



عیب‌یابی سازه‌های تیر مانند با استفاده از بروزرسانی مدل تقلیل یافته و روش تکرار

میر محمد اتفاق^۱، حسین اکبری^۲

^۱ استادیار، دانشکده فنی مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز

^۲ فارغ التحصیل مقطع کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۴/۳۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۷/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۰۷

چکیده

امروزه عیب‌یابی سازه‌های مهندسی با استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی به منظور تشخیص زود هنگام عیوب ایجاد شده در سازه هنگام کارکرد معمول یا بعد از حوادثی نظیر زلزله، از اهمیت ویژه‌ای در پژوهش‌های دانشگاهی و صنعتی برخوردار است. از میان روش‌های زیادی که برای عیب‌یابی سازه‌ها پیشنهاد گردیده است، روش‌های مبتنی بر بروزرسانی مدل المان محدود سازه با استفاده از داده‌های آنالیز مودال به علت کاربردی بودن این روش در عمل، از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش، سرعت و دقت عیب‌یابی با استفاده از روش تکرار جدید بر پایه مدل بروزرسانی و مدل تقلیل‌یافته، افزایش داده می‌شود. همچنین به منظور بررسی قابلیت این روش در عیب‌یابی، ابتدا روش مذکور در MATLAB روی مدل المان محدود تیر معیوب شبیه‌سازی شده و اثرات نویز روی دقت روش به صورت مبسوط به کمک روش مونت-کارلو، مورد مطالعه قرار می‌گیرد؛ سپس نتایج روش عیب‌یابی پیشنهادی با نتایج متناظر با روش عیب‌یابی موجود در ادبیات فن مورد مقایسه قرار گرفته، نشان داده می‌شود که سرعت و دقت عیب‌یابی روش پیشنهادی به مراتب بیشتر است، همچنین به منظور بررسی قابلیت عیب‌یابی این روش به صورت عملی، روش مذکور را بر روی یک تیر آزمایشگاهی پیاده کرده، نتایج عیب‌یابی بررسی می‌شود. نتایج حاصل، نشان‌دهنده دقت و سرعت بالای روش پیشنهادی، نسبت به سایر روش‌های موجود در ادبیات فن است.

کلمات کلیدی: عیب‌یابی سازه؛ آنالیز مودال؛ بروز رسانی؛ تقلیل مدل.

Damage diagnosis of the beam-like structures using recued model updating and iterative method

Mir Mohammad Etefagh¹, Hossein Akbari²

¹Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
(Corresponding author, E-mail: etefagh@tabrizu.ac.ir)

²MSc of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract:

Nowadays, damage diagnosis of the engineering structures, applying vibration signal for early damage identifying during normal operation of the structure or after some disasters such as earthquake are very important from academic and technology viewpoints. Among different methods, proposed for damage diagnosis of the structures, the methods, based on FE model updating using modal analysis features are very important because of its practicability. In this paper one of the new model updating methods, which is lately proposed and proved to be accurate and fast, are applied for designing a damage diagnosis method. As a case study, a simulated and experimental beam, has been considered with artificial damage for studying the proposed methods' abilities and the noise effects on the proposed method. The results show that the proposed method are more accurate and fast than previous methods.

Keywords: Structural Damage Diagnosis; Modal Analysis; Model Updating; Model Reduction

۱- مقدمه

عیب‌یابی سازه‌ها در سنجش شرایط و کارایی زیر بناهای موجود ضروری است. به‌عنوان نمونه، بازرسی‌های بصری برای شناسایی عیب‌های پنهان به‌کار می‌رود؛ اما برای سازه‌های عظیم و پیچیده مانند، پل‌ها بررسی بصری موثر نیست؛ بنابراین نتایج بررسی بصری، فردی بوده، وابسته به علم و تجربه فرد بررسی‌کننده دارد. به همین دلیل، عیب‌یابی به کمک سیگنال‌های ارتعاشی، به‌طور فزاینده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است [۱]. عیب‌یابی به کمک ارتعاشات به دو دسته بر پایه مدل (مانند مدل المان محدود) و بدون مدل تقسیم می‌شود [۲-۵]. در دسته اول، نیازی به مدل شبیه‌سازی شده کامپیوتری نیست. در آنها می‌توان محل عیب را یافت؛ اما شدت عیب که اطلاعات ضروری برای بررسی پایداری سازه است، قابل تشخیص نیست. دسته دوم، نیازمند مدل شبیه‌سازی شده کامپیوتری است و قادر است شدت عیب را نیز، مورد بررسی قرار دهد. در این دسته، معمولاً از مدل المان محدود برورسانی شده استفاده می‌شود. اساس روش‌های پایه‌مدل المان، محدود بر این است که پارامترهای ارتعاشی سازه واقعی از طریق آنالیز مودال استخراج شده، این پارامترها با پارامترهای استخراجی از طریق مدل سازه مقایسه می‌شود. با تغییر پارامترهای تعریف‌کننده عیب مدل‌سازی شده در مدل المان محدود سازه، می‌توان تفاوت مشخصه‌های دینامیکی استخراجی از طریق آنالیز مودال و مدل را با استفاده از روش‌هایی مانند، روش تکرار به کمترین مقدار خود رساند و به این نحو، وجود محل و حتی شدت عیب را در سازه پیش‌بینی کرد؛ بنابراین برای پیش‌بینی صحیح مشخصات دینامیکی، مدل المان محدود دقیق سازه‌های مهندسی آنها نیاز است. مدل المان محدود، ممکن است دقیق نباشد بخصوص در سازه‌های پیچیده که نیازمند مدل‌سازی مفصل‌ها، میراکننده‌ها و شرایط مرزی هستند؛ بنابراین باید به کمک مدل واقعی سازه سالم بروز شود [۶]. از طرف دیگر، بدست آوردن تمام اطلاعات مودها بصورت تجربی، غیرممکن است و درجات آزادی مدل المان محدود، بسیار بیشتر از اندازه‌گیری‌های بدست‌آمده از آزمایشات است. برای مثال، اندازه‌گیری درجات آزادی چرخشی همچنین اندازه‌گیری بعضی نقاط داخلی سازه‌ها مشکل است. ضمناً تعداد حساسه‌ها در آزمایشگاه نیز محدود

است؛ بنابراین برای حل مشکل عدم هماهنگی بین درجات آزادی مدل المان محدود و درجات آزادی مدل تجربی، از مدل تقلیل‌یافته [۷-۱۰] یا مدل توسعه‌یافته [۱۱ و ۱۲] استفاده می‌شود. گریویتز^۱ [۱۳] برای اولین بار از داده‌های تجربی برای برورسانی ماتریس انعطاف‌پذیری سازه فضاپیما استفاده کرد. دریمیکر^۲ و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۰۲، روش برورسانی مبتنی بر مفهوم خطای نسبی ساختاری و روش تکرارشونده را پیشنهاد دادند که هر تکرار از دو مرحله تشکیل شده، در مرحله اول، خطاهای بسیار مهم تعیین محل شده، در مرحله دوم، این خطاها تصحیح می‌شوند. کینو^۳ و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۰۷، برای تشخیص محل عیب از هر سه ماتریس جرم، سختی و میرایی مدل المان محدود به صورت هم‌زمان استفاده کردند. وی نتایج کار خود را روی کابل فولادی آزمایش کرد که وزن قسمتی از کابل را تغییر داده، با الگوریتمی که ارائه داده بود، اندازه و محل قسمتی که جرم آن تغییر کرده بود، تشخیص داده می‌شد. کاروالیو^۴ و همکارانش [۱۶] در سال ۲۰۰۷، روش مدل المان محدود برورسانی‌شده جدید پیشنهاد نمودند که در آن با الگوریتم پیشنهادی می‌توان به راحتی داده‌های ناتمام اندازه‌گیری شده را کامل کرد؛ بدون اینکه از روش‌های مدل تقلیل‌یافته یا مدل توسعه‌یافته استفاده شود. این روش همچنین قادر بود، تعداد زیادی از مقادیر ویژه و بردارهای ویژه مدل المان محدود که تحت تأثیر بروز رسانی قرار نگرفته‌اند را حفظ نماید و به این ترتیب، مانع از نمایش مودهای غیرواقعی در بازه فرکانسی، مورد بررسی شود که معمولاً در روش‌های برورسانی مستقیم بوجود می‌آیند.

