اعتماد نیستند، چراکه با مقدار انرژی کافی تحریک نمی‌شوند. در این مطالعه، تنها چهار فرکانس طبیعی اول برای مسئله به روز در آوری، مورد استفاده قرار گرفتند. چهار فرکانس اول حاصل از آزمایش و نسبت ξ مربوطه در (جدول 1) نشان داده شده‌اند.

جدول 1) چهار فرکانس طبیعی اول و نسبت استهلاک بدست آمده توسط روش OMAX

	1 st	2 nd	3 rd	4 th
Frequency (Hz)	27.332	36.416	81.021	103.228
نسبت استهلاک	0.253%	0.465%	0.099%	0.253%

در تحقیق حاضر، مسئله به روز درآوری با در نظر گرفتن خصوصیات اولیه مواد و تعدیل فنرهای تکیه گاهی انجام گرفت. چهار مود اول که صریحا شناسایی شده‌اند، به عنوان پارامترهای هدف مقایسه انتخاب گردیدند و مدل المان محدود بعد از چند مرحله تلاش، با توجه به نتایج تجربی و براساس پارامتر مرسوم (Modal Assurance Criterion (MAC)) [9] به روز درآوری گردید.

5- عیب یابی با استفاده از سیستم منطق فازی

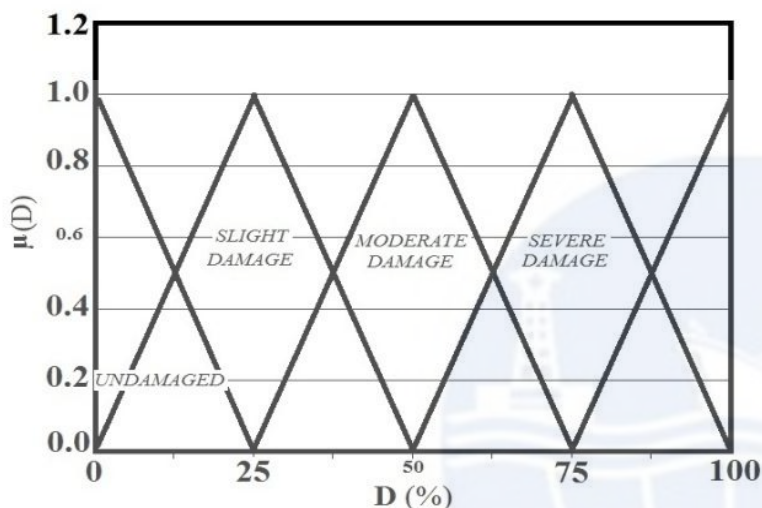
در عمل و در استفاده از روشهای عیب یابی سرتاسری، نیازی به مکان یابی عیب با دقتی در حدود میلی متر نمی‌باشد. هزینه های مورد نیاز برای این امر، این مسئله را غیر توجیهی می‌نماید. بنابراین کافی است که ابتدا حدود شرایط عیب تشخیص داده شود و آنگاه با استفاده از روشهای کنترل غیر مخرب مکانی، محل دقیق تعیین گردد. در این مطالعه، پارامتر درصد عیب به صورت زیر تعریف می‌گردد [9]:

$$D = 100 \frac{E_{undamaged} - E_{damaged}}{E_{undamaged}} ; \quad E: \text{Young's modulus} \quad (2)$$

همچنین، شدت عیب با عبارات "ناچیز، میانه و شدید" رده بندی می‌گردد. شاخص سیستم که با عنوان "دلتهای سنجش (MD) ساخته می‌شود، عبارت است از:

$$\Delta\omega = 100 \frac{\omega_{undamaged} - \omega_{damaged}}{\omega_{undamaged}} ; \omega: \text{frequency} \quad (3)$$

یک سیستم منطق فازی (FLS) از مفاهیم منطق فازی (FL) به عنوان مبنایی برای توصیف سیستم و اندرکنش بین متغیرهای آن استفاده می‌نماید. موقعیتهای مختلف عیوب و ترازهای عیب، رشته های مختلف $\Delta\omega$ را بدست می‌دهند که در این تحقیق از آنها برای ایجاد پایگاه داده‌ای قاعده فازی استفاده می‌شود. خروجی رشته های فازی که در عباراتی از تابع عضویت مثلثی بیان می‌شوند، در (شکل 3) نشان داده شده است [10]:



