



یک روش شناسایی جدید برای تعیین نوع، مقدار و مکان آسیب در سازه‌های سه‌بعدی ساختمانی با استفاده از پارامترهای مارکوف شناسایی شده سیستم

کاوه کریمی^۱*

۱- استادیار سازه - دانشگاه کردستان - دانشکده فنی مهندسی - گروه عمران، ka.karami@uok.ac.ir

چکیده

در این تحقیق روش جدیدی برای شناسایی مقدار، مکان و نوع آسیب در ساختمان‌های سه‌بعدی با عملکرد برشی ارائه می‌گردد. پارامترهای سازه‌ای شامل ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی با استفاده از پارامترهای مارکوف سیستم شناسایی شده محاسبه می‌شوند. پارامترهای سازه‌ای شناسایی شده، به طور مستقیم با پارامترهای مارکوف سیستم، بردارهای مکان محرک‌ها و حسگرها مرتبط است. در این مطالعه با معرفی یک ماتریس تبدیل می‌توان سختی جانبی (در دو راستای عمود بر هم) و سختی پیچشی هر طبقه را شناسایی و مقدار آسیب را تعیین نمود. برای بررسی عملکرد و کاربرد روش پیشنهادی یک مدل عددی از یک ساختمان سه‌بعدی با عملکرد برشی و جرم متمرکز به کار گرفته می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش شناسایی خسارت پیشنهادی، حتی در شرایط آلوده بودن داده‌های اندازه‌گیری شده به نوبت، مکان، مقدار و نوع آسیب را به طور موثری شناسایی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: نظارت سلامت سازه‌ای، پارامترهای مارکوف، شناسایی سیستم، جستجوی خسارت.

۱- مقدمه

پایش سلامت سازه‌ای (SHM^۱) به فرآیند تشخیص آسیب با استفاده از خصوصیات استخراج شده از پاسخ‌های دینامیکی سازه گفته می‌شود. پایش سلامت سازه‌ای روشی برای تشخیص سازه سالم و سازه آسیب دیده است. استفاده از روش‌هایی که بر مبنای پاسخ‌های دینامیکی اندازه‌گیری شده از سازه، آسیب را در آن تشخیص می‌دهند، از روش‌های موثر تشخیص آسیب هستند که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۱]. تعیین وجود، مکان و خصوصیات خرابی سازه‌ای سه هدف اصلی در SHM می‌باشند که با استفاده از بررسی و مقایسه تغییرات در پاسخ دینامیکی سازه حاصل می‌گردند. رویکرد اغلب این روش‌ها بر اساس آنالیز تغییرات حاصل شده در اشکال مودی، فرکانس و ضریب انعطاف‌پذیری اندازه‌گیری شده می‌باشد [۲-۵]. اندازه‌گیری پاسخ در SHM از سه قسمت تشکیل می‌شود: سیستم اندازه‌گیری، سیستم ذخیره اطلاعات و سیستم‌های ارتباطی [۶]. قسمت اصلی SHM شناسایی سیستم می‌باشد که با استفاده از اطلاعات به دست آمده از سه قسمت فوق انجام

^۱ Structural Health Monitoring



در رابطه بالا k_{yi} و k_{yj} نشان دهنده سختی المان i به ترتیب در جهت x و y در طبقه z می‌باشد. همچنین در این روابط e_{yi} و e_{yj} به ترتیب مقدار فاصله‌ی مرکز المان از محورهای x و y گذرنده از مرکز جرم سازه در طبقه z است. همان‌طور که از ماتریس سختی طبقه z در رابطه (۲) پیداست برای تعریف ماتریس هر طبقه و در نتیجه ماتریس سختی کل سازه تنها به پنج مقدار ارائه شده در رابطه (۳) نیاز می‌باشد، این پنج مقدار را از این به بعد درایه‌های پنج‌گانه ماتریس سختی می‌نامیم.

۳- الگوریتم شناسایی خسارت بر اساس پارامترهای مارکوف سیستم شناسایی شده

در این تحقیق روش جدیدی برای شناسایی آسیب در مدل سه بعدی جرم متمکز با عملکرد برشی برای سازه با به کارگیری حسگر در سه درجه آزادی هر طبقه ارائه می‌گردد. با استفاده از این روش می‌توان میزان خرابی انتقالی و پیچشی سازه را شناسایی کرد. پارامترهای سازه‌ای شامل ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی با استفاده از پارامترهای مارکوف سیستم شناسایی شده محاسبه می‌شوند.