در این پژوهش، از روش تکرار جدید وابسته به مدل برورسانی و مدل تقلیل‌یافته که اخیراً توسط مینگ و ژن^۵ [۱۷] در سال ۲۰۱۱ ارائه شده، استفاده می‌شود. این محققان، در پژوهش خود نشان داده‌اند که این روش نسبت به روش‌های دیگر موجود در ادبیات فن (روش CMC^۶)، دارای دقت و سرعت بیشتری است؛ بنابراین نوآوری

¹ Gravitz

² Deraemaeker

³ Kanev

⁴ Carvalho

⁵ Wei-Ming

⁶ Cross-Model Cross-Mode

گردد. به این منظور، معادله مربوط به ارتعاشات آزاد یک سیستم نامیرا به صورت رابطه (۱) در نظر می‌شود:

$$(K - \lambda^{(i)}M)u^{(i)} = 0 \quad (1)$$

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

که در آن M و K به ترتیب، ماتریس‌های جرم و سختی است. همچنین $\lambda^{(i)}$ و $u^{(i)}$ به ترتیب، مربوط به i امین مقدار ویژه و شکل مود است و n نیز تعداد درجات آزادی است. در نخستین گام، درجات آزادی سیستم به دو دسته درجات آزادی اصلی^۲ و فرعی^۳ تقسیم می‌شود و درجات آزادی اصلی، با m و درجات آزادی فرعی، با s نشان داده می‌شود، بنابراین می‌توان با یک سری عملیات ماتریسی نوشت:

$$m + s = n \quad (2)$$

$$(K_{ss} - \lambda M_{ss})u_s = (K_{sm} - \lambda M_{sm})u_m \quad (3)$$

همچنین برای انتقال از تمامی درجات آزادی به درجات آزادی اصلی، از ماتریس تبدیل T به شکل رابطه (۴) استفاده می‌شود:

$$u = \begin{Bmatrix} u_m \\ u_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{mm} \\ T_{sm}(\omega) \end{bmatrix} u_m = T_{nm}(\omega) u_m \quad (4)$$

که در رابطه اخیر، I ماتریس همانی است؛ بنابراین ماتریس جرم و سختی تقلیل یافته با استفاده از معادله ارتعاشات کل سیستم به صورت رابطه (۵) نوشته می‌شوند:

$$\left[T_{nm}^T(\omega) K T_{nm}(\omega) - \omega^2 T_{nm}^T(\omega) M T_{nm}(\omega) \right] x_m \quad (5)$$

$$= T_{nm}^T(\omega) f_m(\omega)$$

$$K_R(\omega) = T_{nm}^T(\omega) K T_{nm}(\omega) \quad (6)$$

$$M_R(\omega) = T_{nm}^T(\omega) M T_{nm}(\omega) \quad (7)$$

بارز این مقاله استفاده از این روش برای طراحی روش عیب‌یابی سازه‌هاست، بطوری‌که قادر به تشخیص محل عیب با دقت و سرعت همگرایی بیشتری، نسبت به روش مشابه ارائه شده در مرجع [۱۹] باشد.

در بخش اول این مقاله، ابتدا روش مدل بروزرسانی تقلیل یافته مورد استفاده در این پژوهش، شرح داده می‌شود؛ سپس طراحی روش عیب‌یابی مبتنی بر مدل بروزرسانی تقلیل یافته ارائه می‌شود. به منظور بررسی قابلیت روش پیشنهادی، ابتدا روش مذکور روی یک تیر شبیه‌سازی به کمک مدل المان محدود، بکار گرفته می‌شود و تاثیر نویز با شدت‌های مختلف بر دقت عیب‌یابی با استفاده از روش مونت-کارلو، مورد مطالعه کامل قرار می‌گیرد. در نهایت، به منظور نشان دادن قابلیت روش پیشنهادی در سازه‌های واقعی، از یک تیر آزمایشگاهی و عیوب مصنوعی ایجاد شده روی آن استفاده می‌شود و با استفاده از تست آنالیز مودال تجربی و استخراج فرکانس‌های طبیعی، نتایج حاصل از عیب‌یابی شرح داده می‌شود.

۲- تئوری بروز رسانی و تقلیل مدل

در این بخش، ابتدا تئوری روش بروز رسانی مدل توضیح داده می‌شود که زیربنای روش ارائه شده در این مقاله است. بدین ترتیب که در قسمت اول، روش کاهش مدل المان محدود با استفاده از روش گویان^۱ [۱۸] با استخراج یک ماتریس مناسب انتقال بیان می‌شود. سپس در قسمت دوم و سوم این بخش بترتیب، روش CMCM (شامل بروز رسانی ماتریس جرم و سختی مدل المان محدود) و روش تکراری بهبود یافته بیان می‌شود که اخیراً در مرجع [۱۷] ارائه شده‌اند.

۲-۱- استخراج ماتریس انتقال

در این قسمت، روش به دست آوردن ماتریس انتقال توضیح داده می‌شود. توسط این ماتریس انتقال، می‌توان ابعاد مدل المان محدود را کاهش داده تا درجات آزادی مدل مذکور، متناظر با درجات آزادی اندازه‌گیری شده در مدل تجربی

² Main

³ Slave

¹ Guyan Reduction

مربوط به λ آمین مقدار ویژه و شکل مود مربوط به مدل تجربی (واقعی) است. با ضرب رابطه (۱۱) در ماتریس $(\phi_j^*)^T$ ، رابطه (۱۳) حاصل می‌شود:

$$(\phi_j^*)^T K \phi_i = \lambda_i (\phi_j^*)^T M \phi_i \quad (13)$$

از رابطه (۱۳) و با استفاده از تعامد مودها رابطه (۱۴) استخراج می‌شود:

$$(\phi_i)^T K \phi_j^* = \lambda_j (\phi_i)^T M \phi_j^* \quad (14)$$

همچنین با ضرب رابطه (۱۲) در $(\phi_i)^T$ رابطه (۱۵) بدست می‌آید:

$$(\phi_i)^T K^* \phi_j^* = \lambda_j^* (\phi_i)^T M^* \phi_j^* \quad (15)$$

اگر رابطه (۱۴) از رابطه (۱۵) کم شود، در نهایت رابطه (۱۶) قابل حصول است:

$$(\phi_i)^T (K^* - K) \phi_j^* = \quad (16)$$

$$\lambda_j^* (\phi_i)^T M^* \phi_j^* - \lambda_i (\phi_i)^T M \phi_j^*$$

در این مرحله فرض می‌شود، بین ماتریس‌های سختی و جرم مدل المان محدود و مدل تجربی رابطه (۱۷) برقرار باشد:

$$K^* = K + \sum_{n=1}^{Ne} \alpha_n K_n \quad (17)$$

$$M^* = M + \sum_{n=1}^{Ne} \beta_n M_n \quad (18)$$

که در روابط فوق، K_n و M_n به ترتیب، بیانگر ماتریس سختی و جرم المان n ام هستند، همچنین α_n و β_n به ترتیب، بیانگر ضریب تصحیح مربوط به ماتریس سختی و جرم المان n ام بوده، N_e تعداد کل المان‌ها را نشان می‌دهد. با قرار دادن روابط (۱۷) و (۱۸) در رابطه (۱۶) و با انجام یک سری عملیات جبری، رابطه (۱۹) حاصل می‌شود:

$$\sum_{n=1}^{Ne} \alpha_n (\phi_i)^T K_n \phi_j^* - \sum_{n=1}^{Ne} \beta_n \lambda_j^* (\phi_i)^T M_n \phi_j^* \quad (19)$$

$$= (\lambda_j^* - \lambda_i) (\phi_i)^T M \phi_j^*$$

حال متغیرهای C ، E و f به صورت روابط (۲۰)-

(۲۲) تعریف می‌شوند:

که در روابط فوق، نماد " T " بیانگر ترانزاده ماتریس است. با توجه به روابط فوق، ماتریس انتقال T_{nm} از رابطه (۸) بدست می‌آید:

$$T_{nm} = \begin{bmatrix} I_{nm} \\ T_{sm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{nm} \\ -K_{ss}^{-1} K_{sm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

در نهایت با قرار دادن رابطه (۸) در (۶) و (۷)، می‌توان ماتریس‌های جرم و سختی تقلیل یافته را به صورت رابطه (۹)- (۱۰) نوشت:

$$K_R = (K_{mm} - K_{ms} K_{ss}^{-1} K_{sm}) \quad (9)$$

$$M_R = T_{nm}^T M T_{nm} \quad (10)$$

$$= (M_{mm} - M_{ms} K_{ss}^{-1} K_{sm} - K_{ms} K_{ss}^{-1} M_{sm} + K_{ms} K_{ss}^{-1} M_{ss} K_{ss}^{-1} K_{sm})$$