شکل 3) تابع عضویت مثلثی ترازهای عیب (0-100%)

ورودیهای FLS شامل MD و خروجیهای آن، مکان و شدت عیب می‌باشند. اگر مشخصه های عیب یابی (features) با \mathbf{z} و اعضای مورد نظر محتمل بالقوه برای خراب شدگی با \mathbf{x} نشان داده شوند، هدف بدست آوردن نگاشت بین \mathbf{x} و \mathbf{z} می‌باشد، به طوریکه:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \{M29, M30, M33, M34, M37, M38, M41, M42\}^T; \\ \mathbf{z} &= \{\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \dots, \Delta\omega_d\}^T \end{aligned} \quad (4)$$

پارامتر d یک پارامتر قابل تعریف توسط کاربر و برابر تعداد دلتهای سنجش (در اینجا $d=4$) می‌باشد. استفاده از چنین روشی در طبقه بندی گفتاری عیب، برای انجام اهداف نگهداری بسیار مفید می‌باشد. توضیح مختصری از روش سیستم فازی بکار رفته در این تحقیق در زیر ارائه شده است، برای مطالعه جزئیات بیشتر به [10] ارجاع داده می‌شود.

5-1- نامطمئنی مدلسازی

نامطمئنی های موجود در طی اندازه گیری های تجربی، شامل نویزهای حسگرها و خطاهای اندازه گیری می‌باشند. در این مطالعه، جهت مدل کردن نامعینی در MD ها از نویز با توزیع گاسین به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\Delta\omega_{noisy} = \Delta\omega_{random}(1 + u\alpha) \quad (5)$$

که در اینجا u عدد توزیع گاسین تصادفی و α یک پارامتر تراز نویز می‌باشد.

5-2- Fuzzification

موقعیت اعضای معیوب به شکل اعداد خشک نظیر M29، M30 و غیره بیان می‌شود. تراز عیب در هر عضو با عبارت عیب "ناچیز، عیب میانه و عیب شدید" کلاس بندی می‌شوند (شکل 3). متغیرهای گفتاری به شرایط مختلف محتمل برای اعداد خشک مربوطه، تجزیه می‌گردند. به عنوان نمونه، در حالت M29، آنرا می‌توان شامل {شدید، میانه، ناچیز} در نظر گرفت. متغیرهای ورودی به صورت توابع عضویت گاسین به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$P(\Delta\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-0.5\left(\frac{\Delta\omega - m}{\sigma}\right)^2}$$

(6)

که در آن، m نقطه میانی رشته فازی و σ انحراف استاندارد می‌باشند که تأثیرات نامطمئنی را در عملکرد FLS وارد می‌نمایند. میانه و انحراف استاندارد، بر اساس الگوریتمهای مختلف برای بیشینه نمودن نرخ موفقیت (SR) به گونه ای که در بخش بعدی (5-3-1) توضیح داده خواهد شد، بدست می‌آیند.

5-3-3- تولید قاعده فازی و تفکیک عیوب

در این تحقیق روش استفاده از دو تکنیک مختلف تفکیک عیوب (شامل پنجره لغزشی و استفاده از بالاترین درجه عضویت [10]) برای مورد مطالعاتی مفروض، بررسی و مقایسه می‌شوند. توضیح مختصری از آنها در زیر ارائه شده است و نهایتاً نتایج مربوطه در بخش بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

5-3-1- روش اول: بالاترین درجه عضویت در تفکیک عیب

در این روش به عنوان گام اول، درجه عضویت MD ها متناظر با یک عیب سازه ای داده شده (معادله 6) بدست می‌آید، حدس اولیه برای σ به گونه ای که در بخش 5-2 شرح داده شد در نظر گرفته می‌شود و آنگاه با استفاده از یک حلقه برای بیشینه کردن نرخ موفقیت در تفکیک عیب تغییر می‌یابد. نرخ موفقیت برای یک عیب معین، به صورت نسبت دفعات موفقیت تشخیص آن عیب بر تعداد دفعاتی که MD مربوطه نویزی شده اند، تعریف می‌گردد. در هر کلاس عیب، قاعده ها با مربوط کردن d تعداد از MD های متناظر بر اساس توابع عضویت (که با $A_{ij}; i=1, 2, \dots, M \& j=1, 2, \dots, d$ نشان داده می‌شود که M تعداد عیوب محتمل بر اساس سناریوهای عیب می‌باشد) بدست می‌آیند. درجه عضویت قاعده i ام به صورت زیر بیان می‌شود:

$$D^i = \prod_{j=1}^d \mu_{ji}$$

(7)

که در آن، μ_{ji} درجه عضویت برای j امین MD می‌باشد. به منظور تشخیص عیب و جداسازی درجه های عضویت، عیب با بالاترین مقدار تابع درجه عضویت، به عنوان محتمل ترین حالت معیوبیت در نظر گرفته می‌شود.

