



شناسایی آسیب در سازهها به روش زیر فضای تصادفی مبتنی بر دادههای مرجع

سهیل سرپرست سادات'، امین قلیزاد*ٔ

۱ دانشجوی دکترای مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی ۲ استاد تمام مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

Gholizad@uma.ac.ir *

تاریخ دریافت : ۱٤۰۱/۰۸/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۱/۱۲/۱۰

چکیدہ

ایجاد آسیب در سازه در دوران بهرمبرداری همیشه محتمل است ازاینرو بحث پایش سلامت سازهای مهم به منظور کنترل و مدیریت بهرمبرداری ایمن در سالهای اخیر موردتوجه قرارگرفته است. فرآیند شناسایی و پایش سیستمهای سازهای از طریق روش های مختلفی امکان پذیر بوده و استخراج مشخصههای ذاتی سازههای هدف به منظور تشخیص آسیبهای احتمالی از مبانی روشهای مذکور است. روش زیرفضای تصادفی از جمله روش های شناسایی است که با استفاده از دادههای ثبت شده از پاسخ سیستم به وسیله نصب حسگر و با فرض وجود نویزهای اندازه گیری در دادهها، مشخصههای سازه را ارائه می دهد. با توجه به محدودیت در تعداد حسگرهای قابل نصب به منظور پایش سازه های واقعی، استفاده از روش زیرفضای تصادفی مبتنی بر دادههای مرجع این امکان را فرآهم خواهد آورد که با استفاده از تعداد حسگرهای محلور پایش سازه های مورد بررسی شناسایی شده و در صورت وجود آسیب، محل وقوع آن توسط بهره گیری از روش های متداول موجود قابل تشخیص باشد. در پژوهش حاضر پس زیرفضای تصادفی مبتنی بر دادههای مرجع این امکان را فرآهم خواهد آورد که با استفاده از تعداد حسگرهای محلور باین سازه مورد بررسی شناسایی شده و در صورت وجود آسیب، محل وقوع آن توسط بهره گیری از روش های متداول موجود قابل تشخیص باشد. در پژوهش حاضر پس زیرفضای تصادفی مبتنی بر داده های مرجع این امکان را فرآه هدف با فرض نصب تعداد محدود حسگرهای محدود از خروجی روش وشاسایی شده و در صورت وجود آسیب، محل وقوع آن توسط بهره گیری از روش های متداول موجود قابل تشخیص باشد. در پژوهش حاضر پس شناسایی شده و در صورت ورد و تحلیل دینامیکی چند نمونه سازه هدف با فرض نصب تعداد محدود حسگره می نتایج حاصل از خروجی روش زیرفضای تصادفی مبتنی بر داده های مرجع مورد بهره برداری قرار گرفته است. در ادامه با استفاده از تغییرات انرژی کرنشی مودال اعضا و رویکرد احتمالاتی، فرآیند تشخیص آسیب در اعضای آسیب دیده سازه هدف با خرص نصب در ادامه با استفاده در تغییرات انرژی کرنشی مودال اعضا و رویکر د وارارگرفته است. بر اساس نتایج حاصل شده از خروجی فرآیند پیشنهادی، اعضای آسیب دیده با دقت زیادی شناسایی شده و قابل تشخیص

کلیدواژهها: تشخیص آسیب، مدلسازی اجزای محدود، تحلیل دینامیکی، روش شناسایی زیرفضای تصادفی، انرژی کرنشی مودال.

۱- مقدمه

در طول دهههای اخیر بحث پایش سلامت سازههای مهم موردتوجه قرارگرفته و ایدههای مختلفی به منظور شناسایی

دقیق مشخصات دینامیکی سازه ها پیشنهاد شده است[1]. با توجه به محدودیت در زمینهی استفاده از تعداد کافی حسگر و نیز وجود عدم قطعیت در حوزهی پایش دادهها و در حوزهی

شناسایی آسیب در سازهها به روش زیر فضای تصادفی مبتنی بر ...

ترک باز در یک تیرآهن فولادی مدلسازی شده تشخیص دهد [5]. ساهو و نایاک به منظور محلی سازی المان های آسیب-دیده در سازه هدف در قالب پیشنهاد یک الگوریتم تکاملی، با فرض استفاده از الگوريتم ژنتيک ضمن شناسايي دقيقتر المان آسیبدیده، موفق به ارائه روشی برای بهبود سازگاری الگوریتم ژنتیک در فرآیند شناسایی آسیب در سازه شدند[6]. عمر و همکاران روشی را مبتنی بر خوشهبندی سنسورها برای شناسایی آسیب ساختاری تحت ارتعاش محیطی ارائه و مورد استفاده قرار دادند. این مطالعه کشف آسیب مبتنی بر خوشه سنسور را فراتر از محدودیت ارتعاش آزاد بررسی میکند تا امکان استفاده مستقیم از سریهای زمانی برای شناسایی آسیب تحت لرزش محیطی را فراهم کند. کارایی روش پیشنهادی ابتدا با استفاده از دادههای آزمون یک سیستم ۸ درجه آزادی و در ادامه با انجام یک مطالعه تجربی در مورد مدلهای آزمایشگاهی فولادی مقیاسپذیر با آسیبهای مختلف ارزیابی شده است و نتایج به دست آمده نشان میدهد که روش پیشنهادی می تواند به طور رضایت بخشی میزان آسیب را در نمونهها، به صورت دقيق تخمين بزند[7]. مندلر و همكاران با فرض وجود عدم قطعیتهایی که در فرآیند شناسایی آسیب در سازهها تاثیرگذار خواهند بود، با استفاده از روش زیرفضای تصادفی و در قالب یک مجموعه دادههای آماری نسبت به شناسایی آسیب در سازه اقدام نموده و نشان دادند که کمترین آسیب قابل شناسایی به عناصری مانند عدم اطمینان از ویژگی-های حساس به آسیب، حساسیت نسبت به پارامترهای طراحی مبتنی بر مدل و الزامات قابلیت اعتماد در برابر نتایج تشخیص آسيب وابسته خواهد بود[8].

بهرهبرداری از دادههای مستخرج از حسگرهای کارگذاشته شده در ساختار سازه به منظور استخراج مشخصههای ذاتی سیستم گام اصلی هنگام شناسایی آسیب در سازهها است. با توجه به مطالعات صورت گرفته روش زیرفضای تصادفی یک روش قدرتمند در شناسایی مشخصات دینامیکی سازه است.

مدلسازی صحیح سازهی مورد بررسی، ازاینرو استخراج مشخصههای ذاتی سازه قطعاً دارای رواداری خواهد بود. بنابراین فرآیندهایی که با در نظر گرفتن هرچه بیشتر عدم قطعیتهای مسئله، امکان افزایش دقت، کارایی و بهبود روش-های دخیل در حوزه پایش سلامت سازهها را ایجاد میکنند بسیار مقبول واقع شدهاند. روشهای مختلفی تحت عنوان آنالیز مودال محیطی یا خروجی تنها معرفی و مورد بررسی قرارگرفتهاند که هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس توسعه داده شدهاند. از جمله روشهای حوزه زمان می توان به روش زیرفضای تصادفی ٔ اشاره نمود[2]. تارینژاد و همکاران با ارائه یک آنالیز مودال پیشنهادی در قالب روش زیرفضای تصادفی که امکان استخراج بردالهای فضای داده را مستقیما در فضای پیشبینی فرآهم میآورد، باعث افزایش دقت در حذف قطبهای ناپایدار شده و توانستند زمان تحلیل را نیز كاهش دهند. ایشان به منظور راستی آزمایی الگوریتم پیشنهادی نتایج آزمایش ارتعاش اجباری سد شهید رجایی ساری که به روش تحریک سینوسی پایا انجام شده بود در قالب تحلیل مذکور مورد بررسی قرارداده و موفق به شناسایی دقیقتر فرکانس،ها و میرایی مدل پیشنهادی شدند[3]. عارفی و همکاران با ارائه شاخص تعیین خرابی اصلاح شده در قالب استفاده از روش انرژی کرنشی مودال ً و با فرض تعداد محدود حسگر موفق به شناسایی اعضای آسیب دیده در سازه شدند. شاخص پیشنهادی با استفاده از بازسازی اشکال مودی در درجات آزادی فاقد حسگر با قابلیت اعتماد بیشتری در یافتن مكان اعضاى أسيب ديده عمل كرده است[4]. كولا با استفاده از پردازش دادههای خروجی تنها و ارائه یک روش مقاوم در برابر عدم قطعیتها در قالب عملکرد احتمالاتی رویکرد بیزی ٔ به وسیله سنجش سیگنال ثبت شده برای هر حسگر، محل آسیب را شناسایی نموده است. او در ادامه با شبیهسازیهای عددی برای یک سازهی پل تحت تحریکهای تصادفی ناشناخته و آثار مختلف محیطی توانست خسارت را به صورت