۲-۲- بروز رسانی ماتریس‌های جرم و سختی

حال در این قسمت، روش بروز رسانی مدل المان محدود را با استفاده از داده‌های آنالیز مودال توضیح داده می‌شود. به عبارت دیگر، تغییرات مناسب روی ماتریس‌های جرمی و سختی مدل المان محدود به منظور نزدیک نمودن مشخصات دینامیکی مدل المان محدود و تجربی بیان می‌شود. برای مدل المان محدود یک سیستم بدون میراکننده، رابطه (۱۱) حاکم است:

$$K \phi_i = \lambda_i M \phi_i \quad (11)$$

که در آن M و K به ترتیب، ماتریس‌های جرم و سختی مدل المان محدود بوده، همچنین λ_i و ϕ_i به ترتیب، مربوط به i آمین مقدار ویژه و شکل مود مربوط به مدل المان محدود است. رابطه (۱۱) برای مدل تجربی بصورت رابطه (۱۲) نوشته می‌شود:

$$K^* \phi_j^* = \lambda_j^* M^* \phi_j^* \quad (12)$$

که در آن M^* و K^* به ترتیب، ماتریس‌های جرم و سختی مدل تجربی بوده، همچنین λ_j^* و ϕ_j^* به ترتیب،

$$f = [f_1 \quad \dots \quad f_{nf \times nt, Ne}] \quad (29)$$

با استفاده از روش حداقل مجموع مربعات برای یافتن P از رابطه (۳۰) استفاده می‌شود:

$$P = (G^T G)^{-1} G^T f \quad (30)$$

نهایتاً مدل المان محدود بروزرسانی شده از قراردادن α_n و β_n استخراج شده از حل رابطه (۳۰)، در روابط (۱۷) و (۱۸) به دست می‌آید.

۲-۳- بکارگیری روش تکرار بهبود یافته

در این قسمت، با استفاده از ماتریس انتقال به دست آمده در بخش ۲-۱، روابط به دست آمده در بخش ۲-۲ به صورتی نوشته می‌شود که بتوان تعداد درجات آزادی مدل المان محدود را کاهش داده، برابر و متناظر با تعداد درجات اندازه گیری شده در مدل تجربی نمود، سپس با ارایه روش تکرار، مقادیر α_n و β_n را بدست آورد. به این منظور، رابطه بین شکل مودهای مدل المان محدود، قبل و بعد از تقلیل یافتن به صورت رابطه (۳۱) نوشته می‌شود:

$$\phi_i = T_f \phi_{s,i} \quad (31)$$

که در رابطه فوق، T_f بیانگر ماتریس تقلیل کننده مدل المان محدود است که از رابطه (۸) قابل استخراج است. به همین ترتیب، رابطه بین شکل مودهای مدل المان تجربی، قبل و بعد از تقلیل یافتن به صورت (۳۲) است:

$$\phi_j^* = T_e \phi_{s,j}^* \quad (32)$$

که در رابطه فوق T_e بیانگر ماتریس تقلیل کننده مدل تجربی است. با قراردادن روابط (۳۱) و (۳۲) در رابطه (۱۹)، رابطه اخیر به صورت رابطه (۳۳) نوشته می‌شود:

$$\sum_{n=1}^{Ne} \alpha_n (\phi_{s,i})^T T_f^T K_n T_e \phi_{s,j}^* - \sum_{n=1}^{Ne} \beta_n \lambda_{s,j}^* (\phi_{s,i})^T T_e^T M_n T_e \phi_{s,j}^* = (\lambda_{s,j}^* - \lambda_{s,i}) (\phi_{s,i})^T M_s \phi_{s,j}^* \quad (33)$$

$$C_{ij,n} = (\phi_i)^T K_n \phi_j^* \quad (20)$$

$$E_{ij,n} = -\lambda_j^* (\phi_i)^T M_n \phi_j^* \quad (21)$$

$$f_{ij} = (\lambda_j^* - \lambda_i) (\phi_i)^T M \phi_j^* \quad (22)$$

با جای‌گذاری r به جای ij ، رابطه (۱۹) به کمک روابط تعریف شده اخیر به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\sum_{n=1}^{Ne} \alpha_n C_{r,n} + \sum_{n=1}^{Ne} \beta_n E_{r,n} = f_r \quad (23)$$

اگر فرض شود که تعداد مودهای مدل المان محدود برابر nf و تعداد مودهای مدل تجربی برابر nt باشد، تعداد معادله‌هایی که از رابطه (۲۳) می‌توان بدست آورد برابر، $nf \times nt$ است. اگر رابطه (۲۳) به صورت ماتریسی نوشته شود، رابطه (۲۴) به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} C & E \end{bmatrix} p = Gp = f \quad (24)$$

که در رابطه فوق:

$$C = \begin{bmatrix} C_{1,1} & \dots & \dots & C_{1,Ne} \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ C_{nf \times nt, 1} & \dots & \dots & C_{nf \times nt, Ne} \end{bmatrix} \quad (25)$$

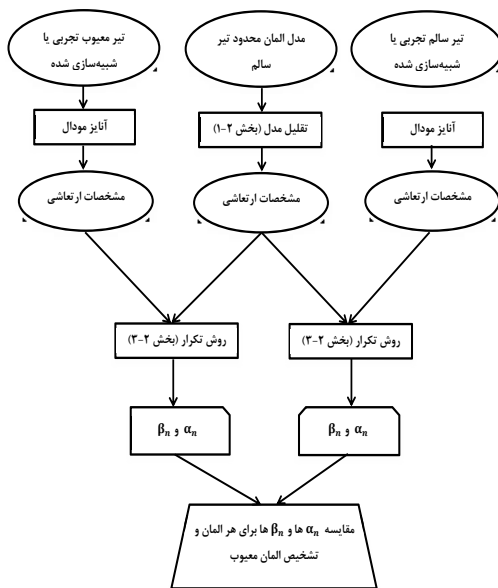
$$E = \begin{bmatrix} E_{1,1} & \dots & \dots & E_{1,Ne} \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ E_{nf \times nt, 1} & \dots & \dots & E_{nf \times nt, Ne} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$G = [C \quad E] \quad (27)$$

$$p = [\alpha_1 \quad \dots \quad \alpha_{Ne} \quad \beta_1 \quad \dots \quad \beta_{Ne}] \quad (28)$$

آنها و با توجه به این موضوع که تغییر α_n و β_n مربوط به المان معیوب بیشتر از المان‌های دیگر است، می‌توان المان معیوب را بدست آورد. برای بررسی تاثیر نویز روی نتایج عیب‌یابی کافی است با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت-کارلو به فرکانس‌ها و شکل مودها در حالت بدون عیب و معیوب نویز اعمال نموده و α_n و β_n مربوط به هر المان را بدست آورد و فرآیند عیب‌یابی مذکور را تکرار کرد. در فلوجارت ترسیم شده در شکل ۱ مراحل عیب‌یابی نشان داده شده است. لازم به توضیح است که شدت نویز اعمالی که با snr^1 نشان داده می‌شود، به صورت شکل (۱) تعریف می‌شو

$$snr = 20 \log_{10} \frac{STD_{signal}}{STD_{noise}} \quad (36)$$



شکل ۱- فلوجارت مربوط به روش عیب‌یابی

در رابطه فوق $\lambda_{s,j}$ و $\lambda_{s,j}^*$ به ترتیب، بیانگر λ امین مقدار ویژه مدل المان محدود تقلیل یافته و λ امین مقدار ویژه مدل تجربی هستند، همچنین M_s در واقع ماتریس جرم مدل المان محدود تقلیل یافته است که از رابطه (۳۴) بدست می‌آید:

$$M_s = T_f^T M T_f \quad (34)$$

از آنجا که ماتریس T_e مربوط به مدل تجربی معلوم نیست، از T_f به عنوان جایگزین T_e استفاده می‌شود؛ بنابراین برای کاهش خطای این جایگزینی، ارایه رابطه تکراری اجتناب ناپذیر است، به طوری که در طول فرایند تکرار، پارامترهای دینامیکی سیستم به مقادیر صحیح خود همگرا شوند. بر این اساس، رابطه (۳۳) به صورت یک رابطه تکراری، با جایگزین کردن $T_{f,k}$ به جای T_e در تکرار k ام، همانند زیر بازنویسی می‌شود:

$$\sum_{n=1}^{N_e} \alpha_{n,k} (\phi_{s,i})^T T_{f,k}^T K_n T_{f,k} \phi_{s,j}^* - \sum_{n=1}^{N_e} \beta_{n,k} \lambda_{s,j}^* (\phi_{s,i})^T T_{f,k}^T M_n T_{f,k} \phi_{s,j}^* = (\lambda_{s,j}^* - \lambda_{s,i}) (\phi_{s,i})^T M_s \phi_{s,j}^* \quad (35)$$