5-3-2- روش دوم: پنجره لغزشی در تفکیک عیب

روش دوم نیز تغییر پذیری محتمل MD ها را بر روی رشته های فازی، رهگیری می‌کند. این روش به طور خلاصه به صورتیکه در ادامه می‌آید استفاده می‌گردد: برای یک شرایط معین عیب، رشته های فازی به MD های نویزی (که به صورت $\Delta\Omega = \{(\Delta\omega_1)_{noisy}, (\Delta\omega_2)_{noisy}, \dots, (\Delta\omega_d)_{noisy}\}^T$ بیان می‌گردند) اختصاص داده می‌شوند. اگر مطابقتی با هیچ کدام از قاعده‌ها (پایگاه داده ای FLS به شکلی که در (جدول 4) و بر اساس نمادهای (جدول 2) لیست شده است) وجود نداشته باشد، آنگاه الگوریتم پنجره لغزشی با کنترل رشته های پایگاه داده ای فازی با حداکثر بازه حرکتی (L) مساوی با تفاضل نقاط میانی دو رشته فازی متناظر (در این مطالعه $L = 2/5$) ادامه می‌یابد. به عنوان قدم اول از یک فرآیند تکرار شونده، $\Delta\Omega$ به $\Delta\Omega - L/2$ تغییر می‌یابد و سپس رشته های فازی به منظور تخمین درجه عضویت بیشینه، به فرکانسهای تغییر یافته اختصاص داده می‌شوند. MD های تغییر یافته، با پایگاه داده ای فازی مقایسه می‌گردند و اگر تطابقی با هر کدام از قاعده های فازی (hit) مشاهده گردد، به عنوان یک حالت عیب تعریف شده و هر بار توسط یک متغیر شمرده می‌گردد. در قدم بعدی، $\Delta\Omega^i$ به صورت افزایش پله ای به $\Delta\Omega^0 + i.\beta$ تغییر می‌یابد (β برابر است با L/n که n عدد تنظیم رهگیری بر روی رشته های فازی است که با توجه به دو عامل حداکثر نمودن درجه جداسازی و همچنین زمانبری محاسباتی، انتخاب می‌گردد). فرآیند تا هنگام حصول مقدار $\Delta\Omega^0 = \Delta\Omega + L/2$ ادامه می‌یابد و در هر مرحله وقوع هر hit در تشخیص یک عیب، شمرده می‌شود. در نهایت، عیبی که برای آن بیشترین hit شمرده شده است، به عنوان عیب محتمل در نظر گرفته می‌شود.

جدول 2) MD های بیان شده بر اساس نمادهای گفتاری بر مبنای رشته های فازی گاسین

Linguistic measure	Symbol	Midpoint $\Delta\omega$
Negligible	N	Less than 0.05
Very Low	VL	2.5
Low	L	5

Archive of	Medium Low	ML	7.5
	Medium	M	10

6- بحث و نتایج

فرکانسهای طبیعی بدست آمده از مدل عددی در حالت قبل و بعد از فرآیند به روز درآوری مدل المان محدود و روش OMAX در (جدول 3) آورده شده اند.

جدول 3) به روز درآوری مدل و 4 مود طبیعی اول

Natural Frequency	OMAX (Hz)	Before FEMU (Hz)	After FEMU (Hz)
1	27.332	28.191	27.207
2	36.416	37.653	36.242
3	81.021	81.359	80.917
4	103.228	104.353	103.16