¹⁻ Operational Modal Analysis(OMA) - Output Only Modal Analysis(OOMA)

^{2 -} Stochastic subspace identification (SSI)

^{3 -} Modal Strain Energy(MSE)

^{4 -} Bayesian Approaches

 (\mathbf{k})

 $y(t) = C_c x(t) + D_c u(t)$

که $D_c \in \mathbb{R}^{l \times m} \supset D_c$ ماتریس خروجی و $D_c \in \mathbb{R}^{l \times m} \supset D_c$ به عنوان ماتریس انتقال مستقیم تعریف خواهد شد. معادلات ذکر شده در قالب یک مدل فضای حالت زمان پیوسته میباشد لیکن با توجه به اینکه نمونه برداریها به صورت گسسته در بازههای زمانی the tait is the metric of the terminant of the terminant of و نویزها در دادههای بدست آمده تأثیرگذار خواهند بود. با در نظر گرفتن مفهوم مقادیر ویژه و نیز مفهوم فرم جردن ماتریس و روابط مربوط به سری تیلور، میتوان شکل گسسته ماتریس-های حالت، ورودی، خروجی و انتقال مسقیم را به شکل زیر در نظر گرفت:

 $A = e^{A_cT}, B = \left(\int_0^T e^{A_cT} d\tau\right) B_c, C = C_c, D = D_c \quad (\forall)$ $H = C_c \quad \text{identify} \quad \text{id$

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k = Ax_k + Bu_k + w_k$$

$$y_k = Cx_k + Du_k = Cx_k + Du_k + v_k$$
(A)

بطوریکه $(k \Delta t) = x_k = x(kT) = x(k \Delta t)$ درنظر گرفته شده و بطوریکه $w_k \in R^{n \times 1}$ در مدلسازی و $w_k \in R^{n \times 1}$ بردار نویز عدم قطعیت در اندازه گیری فرض شده است. هر دو نویز غیر قابل اندازه گیری میباشند ولی اگر نویزها به صورت نوفه سفید با میانگین صفر و توزیع گوسی و مستقل از هم در نظر گرفته شود در این صورت ماتریس کواریانس این دو نویز با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها به صورت زیر قابل تعریف خواهد بود[11]:

$$E\left[\binom{w_p}{v_p}\left(w_q^T \ v_k^T\right)\right] = \binom{Q \ S}{S^T \ R} \delta_{pq}$$
(9)

که E بیانگر امید ریاضی و δ_{pq} به عنوان دلتای کرونیکر بوده و $R \in R^{I \times l}$, $S \in R^{n \times l}$, $Q \in R^{n \times n}$ به عنوان ماتریس های کواریانس نویزهای w_k و w_k هستند. در صورت تمرکز در مسائل تجربی، مقدار u_k از معادلات شماره (۸) زایل خواهد شد چرا که این مقدار در قالب نویز نشان داده می شود. در این

۲– روش شناسایی زیر فضای تصادفی (SSI)

مدل دینامیکی یک سیستم مکانیکی گسسته با مجموعهای شامل n₂ جرم متصل شده با میراگر و فنر را میتوان به صورت معادله دیفرانسیل خطی مرتبه دوم با ضرایب ثابت به صورت زیر بیان نمود:

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) \qquad (\Upsilon)$$

$$x(t) = \begin{pmatrix} U(t) \\ \dot{U}(t) \end{pmatrix}, A_c = \begin{pmatrix} 0 & I_{n_2} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C_2 \end{pmatrix},$$

$$B_c = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}B_2 \end{pmatrix} \qquad (\Upsilon)$$

در این معادلات، $A_c \in \mathbb{R}^{n \times n}$ به عنوان ماتریس حالت سیستم $A_c \in \mathbb{R}^{n \times n}$ حالت $X(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ ورودی و $X(t) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ بردار حالت بوده و برای مقادیر عددی n حالت قابل تعریف است. با توجه به اینکه با I حسگر تعبیه شده در سیستم میتوان شتاب، سرعت و جابهجایی را پایش نمود ازاینرو میتوان معادله زیر را ارائه نمود[10]:

شناسایی آسیب در سازهها به روش زیر فضای تصادفی مبتنی بر ...

حالت برای مدل فضای حالت تصادفی گسسته می *تو*ان معادلات را بدون u_k به فرم زیر ارائه داد:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A x_k + w_k \\ y_k &= C x_k + U_k \end{aligned}$$
(1.)

در ادامه با فرض فرآیند تصادفی مانا با میانگین صفر $E[\mathbf{x}_k x_k^T] = \Sigma, E[\mathbf{x}_k] = 0$ ، آنگاه ماتریس کوواریانس حالت Σ به صورت مستقل از زمان k خواهد بود. همچنین w_k, v_k , w_k به عنوان نویزهای دخیل در مسئله مستقل از حالت w_k, v_k منید و کواریانس $E[\mathbf{x}_k v_k^T] = 0, E[\mathbf{x}_k w_k^T] = 0$ متغیر خروجی با متادیر آنها در i گام زمانی بعدی با ماتریس متغیر یا ماتریس (Λ_i) و کواریانس متغیر خروجی با متغیر حالت در گام زمانی بعدی با ماتریس می

$$\Lambda_{i} \equiv E[y_{k+i}y_{k}^{T}] \in \mathbb{R}^{l \times l}$$

$$(11)$$

$$G \equiv E[x_{k+1}y_{k}^{T}] \in \mathbb{R}^{n \times l}$$

$$(17)$$

با توجه به تعاریف بالا، خواص زیر را برای معادلات بیان شده می توان استنباط نمو د[12]:

$$\Sigma = A \Sigma A^{T} + Q$$

$$\Lambda_{0} = C \Sigma C^{T} + R$$

$$G = A \Sigma C^{T} + S$$

$$\Lambda_{i} = C A^{i-1} G$$
(1°)

در سازههای با تعداد المانهای متعدد که امکان استفاده از تعداد حسگرها به تعداد معادل با درجات آزادی سازه هدف وجود ندارد، ثبت دادهها از تمام درجات آزادی میسر نخواهد بود پس با فرض چندین مجموعه از حسگرها که امکان همپوشانی اطلاعات اندازه گیری شده را فرآهم می آورند، می-توان اطلاعات را ارزیابی نمود. در این شرایط خروجی هایی به عنوان خروجی مرجع در نظر گرفته می شوند که به صورت بهینه بتوانند مودهای ارتعاشی سیستم را با استفاده از دادههای اندازه گیری شده ارائه کنند. بنابراین می توان خروجی ها را با فرض خروجی های مرجع به شکل زیر نوشت[11]:

$$\begin{split} y_k &\equiv \begin{pmatrix} y_k^{ref} \\ y_k^{\sim ref} \end{pmatrix}, y_k^{ref} = Ly_k, L \equiv [I_r 0] \quad (10) \\ \text{y}_k^{\sim ref} &\in R^{r \times 1} \quad \text{(10)} \\ \text{y}_k^{ref} &\in R^{r \times 1} \quad \text{(10)} \\ \text{y}_k^{ref} &\in R^{r \times 1} \quad \text{(10)} \\ \text{y}_k^{-ref} &\in R^{(l-r) \times 1} \\ \text{y}_k^{-ref} &\in R^{(l-r) \times 1} \\ \text{y}_k^{ref} &= A_{r \times 1} \quad \text{(10)} \quad \text{(10)} \\ \text{y}_k^{ref} &= A_{r \times 1} \quad \text{(10)} \quad \text{(10)} \\ \text{y}_k^{ref} &= A_{r \times 1} \quad \text{(10)} \quad \text{(10)}$$