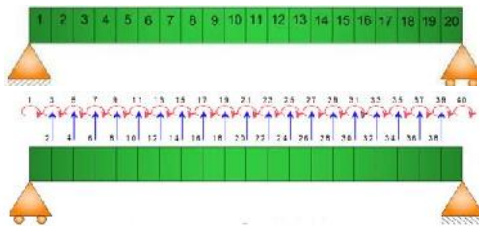
رابطه‌ی (۳۵) در واقع رابطه نهایی برورسانی کردن با استفاده از روش تکرار بوده که حل آن درست مانند، حل رابطه (۱۹) است؛ ولی برای حل دقیق و سریع آن در هر تکرار از روش مرجع [۱۷] استفاده گردیده است که در نهایت می‌توان، $\alpha_{n,k}$ و $\beta_{n,k}$ را به مقدار صحیح خود همگرا کرد.

۳- روش عیب‌یابی

روش عیب‌یابی ارائه شده در این پژوهش، بدین ترتیب است که برای هر دو حالت بدون عیب و معیوب تیر، α_n و β_n مربوط به روابط (۱۷) و (۱۸) را برای ۳۰۰ بار فرآیند تکرار ($k = 300$) به دست آورده و با مقایسه اختلاف α_n و β_n مربوط به حالت معیوب با مقادیر نظیر در حالت بدون عیب

¹ Signal to Noise Ratio

عیب در روش مونت-کارلو در نظر گرفته می‌شود که نتایج عیب‌یابی براساس مطالعه آماری این تعداد از ران‌ها انجام می‌گیرد. همچنین از میان ۴۰ فرکانس طبیعی تیر، تنها ۹ فرکانس طبیعی اول تیر در شبیه‌سازی عیب‌یابی استفاده می‌شود.



شکل ۲- مدل المان محدود تیر

در ادامه، نتایج حاصل در حالت‌های بدون نویز و با نویز در شکل‌هایی ارائه می‌شود. لازم به توضیح است که به علت کمبود صفحات مقاله، نتایج کامل مربوط به حالت‌های شبیه‌سازی بدون نویز و اعمال نویز ضعیف ($snr < 50$)، متوسط ($30 < snr < 40$) و قوی ($snr > 20$) در تمامی شدت‌های مختلف نشان داده می‌شوند، بنابراین در شکل‌های ۳ تا ۱۰، نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی، نمایش داده می‌شود؛ همچنین به علت محدودیت نشان دادن نتایج مربوط به تمامی المان‌ها، فقط نتایج عیب‌یابی مربوط به المان ۲ نشان داده می‌شود؛ بنابراین نتایج کامل‌تر به صورت کمی در جداول مناسبی در ادامه مقاله آورده می‌شوند. در این شکل‌ها، علاوه بر تعیین محل المان معیوب، نحوه همگرا شدن یکی از فرکانس‌ها و خطای کلی نیز بررسی می‌شود. لازم به توضیح است که خطای کلی به صورت مجموع اختلاف فرکانس‌های تولیدشده در مدل المان محدود برورسانی شده و فرکانس‌های تولیدشده در مدل معیوب تعریف می‌شود. شکل‌های ۳ تا ۴، مربوط به نتایج شبیه‌سازی روش عیب‌یابی بدون نویز و شدت عیب با درصد کاهش در بازه (5%-25%) است. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است در حالتی که سیستم نویز ندارد و شدت عیب کم است، نمودار خطای کلی

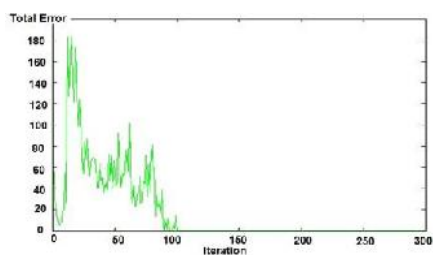
۴- شبیه‌سازی روش عیب‌یابی پیشنهادی بر روی مدل

تیر

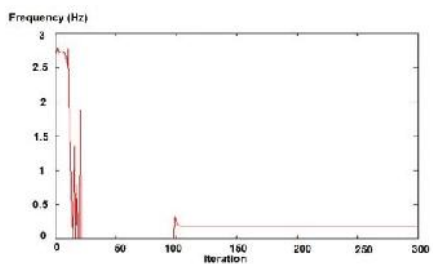
به منظور بررسی قابلیت روش پیشنهادی عیب‌یابی و مطالعه اثرات نویز روی نتایج عیب‌یابی، تیری با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی همانند شکل ۲ در نرم افزار MATLAB با استفاده از روش المان محدود مدل‌سازی نموده و فرکانس‌های طبیعی آن برای حالت‌های سالم و معیوب استخراج می‌شود. طول تیر ۸۵۰ میلی‌متر است و دارای ارتفاع سطح مقطع به اندازه ۱۰ میلی‌متر و عرض سطح مقطع به اندازه ۲۰ میلی‌متر است. جنس تیر از نوع آلومینیوم که جرم حجمی آن ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و دارای ضریب پواسون ۰/۳ و مدول الاستیسیته‌ی معادل با ۷۰ گیگا پاسکال است. به منظور شبیه‌سازی شرایط آزمایشگاهی، نویزهای لازم که در قسمت قبلی این مقاله بیان شد با استفاده از روش مونت-کارلو تولید نموده و به فرکانس‌های تیر اضافه می‌شود. همچنین با توجه به اینکه در یک آزمایش آنالیز مودال تجربی نمی‌توان به راحتی دوران گره‌های چرخشی را اندازه گرفت، بنابراین با استفاده از روش بیان شده در بخش ۲-۱، مدل را تقلیل داده و فرکانس‌های مدل تقلیل یافته استخراج می‌شود که در واقع شرایط واقعی را شبیه‌سازی می‌نماید. در این پژوهش از ۲۰ المان موجود، یک المان از سمت چپ تیر (المان ۲)، یک المان از سمت راست تیر (المان ۱۸) و یک المان از وسط تیر (المان ۱۲) انتخاب کرده، به عنوان المان‌های معیوب به صورت جداگانه در نظر گرفته می‌شوند. بعلاوه شدت عیب به صورت مقدار کاهش مدول الاستیسته و مقدار جرم هر المان توأم برحسب درصد تعریف می‌شود. لازم به توضیح است که مقدار شدت عیب مذکور، به صورت یک مقدار تصادفی با تابع توزیع یکنواخت با استفاده از روش مونت-کارلو در بازه مشخصی از درصد کاهش ماتریس سختی و جرم به دست می‌آید. همچنین تعداد ۵۰ ران^۱ شبیه‌سازی در هر حالت

^۱ Run

در نمودار بالایی شکل ۴، محور عمودی اختلاف میانگین β_n (پارامتر متناظر با سختی سیستم) در حالت سالم و معیوب را بیان می‌کند و محور افقی، نشان‌دهنده شماره المان است؛ همچنین در نمودار پایینی این شکل، محور عمودی، اختلاف میانگین α_n (پارامتر متناظر با جرم سیستم) در حالت سالم و معیوب را بیان می‌کند و محور افقی، نشان‌دهنده شماره المان است. همان‌طوری که در قسمت قبل اشاره شد، مبنای روش عیب‌یابی پیشنهادی بر این اصل استوار است که در المانی که عیب وجود دارد، اختلاف بین میانگین α_n ها و β_n ها در حالت سالم و معیوب، بیشتر از سایر المان‌ها است، در نتیجه ارتفاع ستون مربوط به المان معیوب، باید بیشتر از سایر المان‌ها باشد. همانند شکل‌های فوق، شکل‌های ۵ تا ۶، مربوط به نتایج شبیه‌سازی روش عیب‌یابی بدون نویز و شدت عیب 25%-65% است.