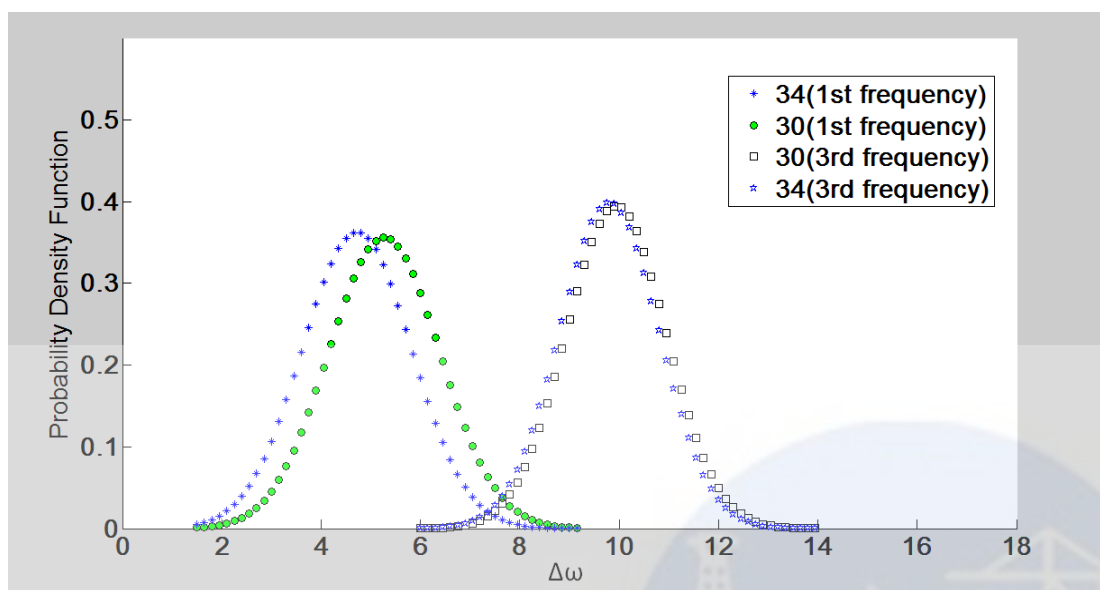
از آنجاییکه نتایج تجربی و نتایج بدست آمده از به روز درآوری مدل المان محدود، با یکدیگر همسانی مناسبی دارند، بنابراین از نتایج مدل المان محدود می توان به منظور آموزش الگوریتم عیب یابی استفاده نمود.

در این تحقیق، MDها (متغیرهای فازی) توسط مدل به روز در آوری شده با بازه های 5 درصد افزایش درصد عیب، (D بین 0 تا 87 درصد) محاسبه شده اند. این فرآیند برای 8 عضو بادی قائم به عنوان اعضای محتمل معیوبیت، از 12/5 تا 37/5 درصد (متناظر با عیب ناچیز)، 37/5 تا 62/5 درصد (متناظر با عیب میانه) و 62/5 تا 87/5 درصد (متناظر با عیب شدید) انجام گرفت. برای هر متغیر فازی، تابع عضویت با محاسبه میانه و انحراف معیار بر روی ترکیب پارامترهای D محاسبه شده برای هر تراز عیب، بدست آمدند (مقادیر در (جدول 4) نشان داده شده اند).