معادله حرکت یک سیستم سازه‌ای n طبقه با مدل سه بعدی جرم متمکز با عملکرد برشی دارای $3n$ درجه آزادی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}_0\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}_0\mathbf{x}(t) = \mathbf{B}_u\mathbf{u}(t) \quad (4)$$

که در آن \mathbf{M} ، \mathbf{C}_0 و \mathbf{K}_0 با ابعاد $3n \times 3n$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سیستم سازه‌ای می‌باشند. بردارهای $\mathbf{x}(t)$ ، $\dot{\mathbf{x}}(t)$ و $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ با ابعاد $3n \times 1$ پاسخ‌های سیستم سازه‌ای به ترتیب جابه‌جایی، سرعت و شتاب است. بردار $\mathbf{u}(t)$ با ابعاد $1 \times r$ نیروی خارجی شامل تحریکات دینامیکی است که به سیستم وارد می‌شود؛ که در آن r تعداد محرک‌های سازه می‌باشد. ماتریس \mathbf{B}_u با ابعاد $n \times r$ مکان محرک‌ها را نشان می‌دهد. فرم فضای حالت پیوسته زمانی معادله (۴) با $6n$ حالت، r ورودی و m خروجی به صورت رابطه (۵) نوشته می‌شود. با توجه به اینکه برای شناسایی آسیب در این تحقیق در کل درجات آزادی سازه محرک و حسگر قرار داده شده است؛ و در هر طبقه سه درجه آزادی موجود بوده و کل سازه دارای $3n$ درجه آزادی می‌باشد؛ بنابراین مقدار r و m برابر با $3n$ است.

$$\dot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{q}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad \& \quad \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{q}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \quad (5)$$

که در آن $\mathbf{q}(t) = [\mathbf{x}(t)^T \quad \dot{\mathbf{x}}(t)^T]^T$ بردار حالت با ابعاد $6n \times 1$ و $\mathbf{y}(t)$ بردار خروجی (پاسخ‌های سیستم) با ابعاد $m \times 1$ است. ماتریس سیستم \mathbf{A} با ابعاد $6n \times 6n$ ، ماتریس مکان ورودی \mathbf{B} با ابعاد $2n \times r$ ، ماتریس مکان خروجی \mathbf{C} با ابعاد $m \times 6n$ و ماتریس \mathbf{D} با ابعاد $m \times r$ نشان دهنده عملگر داخلی سیستم پیوسته زمانی می‌باشد. با توجه به اینکه بیشتر حسگرهای استفاده شده در سازه‌ها از نوع شتاب‌سنج است در این کار تحقیقاتی به استخراج معادلات بر اساس خروجی شتاب بسنده می‌کنیم. با این فرض که خروجی‌های سیستم سازه‌ای تنها پاسخ شتاب باشد ماتریس‌های \mathbf{A} ، \mathbf{B} ، \mathbf{C} و \mathbf{D} در رابطه (۵) به صورت زیر ساخته می‌شوند:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{n \times n} & \mathbf{I}_{n \times n} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}_0 & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{n \times r} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_u \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = [-\mathbf{C}_\alpha\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}_0 \quad -\mathbf{C}_\alpha\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_0] \quad \mathbf{D} = [\mathbf{C}_\alpha\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_u] \quad (6)$$

پارامترهای \mathbf{I} و \mathbf{O} به ترتیب ماتریس‌های واحد و صفر با ابعاد مناسب می‌باشند. ماتریس \mathbf{C}_α با ابعاد $m \times 3n$ مکان حسگرها را نشان می‌دهد. بر طبق مفاهیم کنترل خطی i آمین پارامتر مارکوف، \mathbf{Y}_i ، یا به عبارتی i آمین پاسخ متوالی سازه به اعمال ضربه از رابطه زیر حاصل می‌گردد.

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-1}\mathbf{B} \quad \& \quad \mathbf{Y}_0 = \mathbf{D} \quad (7)$$

با استفاده از روابط (۶) و (۷) پارامتر مارکوف سیستم در زمان $t=0$ به صورت زیر ساخته می‌شود:

$$\mathbf{Y}_0 = \mathbf{C}_\alpha\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_u \quad (8)$$



در این تحقیق \tilde{Y}_1 ، i امین پارامتر مارکوف شناسایی شده‌ی سیستم با استفاده از الگوریتم ERA/OKID به طور مستقیم از داده‌های ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده به دست می‌آیند [۱۸]. پارامترهای مارکوف سیستم شناسایی شده در زمان $t=0$ ، \tilde{Y}_0 به جای Y_0 در رابطه (۸) جایگذاری می‌شود. با پیش ضرب و پس ضرب کردن طرفین رابطه حاصله در ماتریس‌های C_α^\dagger و B_u^\dagger ماتریس M^{-1} حاصل می‌گردد؛ که با وارون کردن آن ماتریس جرم M به صورت زیر به دست می‌آید.