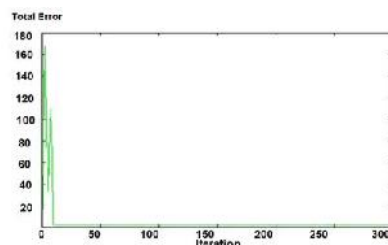
(الف)



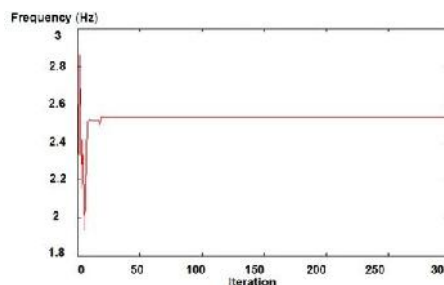
(ب)

شکل ۵- نحوه‌ی همگراشدن خطای کلی (الف) و یکی از فرکانس‌ها (ب) برای شدت عیب 25%-65% و برای حالت بدون نویز

سیستم و یکی از فرکانس‌ها بسرعت همگرا می‌شوند. در این نمودارها، محور افقی تعداد دفعات تکرار را نشان می‌دهد. بعلاوه نتایج عیب‌یابی نیز در شکل ۴ نشان داده شده است.

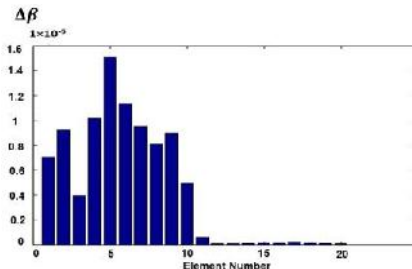
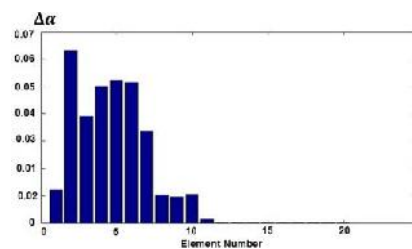


(الف)

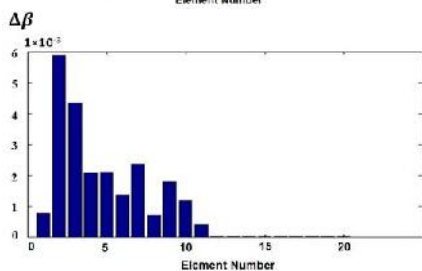
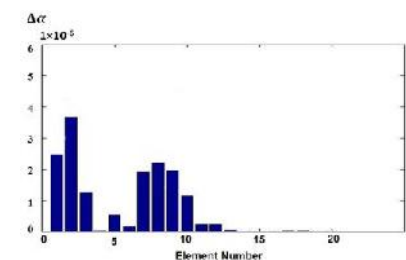


(ب)

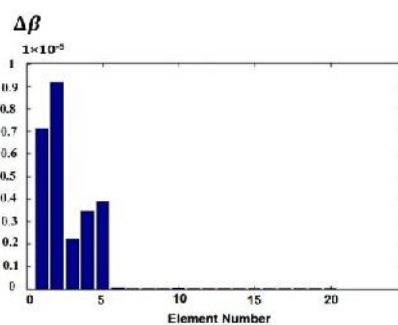
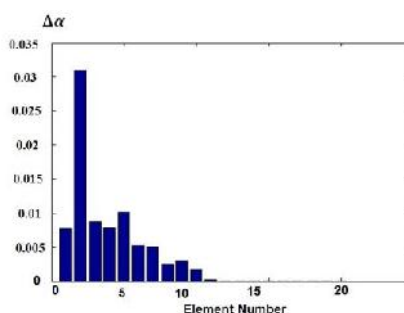
شکل ۳ - نحوه همگراشدن خطای کلی (الف) و یکی از فرکانس‌ها (ب) برای شدت عیب 25%-5% و برای حالت بدون نویز



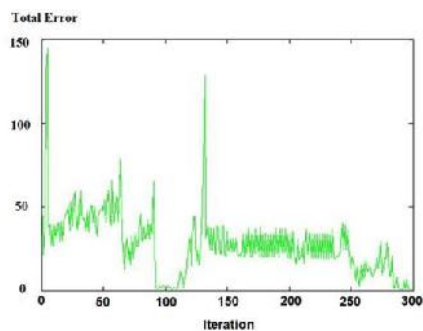
شکل ۴- نتایج عیب‌یابی براساس تغییر α و β برای شدت عیب 25%-5% و برای حالت بدون نویز



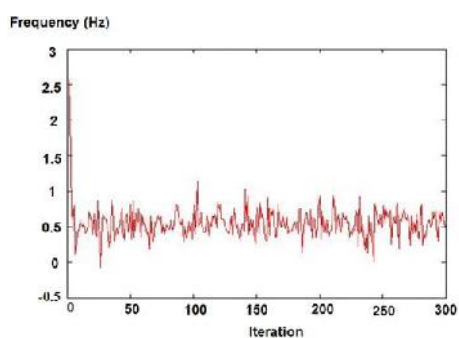
شکل ۸- نتایج عیب‌یابی بر اساس تغییر α و β برای شدت عیب 25%-65% و $30 < snr < 40$



شکل ۶- نتایج عیب‌یابی بر اساس تغییر α و β برای شدت عیب 25%-65% و برای حالت بدون نویز

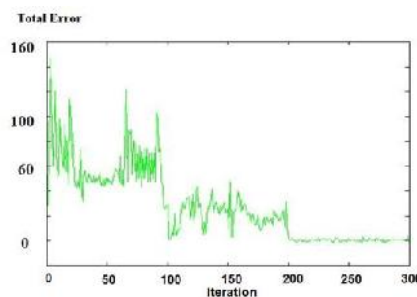


(الف)

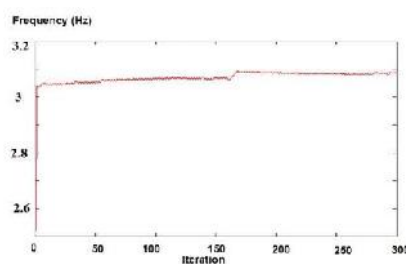


(ب)

شکل ۹- نحوه همگراشدن خطای کلی (الف) و یکی از فرکانس‌ها (ب) برای نویز با $snr > 20$ و شدت عیب 25%-65%



(الف)

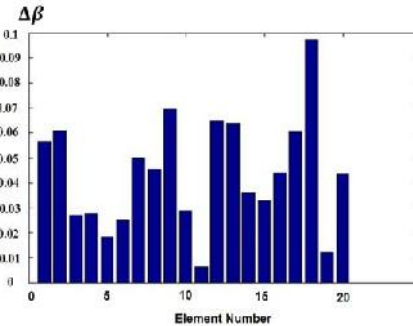
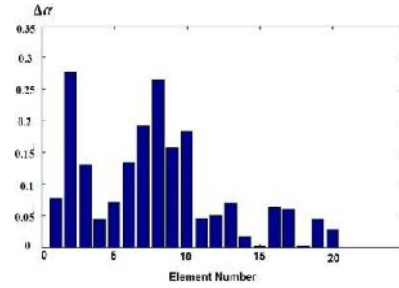


(ب)

شکل ۷- نحوه همگراشدن خطای کلی (الف) و یکی از فرکانس‌ها (ب) برای $30 < snr < 40$ و شدت عیب 25%-65%

جدول ۱- نتایج شبیه‌سازی روش عیب‌یابی پیشنهادی

	Weak (50 < snr)	Medium (30 < snr < 40)	Strong (snr < 20)
Low (5%-25%)	99% Convergence	57% Convergence	21% Convergence
	95% Correct Detection	93% Correct Detection	85% Correct Detection
	Iteration: 12	Iteration: 31	Iteration: 65
Medium (25%-65%)	95% Convergence	42% Convergence	17% Convergence
	98% Correct Detection	97% Correct Detection	80% Correct Detection
	Iteration: 10	Iteration: 23	Iteration: 64
High (65%-95%)	64% Convergence	36% Convergence	18% Convergence
	30% Correct Detection	25% Correct Detection	15% Correct Detection
	Iteration: 67	Iteration: 42	Iteration: 80



شکل ۱۰- نتایج عیب‌یابی بر اساس تغییر α و β برای نویز با $snr > 20$ و شدت عیب 25%-65%

جدول ۲- نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش مرجع

[۱۹]