جدول 4) نتایج برای 4 فرکانس اول براساس روشهای تفکیک عیب

Rule Number	Faults	Mean (standard deviation)				Gaussian Fuzzy Sets			
		$\Delta\omega_1$	$\Delta\omega_2$	$\Delta\omega_3$	$\Delta\omega_4$	$\Delta\omega_1$	$\Delta\omega_2$	$\Delta\omega_3$	$\Delta\omega_4$
1	Slight Damage at 29	0.007(1)	1.262(0.5)	7.485(1.1)	0.009(1)	N	VL	M	VL
2	Slight Damage at 30	1.24(0.5)	0.008(1)	0.198(1.1)	0.267(1.1)	VL	N	VL	VL
3	Slight Damage at 33	0.003(1)	1.109(0.5)	0.273(1.5)	0.174(1.1)	N	VL	VL	VL
4	Slight Damage at 34	1.039(0.4)	0.005(1)	1.914(1.2)	0.321(1.1)	VL	N	VL	VL
5	Slight Damage at 37	0.002(1)	0.931(0.4)	0.189(1)	0.172(0.2)	N	VL	VL	VL
6	Slight Damage at 38	0.821(0.4)	0.001(1)	4.255(1.6)	0.312(1.1)	VL	N	ML	VL
7	Slight Damage at 41	0.001(1.1)	0.73(0.3)	0.183(1)	0.017(1)	N	VL	VL	N
8	Slight Damage at 42	0.614(0.3)	0.002(0.6)	5.938(1.6)	0.509(0.2)	VL	N	ML	VL
9	Moderate Damage at 29	0.021(1)	2.902(0.7)	9.485(0.9)	0.017(1)	N	L	MH	N
10	Moderate Damage at 30	2.908(0.7)	0.025(1)	5.415(1.3)	0.606(0.5)	L	N	ML	VL
11	Moderate Damage at 33	0.0102(1)	2.608(0.7)	0.333(1.1)	0.325(0.5)	N	L	VL	VL
12	Moderate Damage at 34	2.493(0.7)	0.012(1)	8.688(1.5)	0.554(1.1)	L	N	MH	VL
13	Moderate Damage at 37	0.002(1)	2.197(0.6)	0.193(1)	0.329(1.1)	N	L	VL	VL
14	Moderate Damage at 38	1.986(0.5)	0.004(1)	9.789(0.2)	0.647(0.2)	L	N	MH	VL
15	Moderate Damage at 41	0.003(1)	1.712(0.4)	0.183(1)	0.04(1.2)	N	VL	VL	N
16	Moderate Damage at 42	1.484(0.4)	0.003(1)	9.915(1)	1.281(0.3)	VL	N	MH	L
17	Severe Damage at 29	0.056(1.2)	5.172(1.1)	9.673(1.1)	0.031(1)	N	ML	MH	N
18	Severe Damage at 30	5.269(1.1)	0.07(0.3)	9.923(1.1)	1.099(0.2)	ML	VL	MH	VL
19	Severe Damage at 33	0.029(1)	4.802(1.1)	0.38(0.2)	0.48(1.1)	N	ML	VL	VL
20	Severe Damage at 34	4.721(1.2)	0.034(1)	9.905(0.3)	0.781(0.6)	ML	N	MH	VL
21	Severe Damage at 37	0.01(1)	4.066(0.9)	0.198(1)	0.69(0.4)	N	ML	VL	VL
22	Severe Damage at 38	3.81(0.9)	0.011(1)	9.923(1)	1.105(0.2)	L	N	MH	VL
23	Severe Damage at 41	0.001(1)	3.301(0.9)	0.184(1)	1.424(1.3)	N	L	VL	VL
24	Severe Damage at 42	2.839(0.6)	0.001(1.1)	9.927(1)	2.51(0.6)	L	N	MH	L

داده های حاصله (قاعده‌ها) در شرایط مختلفی که برای روش دوم جداسازی عیب استفاده شده اند، در (جدول 4) ارائه شده اند. (شکل 4) توابع چگالی MD ها را برای دو حالت مربوط به عضو 30 و 34 با هم مقایسه می‌کند.



شکل 4) توابع چگالی MD ها برای عضو 30 و 34

پایگاه داده در (جدول 4) و دیگرامهای (شکل 4) نشان دهنده احتمال شدید همپوشانی بین شاخصهای عیب، به خصوص در قاعده های مرتبط با تراز عیب یکسان در دو عضو مجاور می‌باشند (به عنوان نمونه، رشته های فازی در ردیف 2 را با ردیف 4 و ردیف 3 را با ردیف 5، در (جدول 4) مقایسه نمایید). بنابراین، این نکته قابل انتظار است که روش دوم در تفکیک عیب در کلاسهای عیب یک سازه نظیر سازه جکتی در تحقیق حاضر، ناموفق باشد. این نتیجه در تضاد با نتیجه ای است که [10] برای سازه های تیری شکل بدست آورده است. در آن حالت، الگوریتم روش دوم نسبت به روش اول از قابلیت بیشتری برای عیب یابی در مدل المان محدود سازه تیرکنسولی برخوردار بود. در قدم نهایی این تحقیق، کارآیی روش پیشنهادی، به صورت تجربی توسط مدل فیزیکی مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که قبلا هم اشاره گردید، سناریوهای عیب مختلفی (به شکل کاهش سختی) با تعویض برخی اعضا، قابل تعبیه بر روی مدل فیزیکی، پیش بینی گردیده بود. (جدول 5) اطلاعات مربوط به سناریوها، شامل شماره اعضا، مصالح تعویضی، سختی مربوطه و پارامتر درصد عیب را ارائه می‌دهد.