$$M = B_u \tilde{Y}_0^\dagger C_\alpha \quad (9)$$

علامت (\dagger) نشان دهنده عملگر شبه وارون ماتریس است. با استفاده از رابطه‌های (۶) و (۷) اولین پارامتر مارکوف سیستم Y_1 به صورت زیر ساخته می‌شود:

$$Y_1 = -C_\alpha M^{-1} C_0 M^{-1} B_u \quad (10)$$

با جایگذاری اولین پارامتر مارکوف سیستم شناسایی شده \tilde{Y}_1 و ماتریس M از رابطه (۹) در رابطه (۱۰) و ساده کردن آن ماتریس میرایی C_0 تعیین می‌گردد.

$$C_0 = -B_u (\tilde{Y}_0)^\dagger \tilde{Y}_1 (\tilde{Y}_0)^\dagger C_\alpha \quad (11)$$

با استفاده از رابطه‌های (۶) و (۷) دومین پارامتر مارکوف سیستم Y_2 به صورت زیر ساخته می‌شود:

$$Y_2 = -C_\alpha M^{-1} K_0 M^{-1} B_u + C_\alpha M^{-1} C_0 M^{-1} C_0 M^{-1} B_u \quad (12)$$

با جایگذاری دومین پارامتر مارکوف سیستم شناسایی شده \tilde{Y}_2 ، ماتریس M^{-1} از رابطه (۹) و جایگذاری ماتریس میرایی C_0 از رابطه (۱۱) در رابطه (۱۲) و حل رابطه به دست آمده خواهیم داشت

$$\tilde{Y}_0 (B_u)^\dagger K_0 (C_\alpha)^\dagger \tilde{Y}_0 = \tilde{Y}_1 (\tilde{Y}_0)^\dagger \tilde{Y}_1 - \tilde{Y}_2 \quad (13)$$

با تعریف ماتریس‌های U_k ، Y_B و Y_I با ابعاد به ترتیب $m \times r$ ، $m \times 3n$ و $3n \times r$ به صورت زیر

$$U_k = \tilde{Y}_1 (\tilde{Y}_0)^\dagger \tilde{Y}_1 - \tilde{Y}_2 \quad \& \quad Y_B = \tilde{Y}_0 (B_u)^\dagger \quad \& \quad Y_I = (C_\alpha)^\dagger \tilde{Y}_0 \quad (14)$$

رابطه (۱۳) را می‌توان به صورت زیر ساده‌تر نوشت.

$$U_k = Y_B K_0 Y_I \quad (15)$$

رابطه (۱۵) معادله اساسی شناسایی ماتریس سختی سیستم سازه‌ای است هنگامی که خروجی‌ها پاسخ‌های شتاب سیستم سازه‌ای باشند. برای تعیین ماتریس K_0 (ماتریس سختی کل سازه) رابطه (۱۵) دوباره بازنویسی شده به طوری که ماتریس K_0 به صورت یک بردار ستونی نامعین k_0 با ابعاد $(3n)^2 \times 1$ ظاهر می‌شود.

$$A_k k_0 = h_k \quad (16)$$

که در آن

$$A_k = Y_B \otimes Y_I^T$$

$$k_0 = \{K_0^{(1,1)} \dots K_0^{(1,3n)} | K_0^{(2,1)} \dots K_0^{(2,3n)} | \dots | K_0^{(3n,1)} \dots K_0^{(3n,3n)}\}^T \quad (17)$$

$$h_k = \{U_k^{(1,1)} \dots U_k^{(1,3n)} | U_k^{(2,1)} \dots U_k^{(2,3n)} | \dots | U_k^{(3n,1)} \dots U_k^{(3n,3n)}\}^T$$

درایه $K_0^{(i,j)}$ در بردار k_0 ، متناظر با درایه (i,j) از ماتریس K_0 است. همچنین درایه $U_k^{(i,j)}$ در بردار h_k با ابعاد $(3n)^2 \times 1$ ، متناظر با درایه (i,j) از ماتریس U_k می‌باشد. در رابطه (۱۷)، A_k ماتریس ضرایب با ابعاد $(3n)^2 \times (3n)^2$ است. علامت \otimes عملگر ضرب کرونگر^۲ را نشان می‌دهد. ضرب کرونگر دو ماتریس Y_B و Y_I^T یک ماتریس بزرگ‌تر است؛ که از تمام ضرب‌های محتمل درایه‌های ماتریس Y_B در درایه‌های ماتریس Y_I^T به دست می‌آید. حل معادله (۱۷) به روش