این حالت می توان ماتریس کواریانس مابین خروجی های مرجع و تمام خروجی ها را در یک گام زمانی بعد و همچنین ماتریس کواریانس خروجی های مرجع با متغیرهای حالت در یک گام زمانی بعد را ارائه نمود:

$$\Lambda_i^{nef} = E[y_{k+i} y_k^{nef^T}] = \Lambda_i L^T = \Lambda_i A^{i-1} G^{nef} \in \mathbb{R}^{l \times r}$$
(17)

$$G^{ney} = E[x_{k+1}y_k^{ney}] = GL^1 \in \mathbb{R}^{n \times r}$$
(1V)

در ادامه تمامی مقادیر اندازهگیری شده در یک ماتریسی بنام ماتریس هنکل[°] با *2i* بلوک و *j* ستون جمع آوری شده است. می توان ماتریس هنکل را با توجه به لحظهای که نسبت به آن بررسی ها صورت می گیرد، به دو قسمت گذشته و آینده و با اندیس های *q* و*f* تقسیم نمود.

$$H = \frac{1}{\sqrt{j}} \begin{bmatrix} y_{0}^{ref} & y_{1}^{ref} & \cdots & y_{j-1}^{ref} \\ y_{1}^{ref} & y_{2}^{ref} & \cdots & y_{j}^{ref} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{y_{i-1}^{ref} & y_{i}^{ref} & \cdots & y_{i+j-2}^{ref} \\ y_{i} & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+j} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \cdots & y_{2i+j-2} \end{bmatrix}$$
$$H = \left(\frac{Y_{0|i-1}}{Y_{i|2i-1}}\right) = \left(\frac{Y_{p}}{Y_{f}}\right) \frac{past}{future} \in R^{(r+1)i \times j}$$
(1A)

در ادامه می توان ماتریس مشاهده پذیری تعمیم یافته^۲ و ماتریس کنترل پذیری تصادفی تعمیم یافته معکوس مبتنی بر داده های مرجع^۷ را نیز به صورت زیر بیان نمود که مرتبه ماتریس مشاهده پذیری برابر *n* خواهد بود.

$$O_{i} = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^{2} \\ \dots \\ CA^{i-1} \end{pmatrix} \in R^{li \times n}$$
(Y•)

$$C_{i}^{\text{ref}} \equiv \left(A^{i-1}G^{\text{ref}} A^{i-2}G^{\text{ref}} \cdots AG^{\text{ref}} G^{\text{ref}}\right) \in R^{n \times n}$$
(Y)

 $\wedge \wedge$

^{5 -} Hankel matrix

^{6 -} Extended Observability matrix

^{7 -} reference reversed extended stochastic controllability matrix

که از قبل O_i, C_i^{ref} شناخته شده بودند پس با استفاده از معادلات (۲۰ و ۲۱)، C برابر اولین بلوک ردیفی ماتریس مشاهدهپذیری است و G^{ref} معادل آخرین بلوک ستونی ماتریس کنترلپذیری G_i^{ref} است. ازاینرو ماتریس حالت A را می توان از تجزیه ماتریس توپلیس جدید با یک بلوک شیفت شده به صورت زیر بدست آورد:

 $T_{2|i+1}^{ref} = O_i A C_i^{ref}$ (YV)

با حل معادله (۲۷) و در نظر گرفتن معادله (۲٦) ماتریس حالت به فرم زیر قابلیت بازنویسی خواهد داشت:

 $A = O_i^{\dagger}T_{2|i+1}^{ref}C_i^{ref} = S_i^{-\frac{1}{2}}U_1^TT_{2|i+1}^{ref}V_1S_i^{-\frac{1}{2}}$ (7A) '' در معادله بالا علامت [†](•) بیانگر شبه معکوس ماتریس است. با معلوم بودن مقدار ماتریس حالت A مسئله شناسایی سیستم تمام شده است.

۲ –۲– تحلیل پس پردازش – آنالیز مودال^{۱۲}

با شناسایی سیستم، ماتریس حالت A بدست می آید که رفتار دینامیکی سیستم به صورت کامل و با در نظر گرفتن هم ارزی معادله های (۱ و ۲) مقادیر ویژه در حالت زمان پیوسته به صورت زیر قابل تعریف است[15]:

$$\begin{split} A_c = \Psi_c \Lambda_c \Psi_c^{-1} & (\mathfrak{P} \cdot \mathbf{I}) \\ \text{ , and the matrix of the$$

$$A = \exp(A_c \Delta t), \Psi_c = \Psi, \lambda_{c_q} = \frac{\ln(\lambda_c)}{\Delta t}$$
(٣١)

$$\lambda_{c_q}, \lambda_{c_q}^* = -\xi_q \omega_q \pm j \omega_q \sqrt{1 - \xi_q^2}$$
(TY)

 ω_q و p_q به عنوان نسبت میرایی مودال مود p و ω_q فرکانس مود p (*rad/sec*) میباشد. اشکال مودی در محل حسگرها به صورت ماتریسهای ستونی Φ_q از $^{n\times l} J
ightarrow \Phi$ قابل تعریف بوده و به صورت قسمت قابل مشاهده بردارهای ویژه سیستم Ψ بوده و از طریق معادله زیر بدست می آید:

11- Pseudo-inverse of a matrix

12 - Postprocessing- Modal Analysis

۲-۱- روش زیرروش تصادفی کواریانس محور مبتنی بردادههای مرجع(SSI-cov-ref)^

در روش زیرفضای تصادفی بر مبنای استفاده از کواریانس دادههای مرجع با ساخت تابع کواریانس مربوط به دادههای خروجی به صورت [$\Lambda_i^{ref} = E[y_{k+i}y_k^{ref^T}]$ ، مقادیر کواریانس بدست آمده در یک ماتریسی بنام ماتریس توپلیس^۹ که یک ماتریس قطر ثابت بوده و هر زیر قطر از سمت چپ به راست دارای مقدار ثابت میباشد جمع آوری میشود[13,14]:

$$T_{l|i}^{ref} = \begin{pmatrix} \Lambda_{i}^{ref} & \Lambda_{i-1}^{ref} & \cdots & \Lambda_{1}^{ref} \\ \Lambda_{i+1}^{ref} & \Lambda_{i}^{ref} & \cdots & \Lambda_{2}^{ref} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \Lambda_{2i-1}^{ref} & \Lambda_{2i-2}^{ref} & \cdots & \Lambda_{i}^{ref} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{li \times ri}$$
(YY)

با استفاده از معادله (۱۸) ماتریس توپلیس را می توان به صورت فرم زیر بازنویسی نمود:

$$\Gamma_{1|i}^{ref} = Y_f Y_p^{ref^T}$$
(YT)

در ادامه با در نظرگرفتن معادله (۱۹) و با استفاده از روش تجزیه مقادیرمنفرد (SVD)^۱ ماتریس توپلیس، میتوان فرم تفکیک و تجزیه شده این ماتریس را نیز به صورت زیر ارائه نمود[11]:

$$T_{1|i}^{nf} = Y_{f}Y_{p}^{nf^{T}} = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \cdots \\ CA^{i-1} \end{pmatrix} \left(A^{i-1}G^{nf} A^{i-2}G^{nf} \cdots AG^{nf}G^{nf} \right)$$

$$T_{1|i}^{nef} = O_i C_i^{nef}$$
(Y2)

$$T_{1|i}^{ref} = USV^{T} = (U_{1} \quad U_{2}) \begin{pmatrix} S_{1} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{1}^{T} \\ V_{2}^{T} \end{pmatrix} = U_{1}S_{2}V_{1}^{T}$$
(Yo)

به طوریکه $U \in R^{li \times li}$ و $V \in R^{ri \times n}$ ماتریس های متعامد بوده $U \in R^{li \times li}$ و از طرفی نیز $U^T U = UU^T = I_{ii}, \nabla^T V = VV^T = I_{ii}$ و از طرفی نیز $S \in R^{li \times n}$ یک ماتریس قطری است که مقادیر منفرد و ویژه را به ترتیب نزولی ارائه خواهد نمود. در ادامه با معادل قرار دادن روابط (۲۶ و ۲۵) می توان نوشت :

$$O_{i} = U_{1}S_{1}^{\frac{1}{2}}$$

$$C_{i}^{ref} = S_{1}^{\frac{1}{2}}V_{1}^{T}$$
(77)

9 - Toeplitz matrix

^{8 -} Reference-Based Covarianc-Drive Stochastic Subspace

^{10 -} Singular-Value Decomposition

سهیل سرپرست سادات و امین قلیزاد

شناسایی آسیب در سازهها به روش زیر فضای تصادفی مبتنی بر ...