	Weak (50 < snr)	Medium (30 < snr < 40)	Strong (snr < 20)
Low (5%-25%)	78% Convergence	33% Convergence	11% Convergence
	86% Correct Detection	81% Correct Detection	64% Correct Detection
	Iteration: 147	Iteration: 187	Iteration: 320
Medium (25%-65%)	90% Convergence	35% Convergence	14% Convergence
	85% Correct Detection	93% Correct Detection	65% Correct Detection
	Iteration: 136	Iteration: 173	Iteration: 411
High (65%-95%)	62% Convergence	35% Convergence	19% Convergence
	25% Correct Detection	12% Correct Detection	4% Correct Detection
	Iteration: 154	Iteration: 187	Iteration: 398

برای مقایسه روش پیشنهادی با روش ارائه شده در مرجع

[۱۹]، شبیه‌سازی روش عیب‌یابی ارائه شده در این بخش را

با استفاده از روش مرجع اخیر که براساس روش MCMC

با توجه به شکل ۵، می‌توان مشاهده کرد که سرعت همگرایی نسبت به شکل ۳ کاهش پیدا کرده است؛ ولی با توجه به شکل ۶ و در مقایسه با شکل ۴، محل عیب به درستی و وضوح بیشتری تشخیص داده شده است. شکل‌های ۷ و ۸ نیز، نتایج مربوط به شبیه‌سازی روش عیب‌یابی همراه با نویز متوسط ($30 < snr < 40$) و شدت عیب 25%-65% است. از دو شکل ۹ و ۱۰، می‌توان مشاهده کرد که علاوه بر همگرا نشدن روش تکرار به یک مقدار مشخص، محل عیب نیز قابل تشخیص نیست. به منظور ارزیابی بهتر، نتایج آماری ۴۵۰ (۵۰×۹) ران شبیه‌سازی روش پیشنهادی عیب‌یابی در جدول ۱ برحسب درصد همگرایی‌های صحیح، تشخیص صحیح عیب (به شرط وجود همگرایی) و میانگین تعداد تکرارهای لازم برای حصول همگرایی (همان مفهوم سرعت همگرایی) آورده شده است.

حالتی که شدت عیب ۶۵٪-۹۵٪ است، سیستم با درصد پائینی همگرا می‌شود و همچنین نمی‌تواند المان معیوب را با درصد بالایی تشخیص دهد.

۴- در تمامی حالت‌های مربوط به شدت نویز و عیب، روش پیشنهادی دارای سرعت همگرایی و درصد تشخیص عیب بیشتری، نسبت به روش بکارگیری شده در مرجع [۱۹] است.

۵- اعمال روش عیب‌یابی پیشنهادی بر روی تیر در شرایط آزمایشگاهی

به منظور نشان دادن قابلیت روش پیشنهادی به صورت عملی و در شرایط واقعی از نظر اندازه‌گیری و تست آنالیز مودال تجربی، روش مذکور روی یک تیر دو سر مفصل آزمایشگاهی به کار برده می‌شود. در این آزمایش، از ۵ تیر آلومنیومی استفاده می‌شود که ابعاد، شرایط تکیه‌گاهی و جنس تیرهای مذکور عیناً همانند مدل المان محدود بیان شده در بخش شبیه‌سازی است. لازم به تذکر است که با توجه به اینکه ایجاد عیب در تیر آلومنیومی و تحریک آن با چکش ضربه نسبت به تیر فولادی در شرایط آزمایشگاهی سهل‌تر است، بنابراین در این پژوهش، از تیر آلومنیومی استفاده می‌شود. تیر موردنظر را به همراه تکیه‌گاه‌های بیان شده به چارچوب متصل کرده و آن را به ۱۲ قسمت که در هر قسمت توسط یک نقطه که گره^۱ نامیده می‌شود، تقسیم و مشخص می‌شود. هر یک از گره‌ها به فاصله ۷۰ میلی‌متر از هم قرار گرفته‌اند و فاصله گره ۱۲ از انتهای سمت چپ تیر ۷۰ میلی‌متر بوده، فاصله گره ۱۳ از انتهای سمت راست تیر نیز برابر ۷۰ میلی‌متر است. بعلاوه یکی از تیرها را بدون عیب در نظر گرفته و چهار تیر باقی‌مانده با حالت‌های زیر معیوب در نظر گرفته می‌شوند:

- حالت اول (damage#1): در وسط تیر شیاری با عمق ۲ میلی‌متر ایجاد شده است.

کلاسیک است، انجام داده و نتایج به صورت جدول ۲، به صورت خلاصه ارائه می‌شود.

با مقایسه دو جدول اخیر در هر یک از شدت‌های نویز و عیب متناظر، می‌توان به این نتیجه مهم پی برد که با بکارگیری روش تکرار بهبود یافته [۱۷]، که بر پایه این روش، عیب‌یابی سازه انجام می‌گیرد، سرعت و دقت عیب‌یابی افزایش می‌یابد. از تحلیل نتایج اخیر که به صورت جدول و نمونه‌ای از شکل‌های نتایج شبیه‌سازی ارائه گردید، به صورت زیر نتایج قابل جمع‌بندی است:

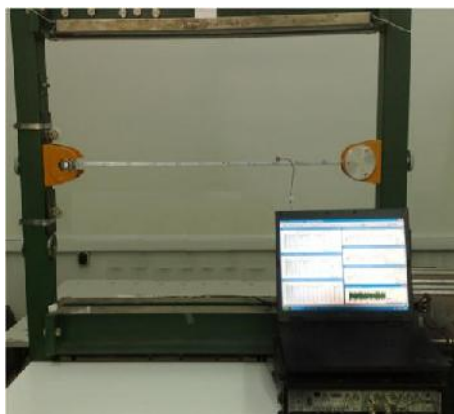
۱- برای حالت بدون نویز و همچنین نویز ضعیف ($snr > 50$)، نتایج مربوط به خطای کلی و فرکانس‌ها به خوبی همگرا می‌شوند و عیب سیستم با شدت کم و متوسط به خوبی قابل تشخیص است؛ همچنین درصد همگرا شدن سیستم، هنگام وجود عیب شدید کاهش یافته و قدرت تشخیص محل عیب نیز، کاهش پیدا می‌کند.

۲- هنگامی که به سیستم نویز متوسط ($30 < snr < 40$) اعمال شده و شدت عیب ۵٪-۲۵٪ است، سیستم عیب‌یابی در حدود ۶۰٪ موارد قادر است همگرا شود و متعاقباً المان معیوب را به خوبی تشخیص دهد؛ در حالتی که شدت عیب ۲۵٪-۶۵٪ است، نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که در ۴۲٪ موارد سیستم می‌تواند همگرا شود و در ۹۷٪ این موارد نیز المان معیوب قابل تشخیص است؛ در نهایت برای حالتی که شدت عیب ۶۵٪-۹۵٪ است، سیستم با درصد کمی از موارد می‌تواند همگرا شود و در آن موارد کم نیز نمی‌تواند المان معیوب را به خوبی تشخیص دهد.

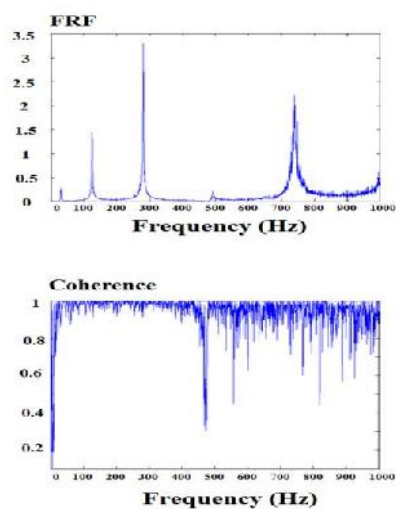
۳- هنگامی که به سیستم نویز قوی ($snr > 20$) اعمال شده و شدت عیب ۵٪-۲۵٪ است، سیستم در حدود ۲۱ درصد موارد قادر است همگرا شود؛ اما با این وجود می‌تواند المان معیوب را با درصد موفقیت بالایی تشخیص دهد؛ در حالتی که شدت عیب ۲۵٪-۶۵٪ است، نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که در حدود ۱۷ درصد موارد سیستم می‌تواند همگرا شود و در حدود ۸۰٪ المان معیوب را تشخیص دهد و در نهایت برای

¹ Node

نمونه، یکی از نمودارهای تابع پاسخ فرکانسی (FRF^2) و کوهرنس^۳ مرتبط با آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- مجموعه آزمایش تجربی تیر



شکل ۱۲: پاسخ فرکانسی و کوهرنس مربوط به آنالیز مودال تجربی

با مشاهده شکل ۱۲، صحت آزمایش آنالیز مودال تجربی و مسلماً نتایج استخراج شده در قسمت تجربی این پروژه، قابل تضمین است؛ همچنین با توجه به شکل اخیر و مشاهده

- حالت دوم (damage#2): در وسط تیر شیاری با عمق ۵ میلی‌متر ایجاد شده است.