جدول 5) سناریوهای عیوب تجربی برای اعتبارسنجی روش بالاترین درجه عضویت در تفکیک عیب

Member number	Substitute material	D (%)	damage location	damage severity
42	Copper	41(moderate)	Successful	Successful
29	Copper	41(moderate)	successful	Unsuccessful
42	Aluminum	65 (severe)	Successful	Successful
33	Eliminating	100 (catastrophic)	Successful	Successful

ستون آخر (جدول 5) گویای کارآیی روش در شناسایی عیب و تعیین شدت آن برای مدل این مطالعه می باشد. تنها استثنا، مربوط به صحت تعیین شدت عیب در عضو 29 می‌باشد.

7- نتایج

یک مدل فیزیکی سکوی جکتی به منظور ارزیابی تجربی یک روش فرابینی با استفاده از پارامترهای مودال بدست آمده از رفتار ارتعاشی سازه، مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور، یک مدل المان محدود مینا با استفاده از تحلیل مودال عددی و به هنگام درآوری، بسط داده شد. بازتاب نامطمئنی ها بر روی نتایج حاصل، به عنوان چشم اندازی در این تحقیق در نظر گرفته شد. نتایج زیر بر اساس مشاهدات حاصل از این تحقیق، قابل بیان می‌باشند:

4 فرکانس طبیعی اول که از تحلیل مودال تجربی بدست آمده اند به ترتیب عبارتند از 27/332، 36/416، 81/021 و 103/223. از تشخیص فرکانسهای متناظر در مدل المان محدود، با استفاده از شاخص MAC قابل به روز درآوری می‌باشند. در راستای این هدف، پارامترهای مودول الاستیسیته به عنوان عامل بسیار موثر مشاهده گردید. در تضاد با حالت تیر گیردار که روش پنجره لغزشی برای عیب یابی آن کارایی بیشتری دارد، در حالت مورد مطالعاتی این تحقیق، نه تنها این مسئله برقرار نیست بلکه این روش اصلاً دارای کارایی نمی‌باشد. دلیل این نکته را می‌توان به وجود احتمال زیاد همپوشانی بین شاخصهای عیب، به خصوص در قاعده های مربوط به ترازهای عیب در اعضای سازه‌ای که از نظر مکانی در مجاورت هم هستند، ارتباط داد. در بررسی تجربی روش مطرح شده، کارایی آن در تشخیص موقعیت عیب و شدت آن، موفق ارزیابی گردید. تنها در حالت تشخیص شدت عیب در عضو 29 که کوچکترین عضو در بالاترین طبقه می باشد و تاثیر کمتری در رفتار کلی دینامیکی سازه دارد، این موضوع نقض گردید. مطمئناً، با افزایش تعداد حسگرها در طول فرآیند فرآینبی، دقت این روش از افزایش بیشتری برخوردار می‌گردد.

مراجع

- [1] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, (1998), A summary review of vibration based damage identification methods, *J. Shock Vibration Digest* 30, 91–105.
- [2] DJ. Wisch, Fixed steel offshore structure design – past, present & future. In: Offshore technology conference; Houston, Texas, 4–7 May (1998), 317–23.
- [3] J.M. Nichols, (2003), Structural health monitoring of offshore structures using ambient excitation, *J. Applied Ocean Research* 25, 101–114.
- [4] J. E. Doherty, A. S. Kobayashi (Ed.), (1987), Handbook on Experimental Mechanics in Non-destructive evaluation, Society for Experimental Mechanics, Inc., chapter 12.
- [5] A. Esfandiari, F. Bakhtiari-Nejad, M. Sanayei, A. Rahai, (2010), Structural finite element model updating using transfer function data, *J. Computers and Structures* 88, 54–64.
- [6] Huajun Li, Shuqing Wang, Hezhen Yang, Modal Strain Energy Decomposition Method for Damage Detection of an Offshore Structure Using Modal Testing Information, Third Chinese German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering National Cheng Kung University, Tainan (November 8-16, 2006).
- [7] ME'scope™, vibrant technology, Inc. Visual modal pro (vt-550), version: 2.0.0.21 security key: 10388, 2001.
- [8] S.V. Modak, T. K. Kundra, B. C. Nakra, (2002), Prediction of dynamic characteristics using updated finite element models. *J Sound and Vibration* 254, 447–467.
- [9] D. J. Ewins, (2000), Modal Testing: Theory, Practice and Application, second edition, Research Studies Press LTD.
- [10] M. Chandrashekhar, R. Ganguli, (2009), Uncertainty handling in structural damage detection using fuzzy logic and probabilistic simulation, *J. Mechanical Systems and Signal Processing* 23, 384– 404.