دیده برای m مود اول انتخابی را نشان خواهد داد. در این صورت انرژی کرنشی مودال المان *j* ام قبل و بعد از آسیب به فرم رابطه زیر است:

$$MSE_{j}^{u} = \sum_{i=1}^{m} \Phi_{i}^{T} K_{j} \Phi_{i}$$
$$MSE_{j}^{d} = \sum_{i=1}^{m} \Phi_{i}^{dT} K_{j} \Phi_{i}^{d}$$
(ro)

از طرفی برای محاسبه انرژی کرنشی مودال کل سازه با n تعداد المان در مود iام، قبل و بعد از آسیب فرم زیر قابل ارائه است:

$$MSE_{i}^{u} = \sum_{j=1}^{n} MSE_{ij}^{u} , j = 1,...,n$$
$$MSE_{i}^{d} = \sum_{j=1}^{n} MSE_{ij}^{d} , j = 1,...,n$$
(17)

در ادامه با فرض مقدار بی بعد شده انرژی کرنشی مودال برای هر مود میتوان یک شاخص معنیدار برای محلیسازی آسیب که به صورت زیر تعریف شده ارائه نمود:

$$NMSE_{ij} = \frac{MSE_{ij}}{MSE_i}, j = 1, ..., n$$
 (TV)

به طوریکه _{ij} *NMSE* انرژی کرنشی مودال نرمالیزه^۱ المان *j* ام در مود *i*ام می باشد. از این رو با استفاده از نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال(*MSECR*_{ij})^۱ اعضای سازه ای که در قالب رابطه زیر ارائه می شود می توان پایش سازه را انجام داد:

$$MSECR_{ij} = \max\left(0, \frac{NMSE_{ij}^{d} - NMSE_{ij}^{u}}{NMSE_{ij}^{u}}\right) \quad (\Upsilon\Lambda)$$

که در این رابطه $MSECR_{ij}$ شاخص نسبت تغییرات انرژی کرنشی عضو i در مود i میباشد که در اعضای سالم عدد صفر ودر اعضای ناسالم عددی بزرگتر از صفر را ارائه میدهد. با توجه به این مفهوم میتوان شاخص انرژی کرنشی مودال عضو i ام ($MSECR_{i}$) که با فرض mm تعداد مود اول پاسخ سازه قابل ارائه خواهد بود را به فرم زیر تعریف کرد به طوریکه i = 1,...,nm

$$MSECR_{j} = \max\left(0, \frac{\sum_{i=1}^{nm} NMSE_{ij}^{d} - \sum_{i=1}^{nm} NMSE_{ij}^{u}}{\sum_{i=1}^{nm} NMSE_{ij}^{u}}\right)$$
(٣٩)

 $\Phi = C \Psi$ (۳۳) طی روابط ارائه شده در این بخش نشان داده شد که پارامترهای مودال Φ_q, ξ_q, ω_q را از ماتریسهای شناسایی

سیستم A و C می توان بدست آورد. در مقاله حاضر با استفاده از روش زیرفضای تصادفی بر مبنای دادههای مرجع ضمن فرض استخراج دادههای سیستم با استفاده از تعداد محدود حسگر، به جای استفاده از روشهای کاهشی و یا افزایشی معمول، نسبت به شناسایی سازه هدف با اطلاعات ناقص در دسترس اقدام شده و در تلفیق نتایج حاصل شده با روشهای انرژی کرنشی مودال و راهبرد بیزی اعضای آسیبدیده در سازه مورد شناسایی دقیق قرار گرفتهاند.

۳- محلیسازی آسیبهای سازهای

با توجه به ارتباط مستقیم مقدار انرژی کرنشی مودال با پارامترهای ذاتی اعضا مانند مدول الاستیسیته و به دنبال ماتریس سختی و اشکال مودی در سازههای آسیب دیده، ازاینرو به منظور شناسایی و تعیین محل آسیب میتوان از روش انرژی کرنشی مودال استفاده نمود. با علم به امکان اثرگذاری عضو آسیبدیده در میزان انرژی کرنشی مودال اعضای سالم مجاور، ازاینرو با استفاده از رویکرد بیزی که به صورت احتمالاتی با درنظرگرفتن منابع مختلف میزان احتمال آسیبدیدگی را برای اعضا ارائه میدهد، تحت فرآیند شناسایی، محل دقیق آسیب تعیین میشود.

۳- ۱- روش انرژی کرنشی مودال(MSE) ^{۱۳}

انرژی کرنشی مودال برای المان *j* ام در مود *i* ام در حالت قبل و بعد از آسیبدیدگی به صورت زیر تعریف می شود [17,16]:

 $MSE_{ij}^{u} = \Phi_{i}^{T}K_{j}\Phi_{i}, MSE_{ij}^{d} = \Phi_{i}^{dT}K_{j}\Phi_{i}^{d}$ (٣٤) $MSE_{ij}^{u}, MSE_{ij}^{u}$ (٣٤) به ترتیب انرژی کرنشی مودال المان i ام در مود i ام سازهی آسیب ندیده و آسیب دیده را ارائه میدهد. K_{j} ماتریس سختی سازه شامل مولفههای ناشی از المان i ام، i, Φ_{i}^{d}, Φ_{i} بردار شکل مود i ام سازه سالم و آسیب

^{14 -} Normal Modal Strain Energy (NMSE)

^{15 -} Modal Strain Energy Change Ratio (MSECR)

^{13 -} Modal Strain Energy Method (MSE)

۳-۲- راهبرد بیزی:

رویکرد بیزی یک روش مبتنی بر قضیه بیز بهمنظور درک آماری با استفاده از دادههای استخراج شده از منابع مختلف است. چارچوب نظریه بیزی از نظر ریاضی به صورت زیر قابل ارائه است[18]:

$$P(\theta|D) = \frac{P(D|\theta)P(\theta)}{P(D)} \qquad (\varepsilon \cdot)$$

به طوریکه P(heta) تابع توزیع احتمال فضای طراحی در صورت عدم وجود هرگونه داده است که تابع توزیع پیشین نیز نامیده میشود و $D = (y_1, ..., y_N)$ یک ماتریس حاوی دادهها است. عبارت P(heta|D) تابع توزيع احتمال پسين پس از مشاهده دادهها بوده و $P\left(D\left| heta
ight)$ تابع احتمال و $P\left(D\left| heta
ight)$ تابع نرمالیزه است و همچنین به عنوان شاهد نیز شناخته می شود. روش های ترکیب اطلاعات می توانند داده های مستخرج از منابع اطلاعاتی متعدد و مرتبط با یکدیگر را ترکیب کنند تا نتایج با دقت بیشتری نسبت به آنچه که با استفاده از تنها یک منبع اطلاعاتی قابل دریافت خواهد بود بدست آید. در صورت مواجهه با یک سیستم اطلاعاتی متشکل از L منبع اطلاعاتی، یک تصمیم کلی و همهجانبه بر اساس ترکیب دادههای تمام یا قسمتی از منابع به دست میآید. با فرض L منبع اطلاعاتی مستقل $S_1, S_2, ..., S_L$ و تعداد NE مستقل $S_1, S_2, ..., S_L$ مسئله شناسایی قابل انجام است. در تئوری $A_1, A_2, ..., A_{\scriptscriptstyle NE}$ $P(A_i)(i = 1, 2, ..., NE)$ بيزى، احتمال قبلى هر گزاره با نشان داده می شود. با عنایت به اینکه در همان مقطع زمانی شرطى احتمال مقادير از قبل شناخته $P(S_1, S_2, ..., S_L | A_i), A_i (i = 1, 2, ..., NE)$ شده است، بنابراین با توجه به فرمول بیزی، ترکیب بیزی را می توان به صورت زیر برای احتمال یک گزاره تحت منابع اطلاعاتی متعدد به فرم زیر ارائه کرد:

$$P(A_{i}|S_{1},S_{2},S_{L}) = \frac{\prod_{k=1}^{L} P(S_{k}|A_{i}) P(A_{i})}{\sum_{j=1}^{NE} \prod_{k=1}^{L} P(S_{k}|A_{j}) P(A_{j})} \quad (\xi)$$

بطوریکه کاربرد روش انرژی کرنشی مودال برای شناسایی آسیب و محل آن در سازه ها اغلب تحت شرایطی همچون وجود نویز و اندرکنش اعضا باعث شناسایی آسیب در اعضای سالم نیز می شود لذا برای رفع این مشکل می توان از ترکیب اطلاعات به روش تئوری بیزی که ارائه شده است بهره گرفت. با تعریف شاخص انرژس کرنشی مودال برای هر منبع اطلاعاتی تحت عنوان هر مود می توان به فرم زیر نوشت[19]: $S_L = \{MSECR_{L1}, MSECR_{L2}, ..., MSECR_{L1}\} = S_L$ بنابراین احتمال آسیب دیدگی اعضا در هر مود قابل ارائه خواهد بود:

$$P_{L}(A_{i}) = \frac{MSECR_{Lj}}{\sum_{j=1}^{NE} MSECR_{Lj}}, j = 1, ..., NE$$
 (£r)

بطوریکه $(A_i) P_L(A_i)$ احتمال آسیب دیدگی محاسبه شدهی عضو A_i از منبع اطلاعاتی S_L میباشد که در رابطه (٤١) تعریف شده است و در نهایت احتمال آسیب دیدگی هر عضو قابل ارائه خواهد بود. لازم بذکر است که عبارت (A_i) معادل احتمال آسیب دیدگی پیشین المان بوده و به قرار زیر تعریف می شود:

$$P\left(A_{i}\right) = \frac{1}{NE}, i = 1, 2, \dots, NE$$
 (11)

در نهایت اعضایی که با فرض سه مود اول پاسخ سازه در قالب سه منبع اطلاعاتی دارای بیشترین احتمال آسیبدیدگی باشند به عنوان عضو آسیب دیده شناسایی خواهند شد.

٤ - الگوريتم بهينه سازي ژنتيك'':

الگوریتم ژنتیک با فرض فرآیند تکامل در طبیعت، ضمن استفاده از فرآیندهای جستجوی هوشمند به منظور یافتن بهینه-ترین جواب ممکن برای یک مسئله در قالب جستجو در فضای جوابهای محتمل اقدام میکند. در این نوع از فرآیند بهینهسازی با استفاده تصادفی از مجموعه وسیعی از دادههای فرضی به عنوان جمعیت اولیه، امکان ارائه جوابهای بهینه کلی را ایجاد میشود که هر یک از جوابهای ممکن تولید

^{16 -} Genetic Algorithms Optimization

سهیل سرپرست سادات و امین قلیزاد

شناسایی آسیب در سازهها به روش زیر فضای تصادفی مبتنی بر ...

$$f = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} MAC_{ij}^{2}}, i \neq j$$
 (20)

در صورت فرض آسیب دیده بودن سازه هدف اعضای غیرقطری ماتریس مذکور مقادیر حداقلی نخواهد داشت پس در هر دور از فرآیند بهینه سازی تابع هدف تحت چیدمان مشخصی از حسگرها به یک مقدار حدقلی میل کرده و نهایتا منجر به ارائه مکان بهینه نصب حسگرها خواهد شد. ضمنا در این رابطه پارامتر *n* بیانگر تعداد درجات آزادی است.

٥- روش شناسی فر آیند مورد استفاده برای شناسایی آسیب

در این پژوهش هدف آن است که اعضای آسیبدیده در سازه مورد بررسی در قالب استفاده تلفیقی از روش زیرفضای تصادفی، روش انرژی کرنشی مودال و راهبرد بیزی به صورت دقیق شناسایی شده و در ادامه بهینهترین جایگشت حسرهای محدود در دسترس با فرض سناریوی خرابی مشخص برای سازهی هدف ارائه گردد که فرآیند مذکور در قالب شکل شماره (۱) ارائه شده است.



Fig. 1. Flowchart of damage detection process

شده با پایش و بهینه نمودن تابع هدف^{۱۷} مورد ارزیابی قرار میگیرد. در گام بعدی که به عنوان نسلی جدید از جوابها قابل طرح است با در نظر گرفتن عملگرهای تکاملی که بر جواب-های اولیه قابلیت اعمال دارد جمعیت جوابهای جدید تولید می شود که با استفاده مجدد از تابع تناسب مورد ارزیابی قرار گرفته و بدینوسیله فضای متغییرها و جوابهای ایجاد شده به سمت تکامل پیش میرود به گونهای که در هر نسل جمعیت جوابها به سوی جواب بهینه همگرا گردد[20]. در الگوریتم ژنتیک برای تولید جوابها در نسل جدید از عملگرهای تکاملی انتخاب، ترکیب و جهش استفاده می شود.

٤ - ۱ - شاخص بهینهسازی

شاخص اطمینان MAC یا همان معیار تضمین مودال در واقع مقایسه ارتباط مابین اشکال مودی تجربی و تحلیلی را انجام داده و برای این منظور از رابطه زیر پیروی می نماید:

$$MAC\left(\left\{\phi_{t}\right\},\left\{\phi_{e}\right\}\right) = \frac{\left|\left\{\phi\right\}_{t}^{*T}\left\{\phi\right\}_{e}\right|^{2}}{\left(\left|\left\{\phi\right\}_{t}^{*T}\left\{\phi\right\}_{t}\right|\right)\left(\left|\left\{\phi\right\}_{e}^{*T}\left\{\phi\right\}_{e}\right|\right)\right)}$$
(£7)

در این رابطه ${}_{2}\{\phi\}, {}_{3}\{\phi\}, {}_{7}\{\phi\}$ بترتیب برابر بردار اشکال مودی تجربی و تحلیلی بوده و T ترانهاده و علامت * معرف مزدوج مختلط بردار خواهد بود. این معیار بیانگر میزان انحراف معیار حداقل مربعات نقاط از یک همبستگی مستقیم است و به حداقل رساندن عبارتهای غیرقطری ماتریس مذکور نشان دهنده مجموعهای از بردارها با ارتباط مناسب خواهد بود[22,21]. با فرض تعداد و محل اولیه نصب حسگرهای محدود در دسترس به صورت تصادفی و با استفاده از معیارهای محلیسازی آسیب اشاره شده در بخش قبل، میایهای با استفاده از شاخص MAC تعیین خواهد شد. بهینهیابی با استفاده از شاخص MAC تعیین خواهد شد. مقایسه صلاحیت نقاط انتخاب شده توسط الگوریتم ژنتیک به وسیله تابع هدف انجام می شود. در این صورت تابع هدف به فرم زیر قابل تعریف خواهد بود:

^{17 -} Objective Function

٦- مدل سازی عددی

در این بخش به ارزیابی فرآیند پیشهادی به منظور شناسایی آسییب سازهای پرداخته شده و با استفاده از ۳ نوع سازه در قالب تیردوسرگیردار، خرپای مسطح و قاب یک طبقه یک دهانه فرآیند پیشنهادی بررسی خواهد شد. تمام شبیهسازیها با فرض روش اجزای محدود در نرمافزار متلب انجام شده است.