- حالت سوم (damage#3): در سمت چپ تیر (گره سوم)، شیاری با عمق ۲ میلی‌متر ایجاد شده است.

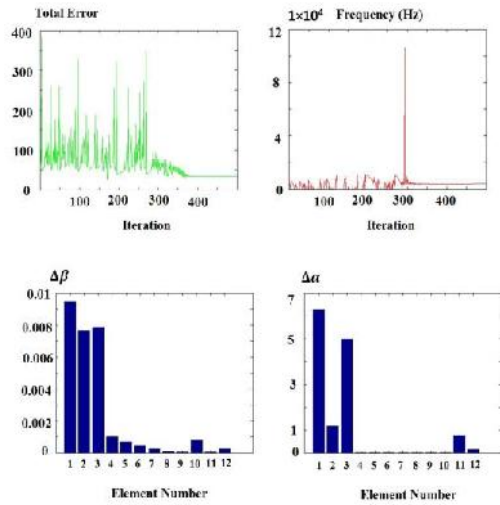
- حالت چهارم (damage#4): در سمت چپ تیر (گره سوم)، شیاری با عمق ۵ میلی‌متر ایجاد شده است.

برای تست آنالیز مودال، توسط چکش ضربه که حامل نیروسنج (مدل ۸۲۰۰ شرکت B&K) روی نوک چکش است، ضربه مناسبی را روی گره ۱۱ وارد ساخته، هم‌زمان نیز با قراردادن شتاب‌سنج (مدل ۴۵۰۸ شرکت B&K) در گره شماره ۱، پاسخ تیر به صورت شتاب در گره مذکور دریافت می‌شود. مقدار نیرو و پاسخ متناظر با آن را توسط آنالیزکننده سیگنال از نوع PULSE شرکت B&K قابل دریافت و مشاهده است. بعد از ذخیره کردن داده‌ها در کامپیوتر، با تعویض محل شتاب‌سنج از گره ۱ به گره‌های دیگر (روش جابجایی شتاب‌سنج^۱)، مراحل بالا را تکرار کرده، در نهایت با قراردادن شتاب‌سنج روی گره شماره ۱۱ به صورت قرارگیری درست در قسمت زیر تیر در مقابل گره شماره ۱۱، اندازه‌گیری‌های عملی آنالیز مودال روی تیر دو سر مفصل به پایان می‌رسد و می‌توان تعداد ۱۳ تابع پاسخ فرکانسی تیر دو سر مفصل را از طریق نرم‌افزار پالس استخراج کرد. با وارد کردن توابع پاسخ فرکانسی مذکور به نرم‌افزار ME'scope، می‌توان پارامترهای ارتعاشی را به دست آورد. مجموعه آزمایش تجربی تیر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بعد از مدل‌سازی المان محدود تیر سالم مورد نظر در MATLAB و بروزرسانی آن توسط روش بیان شده در بخش ۲ مقاله، روش عیب‌یابی پیشنهادی روی هر چهار حالت عیب‌دار تیر اعمال می‌شود. مسلماً همانند مدل شبیه‌سازی شده، فرکانس‌های استخراج شده از روش آنالیز مودال به عنوان ورودی اصلی روش عیب‌یابی محسوب می‌شوند. لازم به ذکر است که به عنوان

² Frequency Response Function

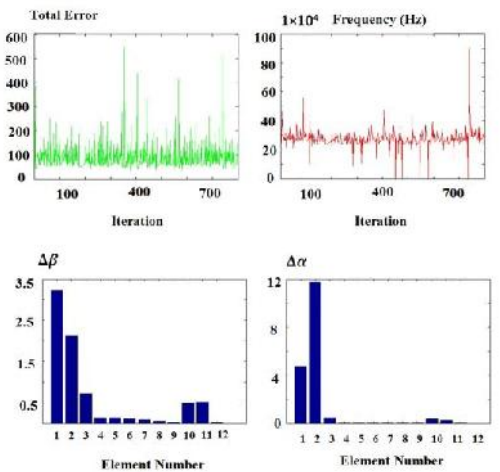
³ Coherence

¹ Moving Accelerometer



شکل ۱۵- نمودارهای همگرایی و نتایج عیب‌یابی برای

حالت damage#3

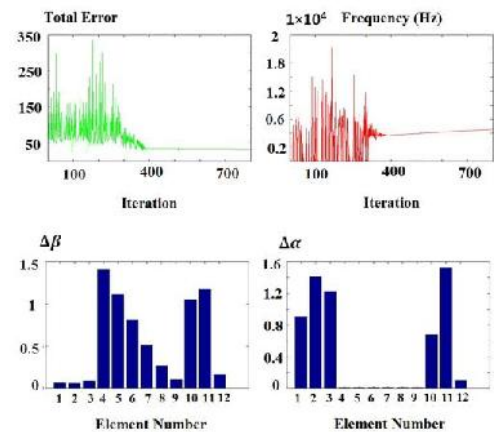


شکل ۱۶- نمودارهای همگرایی و نتایج عیب‌یابی برای

حالت damage#4

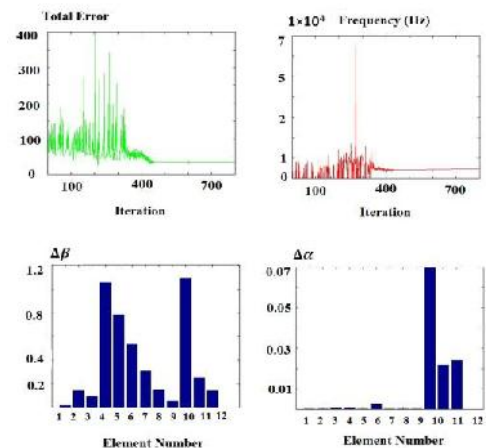
همانطور که از شکل ۱۳ مشخص است، در این حالت نمودارهای خطای کلی و فرکانس‌ها به‌خوبی همگرا می‌شوند و المان معیوب را با ۲ المان اختلاف نشان می‌دهد. در شکل ۱۴ با افزایش شدت عیب، همانطور که انتظار می‌رفت، نمودارهای خطای کلی و فرکانس‌ها با سرعت کمتری نسبت به

اینکه چهار فرکانس طبیعی اول سیستم در محدوده فرکانسی بدون نویز است، از این چهار فرکانس طبیعی برای روش عیب‌یابی در قسمت تجربی استفاده می‌شود. نتایج عیب‌یابی تیر مذکور همانند نمودارهای شبیه‌سازی که شامل نمودار همگرایی و شاخص است، در شکل‌های ۱۳ تا ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۳- نمودارهای همگرایی و نتایج عیب‌یابی برای