1-1- خرپای مسطح

یک خرپای دو بعدی مسطح با تعداد ۹ گره با دو درجه آزادی انتقالی افقی و عمودی برای هر گره و ۱۸ المان مفروض بوده که سطح مقطع اعضا ۲۰۰۴ مترمربع (m²) و مدول الاستیسیته اعضا برابر ۷۰ گیگاپاسگال (Gpa) و چگالی اعضا نیز ۲۷۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب (kg/m³) در نظر گرفته شده است. قیدهای فرضی در این مثال در قالب قیدهای جابه جایی در محل گرهها اعمال شده است. بنابراین می توان بیان نمود که سازه دارای ۱۸ درجه آزادی بوده و درجات آزادی ۱ و ۲ (درجات آزادی افقی و قائم گره شماره ۱) و درجه آزادی ۱۸ (درجه آزادی قائم گره شماره ۱) با فرض وجود تکیه گاه مقید شده است که در شکل شماره (۲) خرپای توصیفی ارائه شده است.

شکل۲: خرپای دوبعدی مسطح



به منظور ثبت پاسخ سیستم در حالت خروجی تنها، ورودی به صورت نوفه سفید فرض شده و مدل تحت تحلیل دینامیکی قرار گرفته به شکلی که نیروهای اعمالی به شتاب (ورودی روش زیرفضای تصادفی) در مختصات گرهی برای یک عضو از خرپای مسطح مرتبط می شوند. در ادامه نتایج به صورت

پاسخ شتاب در درجات آزادی مرجع به عنوان ورودی روش ssi-cov-ref استفاده شده و در نهایت، پارامترهای مودال سازه آسیب دیده به منظور تشخیص آسیب با پارامترهای سازه سالم مورد مقایسه قرار می گیرد. در ابتدا مشخصه های سازه سالم خرپایی با استفاده از داده های ثبت شده برای شتاب با فرض وجود حسگر در تمام درجات آزادی تحت روش ssi-cov بدست آمده که این موضوع در شکل (۳-الف) با عنوان نمودار پایداری ارائه شده و در جدول شماره (۱) نیز تعداد ٥ فرکانس اول حاصل از حالت تئوری اجزای محدود و فرکانس های

جدول ۱. مقایسه فرکانس های خرپای دوبعدی در حالت تئوری و روش زیرفضای تصادفی کواریانس محور

Number of modes	Frequency(Hz)		
	ssi-cov	Theoretical	
1	49.48	49.48	
2	91.65	91.66	
3	142.60	142.65	
4	276.30	277.07	
5	318.60	319.63	

 Table. 1. Comparing the frequencies of two-dimensional truss in theory state and ssi-cov method

در ادامه به منظور مقایسه بین اشکال مودی تحلیلی و تجربی از معیار اطمینان MAC استفاده شده که در شکل (۳-ب) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود فرکانسهای ذاتی سیستم به طور کامل از طریق روش زیرفضای تصادفی به خوبی شناسایی شده و هماهنگی خوبی بین اشکال مودی تئوری و اشکال مودی روش زیرفضای تصادفی وجود دارد. از عوامل تاثیر گذار بر دقت هرچه بیشتر نتایج روش زیرفضای تصادفی میزان استپ (گام)های زمانی تعریف شده برای روش مذکور است که از یکسو با کاهش زمان گامهای زمانی دقت شدت و به صورت تصاعدی افزایش خواهد یافت. پس از این رو اختلاف اندک فرکانس در مودهای بالا را با استفاده از گذراندن فرآیند تشخیص آسیب در سازه هدف با فرض وجود

شناسایی آسیب در سازهها به روش زیر فضای تصادفی مبتنی بر ...

سهیل سرپرست سادات و امین قلیزاد

از اعضای آسیبدیده ممکن است دارای انرژی کرنشی نشان داده، پس بهمنظور شناسایی دقیق عضو آسیبدیده ضمن فرض پاسخ سه مود اول سازه، از تئوری بیزی برای بدست آوردن میزان احتمال آسیبدیدگی اعضا در قالب ترکیب با نتایج مرحله قبل بهره گرفته شده و نمودار میزان احتمال آسیب المانهای سازه در شکل (٤-ب) ارائه شده که به وضوح احتمال آسيب المانهاي مورد بحث را نمايان ميسازد.





Fig. 4. MSECR for truss elements (a-1) Scenario1, (a-2) Scenario 2; Probability damaged of truss members(b-1)Scenario1,(b-2) Scenario 2

فرآیند بهینهسازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده و مقدار تابع هدف معرفی شده برای مکان تصادفی حسگرها

۵ عدد حسگر به صورت تصادفی و با استفاده از روش -ssi cov-ref مشخصه های ذاتی سیستم قابل شناسایی خواهد بود.

شکل ۳ الف. نمودار پایداری خرپای سالم (ب) معیار اطمینان مودال بین بردارهای شکل مودی حالت تئوری و روش ssi-cov



Fig. 3. a Stability diagram of healthy truss (b) MAC between of theoretical state and ssi-cov method

الاستيسيتا	مدول	ِ ميزان	هش در	با کا	حرابى	لف خ	ی مخت	اريوها	سن
		ت.	شدہ اس	بيان	ه (۲)	شمار	جدول	قالب	در

جدول ۲. سناریوهای خرابی مفروض برای خرپای دوبعدی					
scenario of	element number	percent			
Damage		damage			
1	12	15			
2	5	5			
Δ.	10	15			

Table. 2. Scenarios damage for two-dimensional truss

در ادامه با استفاده از مفاهیم ارائه شده برای الگوریتم ژنتیک به منظور بهینهسازی مکان نصب حسگرهای محدود مورد استفاده در قالب استفاده از تابع هدف و با استفاده از روابط محاسبه انرژی کرنشی مودال اعضا، مقدار شاخص نسبت تغییرات انرژی کرنشی مودال هریک از المانها در قالب شکل (٤-الف) نشان داده شده است. با عنایت به اینکه اعضای سالم نیز متاثر دوره بیست و سوم / شماره ۲ / سال ۱٤۰۲

در این مثال نیز به منظور تحلیل دینامیکی تیر دوسرگیردار، در مرحله اول ثبت خروجی های مربوط به شتاب در تمام درجات آزادی در نظر گرفته شده است. ورودی به صورت نوفه سفید فرض شده و به دنبال شناسایی سیستم تحت روش ssi-cov به منظور ثبت فرکانس های ذاتی سازه مورد استفاده قرارگرفته است. در جدول (۳) فرکانس های سازه در حالت تئوری و تجربی مورد مقایسه قرارگرفته است.

تئوري و روش	در حالت	گیردار	دوسر	تير	های	فركانس	مقايسه	۳.	جدول
			/ .						

زير فصاي تصادفي كواريانس محور					
Number of modes	Frequency(Hz)				
	SSI-cov	Theoretical			
1	649.9	650.1			
2	1791.6	1792.4			
3	3509.3	3516.5			
4	5811.8	5822.5			
5	8706.7	8724.5			

 Table. 3. Comparing the frequencies of fixed beam in theory state and ssi-cov method

در این مرحله در قالب شکل (۷-الف) نمودار پایداری مربوط به روش ssi-cov ارائه شده است و به منظور ارزیابی هماهنگی بین اشکال مودی تئوری و اشکال مودی بدست آمده از روش ssi-cov که برمبنای استفاده از خروجی شتاب در تمام درجات آزادی حاصل شده است از معیار اطمینان MAC استفاده شده که در شکل (۷-ب) ارائه شده که هماهنگی اشکال مودی تئوری و تجربی را نشان میدهد. برای انجام فرآیند تشخیص آسیب در این سازه با فرض سناریوی خرابی با کاهش ۱۵٪ در میزان مدول الاستیسیته المان شماره (۵) با استفاده از روش ssi-cov-ref اقدام می شود.

در این مرحله به جای ثبت پاسخ سازه در تمام درجات آزای، فقط از ۳ حسگر ثبت پاسخ سازه استفاده شده است. در ادامه با استفاده از روابط انرژی کرنشی مودال اعضا، مقدار انرژی کرنشی مودال هریک از المانها در قالب شکل (۸–الف) در انتهای چرخه بهینهسازی محل نصب حسگرها نشان داده شده است. همانطور که نمایان است اعضای آسیب ندیده نیز دارای انرژی کرنشی نشان داده شده است که برای شناسایی بهینه می شود. در پایان چرخه بهینه سازی مکان نصب حسگرها با فرض خرابی با سناریو شماره ۲ در شکل (۵) نمایش داده شده است.

شکل 0. مکان بهینه نصب حسگر در خرپای دوبعدی برای سناریو خرابی شماره ۲



Fig. 5. The optimal location of the sensores in the twodimensional truss for failure scenario 2

۲-۲- تیر دوسر گیردار

یک تیر دوسرگیردار به طول ۱ متر با ۱۰ المان و تعداد ۱۱ گره که هر گره با دو درجه آزادی انتقالی عمودی و آزادی دورانی مفروض بوده که با استفاده از المان تیری هرمیشین^{۱۰} به صورت اجزای محدود در نرمافزار متلب مدل شده است. سطح مقطع اعضا برابر ۲۰۰٬۰ مترمربع (m²)، مدول الاستیسیته برابر ۲۵ گیگالپاسگال (Gpa)، چگالی برابر ۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m³) و ممان اینرسی اعضا برابر ۲۰۰۰٬۰ (m⁴) فرض شده است. قیدهای مفروض در این مثال در قالب قیدهای جابه جایی و دورانی در محل تکیهگاهها و در درجات آزادی ۲۱،۲۰۱ و ۲۲ در نظر گرفته شده که در شکل (۲) ارائه شده است.



^{18 -} Hermitian Beam Element



Fig. 8. a MSECR for beam elements; (b) Probability damaged beam members

در پایان چرخه بهینه سازی الگوریتم ژنتیک نیز مکان بهینه نصب حسگر با فرض آسیب المان شماره ٥ در شکل شماره ٩ ارائه شده است.



٦ -٣- قاب دوبعدي

یک قاب دو بعدی دارای ٦ المان و با تعداد ۷ گره که هر گره با سه درجه آزادی جابهجایی افقی و عمودی و درجه آزادی دورانی مفروض بوده که سطح مقطع اعضا به صورت مربعي برابر ۰/۰۰۰۱ مترمربع (m²) و مدول الاستيسيته اعضا برابر ۱۰۰ گیگاپاسگال (Gpa) و چگالی اعضا نیز ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب (kg/m³) در نظر گرفته شده است. قیدهای مفروض در این مثال در قالب قیدهای جابهجایی و دورانی در محل گرهها بیان شده است که به صورت زیر نیز می توان ارائه نمود که سازهای با ۲۱ درجه آزادی بوده که درجات آزادی ۱٬۲٬۳٬۱۹٬۲۰ و ۲۱ مقید فرض شده که در شکل (۱۰) توصيف شده است. سازه پس از تحليل ديناميكي تحت ورودی نوفه سفید قرارگرفته و در ادامه با استفاده از روش -ssi cov فرکانس های ذاتی سازه با فرض وجود حسگر در تمام دجات آزادی مورد شناسایی قرارگرفته است.

شناسایی آسیب در سازهها به روش زیر فضای تصادفی مبتنی بر ...

دقیق عضو آسیب دیده با استفاده از تئوری بیزی برای بدست آوردن ميزان احتمال آسيبديدگي اعضا از تركيب نتايج مرحله قبل یعنی شاخص آسیب ناشی از انرزی کرنشی اعضای سازه هدف بهره گرفته شده و نمودار احتمال مربوطه در شکل (۸-ب) ارائه شده که به وضوح احتمال آسیب المان شماره (٥) را نمايان ميسازد.

شکل ۷ الف. نمودار پایداری تیر دوسر گیردار (ب) معیار اطمینان مودال بین بردارهای شکل مودی حالت تئوری و روش ssi-cov



Fig. 7. a Stability diagram of healthy fixed beam; (b) MAC between of theoretical state and ssi-cov method

شکل ۸ الف. نمودار میلهای MSECR برای المان های تیری ؛ (ب)نمودار احتمال آسيب اعضاي تير





Fig. 11. a. Stability diagram of healthy frame structure (b) MAC between of theoretical state and SSI-cov method

در این سازه نیز به منظور تشخیص آسیب در سازه با فرض سناریوی خرابی با کاهش ۱۵٪ در میزان مدول الاستیسیته المان شماره (٦) تحت روش ssi-cov-ref اقدام میشود. در این مرحله به جای ثبت پاسخ سازه در تمام درجات آزای، فقط از ۳ حسگر ثبت پاسخ سازه به صورت تصادفی استفاده شده است. به دنبال شکل (١٢-الف) میزان شاخص انرژی کرنشی مودال اعضا نمایش داده شده است،با توجه به شکل (٢٢-ب) که با استفاده از تئوری بیزی و ترکیب با دادههای روش انرژی کرنشی مودال، میزان احتمال خرابی اعضا ارائه شده، احتمال آسیب المان شماره (٦) به وضوح بیشتر از سایر اعضای سازه بوده و شناسایی آسیب به درستی صورت گرفته شده است.









Fig. 10. Two dimensional Frame structure

در جدول (٤) فرکانس های اولیه سازه هدف در حالت تئوری و تجربی مورد مقایسه قرارگرفته است.

جدول ٤. مقایسه فرکانسهای قاب در حالت تئوری و روش زیرفضای

تصادفي كواريانس محور					
Number of modes	Frequency(Hz)				
	SSI-cov	Theoretical			
 1	12.61	12.61			
 2	59.16	59.18			
 3	85.84	85.91			
 4	112.9	113.05			
 5	232.9	234.58			

Table. 4. Comparing the frequencies of Frame structure in theory state and ssi-cov method

در قالب شکل (۱۱–الف) نمودار پایداری مربوط به روش زیرفضای تصادفی ارائه شده است و به منظور ارزیابی هماهنگی بین اشکال مودی تئوری و اشکال مودی بدست آمده از روش ssi-cov از معیار اطمینان MAC بهره گرفته شده که در شکل (۱۱–ب) ارائه شده است که هماهنگی اشکال مودی تئوری و تجربی را نشان میدهد.

شکل ۱۱ الف. نمودار پایداری قاب سالم ؛ (ب) معیار اطمینان مودال بین بردارهای شکل مودی حالت تئوری و روشssi-cov



احتمال آسیب اعضای سازهای (Probability Damage) اعضای آسیب دیده قابل تمیز می باشد. بر این اساس می توان بیان نمود که فرآیند شناسایی آسیب با استفاده از روش زیرفضای تصادفی مبتنی بر داده های مرجع قابلیت بسیار خوبی در تعیین مشخصه های ذاتی سیستم در شرایط مقابله با محدودیت در تعداد حسگرهای مورد نیاز برای شناسایی سیستم را داشته و علاوه بر ایجاد امکان شناسایی سیستمهای با درجات آزادی بالا، شرایط استفاده از تعداد حسگرهای محدود در فرآیندهای شناسایی را نیزفرآهم می آورد.

مراجع

[1]-Fu, Z.F. and He, J., 2001. Modal analysis. Elsevier.

[2]-Ren, W.X. and Zong, Z.H., 2004. Outputonly modal parameter identification of civil engineering structures. Structural Engineering and Mechanics, 17(3-4), pp.429-444.

[3]-Tarinejad, R., Pourgholi, M. and Yaghmaei-Sabegh, S., 2017. System Identification of Arch Dams Using Balanced Stochastic Subspace Identification. Modares Civil Engineering journal, 17(1), pp.53-64.