حالت damage#1



شکل ۱۴- نمودارهای همگرایی و نتایج عیب‌یابی برای

حالت damage#2

نمودار قبلی همگرا می‌شوند، با این وجود محل عیب تشخیص داده می‌شود. در شکل ۱۵ نیز، با توجه به اینکه شدت عیب کم است، نمودارهای خطای کلی و فرکانس‌ها به سرعت همگرا می‌شوند و محل عیب نیز قابل تشخیص است. در نهایت در شکل ۱۶ با توجه به اینکه شدت عیب زیاد است، نمودارهای خطای کلی و فرکانس‌ها نمی‌توانند به سرعت همگرا شوند، ولی همچنان عیب قابل تشخیص است؛ بطور کلی با بررسی نتایج بدست آمده از تست تجربی به این نتیجه می‌توان رسید (همان طوری که در نتایج شبیه‌سازی نیز مشاهده گردید)، با افزایش شدت عیب، همگرایی روش ارایه شده برای عیب‌یابی کمتر می‌شود. باید به این نکته اشاره شود که در این پژوهش، هدف اصلی آزمایش تجربی، نشان دادن قابلیت و امکان بکارگیری این روش در شرایط واقعی است. مسلماً اولاً با توجه به محدودیت تعداد آزمایش‌های تجربی لازم، امکان تولید نتایج متناظر با جداول ۱ و ۲ (با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت-کارلو در قسمت شبیه‌سازی این مقاله تولید شده است) وجود ندارد. ثانیاً به علت نویز موجود همان طوری که از نمودار کوه‌رنس مشهود است، تعداد فرکانس‌های مورد استفاده برای عیب‌یابی ۴ عدد است؛ در حالی که این تعداد در قسمت شبیه‌سازی ۹ عدد است؛ ثالثاً نحوه معیوب نمودن تیر در شبیه‌سازی و عمل متفاوت است (شیار با اژه در آزمایش تجربی و کاهش جرم یا سفتی در شبیه‌سازی به عنوان عیوب در نظر گرفته شدند)، بنابراین مقایسه کمی نتایج شبیه‌سازی و تجربی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، روش عیب‌یابی سازه با استفاده از داده‌های آنالیز مودال (مشخصات ارتعاشی) طراحی گردید، بطوری که روش مذکور، مبتنی بر روش جدید بروزرسانی مدل المان محدود است که اخیراً دقت و سرعت آن نسبت به سایر روش‌های بروز رسانی به اثبات رسیده است. مراحل طراحی، شامل فرمولاسیون مسئله بروزرسانی با استفاده از تقلیل ابعاد ماتریس‌های جرم و سختی مدل المان محدود، با جزئیات

کامل توضیح داده شد؛ همچنین در مورد چگونگی به‌کارگیری پارامترهای تنظیم کننده مدل المان محدود (پارامترهای مرتبط با ماتریس‌های سختی و جرمی مدل) از روی داده‌های آنالیز مودال برای عیب‌یابی سازه که جزء قسمت‌های مهم طراحی روش است، توضیحات لازم در مقاله ارائه گردید. ابتدا به منظور بررسی قابلیت‌های روش عیب‌یابی، تیری در MATLAB به صورت مدل المان محدود مدل‌سازی شد و با استفاده از روش مونت-کارلو، نویز با شدت‌های مختلف روی داده‌های آنالیز مودال تیر مذکور شبیه‌سازی گردید؛ سپس با شبیه‌سازی عیوب مختلف در تیر، مراحل عیب‌یابی پیشنهادی در این مقاله روی تیر پیاده گردید؛ سپس سرعت عیب‌یابی، درصد همگرایی و تشخیص درست عیب برای شدت‌های نویز و عیوب مختلف به صورت دقیق گزارش گردید و با نتایج روش عیب‌یابی سایر محققان مقایسه گردید. مقایسه اخیر، نشان داد که روش پیشنهادی با سرعت و دقت بیشتری عیب را شناسایی می‌کند. همچنین نشان داده شد که با افزایش نویز و شدت عیب، قدرت تشخیص روش عیب‌یابی کاهش می‌یابد. بعلاوه به منظور بررسی قابلیت عیب‌یابی این روش به صورت عملی، روش مذکور را روی یک تیر آزمایشگاهی پیاده کرده و مشاهده گردید که همانند نتایج عیب‌یابی در شبیه‌سازی، با افزایش شدت عیب و نویز، موفقیت روش پیشنهادی کاهش می‌یابد. مهمترین نتایج این مقاله که با بررسی جامع نتایج شبیه‌سازی و عملی حاصل شد، به این صورت قابل توضیح است که اولاً همان طوری که انتظار می‌رود، با افزایش نویز، قابلیت این روش کاهش می‌یابد و این مشکل در تمامی روش‌های عیب‌یابی وجود دارد و برای رفع آن تدابیر لازم باید اندیشه شود که جزء برنامه‌های آینده این پژوهش است؛ ثانیاً با افزایش شدت عیب، همگرایی روش با مشکل روبرو می‌شود که دلیل این مسئله به این موضوع بر می‌گردد که افزایش شدت عیب، فرکانس‌های طبیعی مرتبط با حالت سالم سیستم را چنان زیاد تغییر می‌دهد که تناظر اختلاف

- [8] O'Callahan, J., Avitabile, P., Riemer, R., (1989). "System equivalent reduction expansion process (SEREP)", Proceedings of the 7th IMAC, Las Vegas, pp. 29-37.
- [9] Zhang, De-Wen, Li, S., (1995). "Succession-level approximate reduction (SAR) technique for structural dynamic model". 13th International Modal Analysis Conference, Nashville, pp. 435-441.
- [10] Berman, A., Nagy, E., J., (1983), "Improvement of a large analytical model using test data". AIAA, Vol. 21 (8), pp. 1168-1173.
- [11] O'Callahan, J., (1986). "An efficient method of determining rotational degrees of freedom from analytical and experimental model data", 4th International Modal Analysis Conference, Los Angeles, pp. 50-58.
- [12] Lin, R. M., Ewins, D. J., (1994). "Analytical model improvement using frequency response functions". Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 8 (4), pp. 437-458.
- [13] Gravitz, S. I., "An analytical procedure for orthogonalization of experimentally measured modes". Journal of the Aero/Space Sciences, Vol. 25, pp. 721-722.
- [14] Deraemaeker, A., Ladeveze, P., Leconteb, P. H., (2002). "Reduced bases for model updating in structural dynamics base donconstitutive relation error". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineerin, Vol. 191, pp. 2427-2444.
- [15] Kanev, S., Weber, F., Verhaegen, M., (2007). "Experimental validation of a finite-element model updating procedure". Journal of Sound and Vibration, Vol. 300 (1-2), pp.394-413.
- [16] Carvalho, J., Datta, B. N., Gupta, A., (2007). "A direct method for model updating with incomplete measured data and without spurious modes". Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21 (7), pp. 2715-2731.
- [17] Wei-Ming, Li, Jia-Zhen, H., (2011). "New iterative method for model updating based on model reduction". Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 25, pp. 180-192.
- [18] Min Zhang Hua-Jun Li, S.J. Hu, Refinement of reduced-models for dynamic systems, Progress in Natural Science 18 (2008) 993-997.
- [19] Hua-Jun Li, Jun-Rong Wang, S.J. Hu, (2008). "Using incomplete modal data for damage detection in offshore structures". Ocean Engineering, Vol. 35, pp. 1793-1799.
- فرکانس‌ها بین حالت های سالم و معیوب تیر از بین می‌رود و این مسئله، در برنامه بروزرسانی مدل خلل وارد می‌کند. علت این مسئله به این صورت قابل توضیح است که برنامه بروز رسانی با این فرض طراحی شده است که مثلاً فرکانس اول تیر سالم با فرکانس اول تیر معیوب مقایسه شود، در حالی که با افزایش شدت عیب، فرکانس دوم تیر معیوب با فرکانس اول تیر سالم متناظر می‌شود که این مسئله، عامل همگرا نشدن روش می‌شود. این موضوع با توجه به اینکه معمولاً روش‌های عیب‌یابی باید طوری طراحی شوند که در شدت‌های عیب پایین جواب دهند، خللی در قابلیت روش وارد نمی‌نماید. در ادامه این پژوهش، روش پیشنهادی روی سازه کاربردی و عیوب چندگانه با تدابیر لازم برای کاهش نویز (با تحریک بهتر سازه مثلاً با دستگاه لرزاننده و فیلترگذاری) به کار برده خواهد شد.

۷- مراجع

- [1] Doebling, S., W., Farrar, C. R., Prime, M. B., (1998). "A summary review of vibration-based damage identification methods. Shock Vib. Digest., Vol. 30(2), pp. 91-105.
- [2] Nair, K. K., Kiremidjian, A. S., Law, K. H., (2006). "Time series-based damage detection and localization algorithm with application to the ASCE benchmark structure". Journal of Sound Vibration, Vol. 291, pp. 349-368.
- [3] Stubbs, N., Kim, J. T., (1996). "Damage localization in structures without baseline modal parameters". AIAA, Vol. 34(8), pp. 1644-59.
- [4] Barroso, L. R., Rodriguez, R., (2004). "Damage detection utilizing the damage index method to a benchmark structure". ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 130(2), pp. 142-151.
- [5] Feng, M. Q., Kim, D. K., Yi, J. H., Chen, Y., (2004). "Baseline models for bridge performance monitoring". ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 130(5), pp. 562-582.
- [6] Friswell, M. I., Mottershead, J. E., (1995). "Finite element model updating in structural dynamics". Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic.
- [7] O'Callahan, J., (1989). "A procedure for improved reduced system (IRS) Model". Proceedings of the 7th IMAC, Las Vegas, pp. 17-21.