[4]-Arefi, S.L., Gholizad, A. and Seyedpoor, S.M., 2020. A modified index for damage detection of structures using improved reduction system method. Smart Structures and Systems, 25(1), pp.1-25.

[5]-Kullaa, J., 2020. Robust damage detection using Bayesian virtual sensors. Mechanical Systems and Signal Processing, 135, p.106384.

[6]-Sahu, S. and Nayak, B.B., 2020. An adaptive genetic algorithm method for damage detection in structural elements. Materials Today: Proceedings, 26, pp.581-585.

[7]-Umar, S., Vafaei, M. and Alih, S.C., 2021. Sensor clustering-based approach for structural damage identification under ambient vibration. Automation in Construction, 121, p.103433.

[8]-Mendler, A., Döhler, M. and Ventura, C.E., 2021. A reliability-based approach to determine the minimum detectable damage for statistical damage detection. Mechanical

در ادامه در شکل شماره (۱۳) مکان بهینه حسگرها در درجات آزادی مشخص قاب دوبعدی در انتهای چرخه بهینهسازی الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است.



Fig. 13. The optimal location of the sensores in the frame

۷. نتیجه گیری

با توجه به فرآیند ارائه شده به منظور شناسایی آسبب در سازههای مهندسی در قالب استفاده از ترکیب روشهای زیرفضای تصادفی کواریانس محور مبتنی بر دادههای مرجع و نيز شاخص نسبت تغييرات انرژي كرنشي مودال اعضا و همچنین راهبرد بیزی می توان بیان نمود که نتایج تحلیل های انجام شده به وضوح بر قابل اتكا بودن اين فرآيند تاكيد داشته و امکان تعمیم این راهبرد بر سایر سازههای عمرانی را ممکن می داند. در این فرآیند در ابتدا با فرض سازه سالم پارامترها و مشخصههای ذاتی سیستم مورد بررسی اعم از فرکانسها و اشکال مودی تعیین شده و به دنبال آن با فرض سناریوهای متفاوت در خرابی اعضای سازه آسیب دیده، با تحلیل دینامیکی صورت گرفته شده، خروجی شتاب در درجات آزادی مرجع به عنوان ورودی روش شناسایی سیستم استفاده شده و در ادامه با استفاده از ترکیب روش های تغییرات انرژی کرنشی مودال در اعضا و راهبرد بیزی، عضو آسیب دیده با درصد بالای اطمینان شناسایی شده است. با وجود تاثیر گذاری نوع ورودی و شرایط سازه بر شاخص نسبت تغیرات انرژی کرنشی مودال اعضا (MSECR) لیکن به علت استفاده از راهبرد بیزی بر اساس ترکیب نتایج آماری حاصل از چندین منبع (نتایج حاصل از مودهای اول و دوم و سوم) عملا در نمودار مربوطه برای [16]-Shi, Z., Law, S.S. and Zhang, L.M., 1998. Structural damage localization from modal strain energy change. Journal of sound and vibration, 218(5), pp.825-844.

[17]-Arefi, S.L. and Gholizad, A., 2020. Damage detection of truss structures by reduction of degrees of freedom using the SEREP method. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 15(1), pp.1-25.

[18]-Guo, H.Y. and Li, Z.L., 2012. Structural damage identification based on Bayesian theory and improved immune genetic algorithm. Expert Systems with Applications, 39(7), pp.6426-6434.

[19]-Teimouri, H., Davoodi, M.R. and Mostafavian, S.A., 2020. Detecting damage location and severity in a double layer grid using modal strain energy method and data fusion. Journal of Structural and Construction Engineering, 7(3), pp.35-54.

[20]-Dan M. Frangopol., Structural Identification and Damage Detection using Genetic Algorithms: Vol. 6, Structures & Infrastructures Series, Series Editor, Netherlands, 2010, 140 pages

[21]- Khajavi M., Gholizad A., Shoaei-parchin M., Optimal Sensor Placement to Identify the Mode Shapes of Reduced Order Structures. MCEJ 2022; 23 (1). in Persian

[22]-Allemang, R.J., 1982. A correlation coefficient for modal vector analysis. In Proc. of the 1st IMAC (pp. 110-116).

Systems and Signal Processing, 154, p.107561.

[9]-EWINS, D., 1984. Modal ¹esting: ¹heory and Practice. Letchworth.

[10]-Juang, J.N., 1994. Applied system identification. Prentice-Hall, Inc..

[11]-Peeters, B. and De Roeck, G., 1999. Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis. Mechanical systems and signal processing, 13(6), pp.855-878.

[12]-Frigui, F.O., Faye, J.P., Martin, C., Dalverny, O., Pérès, F. and Judenherc, S., 2017, June. An algorithm for damage detection and localization using output-only response for civil-engineering structures subjected to seismic excitation. In 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design (p. 0).

[13]-James III, G.H., Carne, T.G. and Lauffer, J.P., 1993. The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating wind turbines (No. SAND-92-1666). Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States).

[14]-Hermans, L. and Van der Auweraer, H., 1999. Modal testing and analysis of structures under operational conditions: industrial applications. Mechanical systems and signal processing, 13(2), pp.193-216.

[15]-Ljung, L., 1987. System identification: Theory for the User\, Englewood Cles, Prentice-Hall.

Damage Detection of Structures Using Reference-Based Stochastic Subspace Method

S. sarparast sadat¹, A. Gholizad²*

1 PhD Student in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mohaghegh Ardabili University 2 Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mohaghegh Ardabili University Received: 2022/11/16 Accepted: 2023/03/01 *Gholizad@uma.ac.ir

ABSTRACT

Damage to the structure during operation has always been possible, and therefore the issue of structural health monitoring (SHM) in order to control and manage safe operation has been considered in recent years. The process of identifying and extracting the parameters and inherent characteristics of target structural systems in order to monitor and detect possible damages is possible with different methods under the title of Output Only Modal Analysis (O0MA).O0MA is defined both in the time domain and in the frequency domain, which is the stochastic subspace identification method (SSI) among the time domain methods. The stochastic subspace identification method, assuming the existence of uncertainty in modeling as well as noise in observing and measuring data, identifies the system parameters by applying statistical relationships to the recorded data of the structure response. Due to the high accuracy of the covariance-based stochastic subspace method (ssi-cov), which monitors and identifies the system by constructing the covariance function related to the recorded output data, therefore, this sub-method has been used. Due to the limitation in the number of sensors that can be installed in real structures, using the reference based stochastic subspace identification (ssi-cov-ref) method provides the possibility of identifying the investigated structure using the number of sensors less than the degrees of freedom of the structure. By using this method, there is no need to use the methods of reducing the degrees of freedom or expanding the modal data for identification The effectiveness of the reference based stochastic subspace identification method can be presented with a limited number of sensors under several examples. To identification of the damage in the structure, the method of measuring changes in the modal strain energy of the members in healthy and damaged state is used, and an index called Modal Strain Energy Change Ratio (MSECR) is defined and presented. Considering that in case of damage in the structure, the healthy members will also have strain energy, which is due to the strain effect of the damaged members on the healthy members, Therefore, using the probabilistic approach, it will be possible to provide an index of the damage probability of structural members under a specific failure scenario using different information sources based on mode shapes. In the following, using the genetic algorithm in the form of an optimization problem, the installation location of existing sensors for the target structure is optimized and presented. In this research, after finite element modeling in MATLAB software and dynamic analysis of several structural samples assuming white noise input and installing a limited number of sensors in the structure, the results obtained from the reference based stochastic subspace identification method have been used to identify the system. In order to detect the location of damage in the investigated structures, the combination of the method of measuring the modal strain energy changes of the members and the Bayesian strategy has been used, and the efficiency of the proposed method has been discussed in the framework of the mentioned process. Based on the results obtained from the output of the proposed process, the affected members will be identified and recognizable.

Keywords: Damage detection, finite element modeling, dynamic analysis, Stochastic Subspace identification method, modal strain energy