² Kronecker product



حداقل مربعات نرم مینیمم^۳ برای تعیین درایه‌های ماتریس سختی K_0 ، جواب یکتایی ندارد. همچنین ویژگی مربوط به تقارن و صفر بودن بعضی از درایه‌های ماتریس سختی را نیز حفظ نمی‌کند؛ بنابراین اطلاعات مربوط به صفر بودن بعضی از المان‌های ماتریس سختی باید به صورت شرط قیدهای اضافی در نظر گرفته شود. این کار از نظر ریاضی با حذف المان‌های صفر بردار k_0 و همچنین حذف ستون‌های متناظر با آن‌ها در ماتریس A_k انجام شدنی است.

با توجه به رابطه (۲) از هر نُه درایه ماتریس سختی هر طبقه دو درایه از آن‌ها صفر است؛ بنابراین با توجه به رابطه (۱) ماتریس طبقه اول، یک بار در ماتریس سختی کلی سازه و ماتریس طبقات دیگر هر کدام چهار بار در ماتریس سختی کل سازه تکرار می‌شود؛ که یک بار آن در درایه‌های سختی طبقه ما قبل خود قرار می‌گیرد. بنابراین تعداد درایه‌های غیر صفر بردار k_0 برابر با $z = (9-2) \times ((n-1) \times (4-1) + 1) = 7 \times (3n-2)$ می‌باشد. برداری که از حذف درایه‌های صفر بردار k_0 ایجاد شده است را k_0^m می‌نامیم ابعاد این ماتریس $z \times 1$ می‌باشد. همچنین با حذف ستون‌هایی از ماتریس A_k که در المان‌های صفر بردار k_0 ضرب می‌گردد؛ ماتریس A_k^m با ابعاد $(3n)^2 \times z$ به دست می‌آید. در نتیجه رابطه (۱۶) به صورت زیر اصلاح می‌گردد.

$$A_k^m k_0^m = h_k \quad (18)$$

جدول ۱: مقدار مولفه‌های ماتریس تبدیل

i	r	s	شماره سطر CN=3n(r-1)+s	شماره ستون				
				5(i-1)+1	5(i-1)+2	5(i-1)+3	5(i-1)+4	5(i-1)+5
1	1	1	3n(1-1)+1	1	0	0	0	0
	1	3	3n(1-1)+3	0	0	0	1	0
	2	2	3n(2-1)+2	0	1	0	0	0
	2	3	3n(2-1)+3	0	0	0	0	1
	3	1	3n(3-1)+1	0	0	0	1	0
	3	2	3n(3-1)+2	0	0	0	0	1
	3	3	3n(3-1)+3	0	0	1	0	0
i=2, 3, ..., n	3(i-1)-2	3(i-1)-2	3n(3(i-1)-2-1)+ 3(i-1)-2	1	0	0	0	0
	3(i-1)-2	3(i-1)	3n(3(i-1)-2-1)+ 3(i-1)	0	0	0	1	0
	3(i-1)-1	3(i-1)-1	3n(3(i-1)-1-1)+ 3(i-1)-1	0	1	0	0	0
	3(i-1)-1	3(i-1)	3n(3(i-1)-1-1)+ 3(i-1)	0	0	0	0	1
	3(i-1)	3(i-1)-2	3n(3(i-1)-1)+ 3(i-1)-2	0	0	0	1	0
	3(i-1)	3(i-1)-1	3n(3(i-1)-1)+ 3(i-1)-1	0	0	0	0	1
	3(i-1)	3(i-1)	3n(3(i-1)-1)+ 3(i-1)	0	0	1	0	0
	3(i-1)-2	3(i)-2	3n(3(i-1)-2-1)+ 3(i)-2	-1	0	0	0	0
	3(i-1)-2	3(i)	3n(3(i-1)-2-1)+ 3(i)	0	0	0	-1	0
	3(i-1)-1	3(i)-1	3n(3(i-1)-1-1)+ 3(i)-1	0	-1	0	0	0
	3(i-1)-1	3(i)	3n(3(i-1)-1-1)+ 3(i)	0	0	0	0	-1
	3(i-1)	3(i)-2	3n(3(i-1)-1)+ 3(i)-2	0	0	0	-1	0
	3(i-1)	3(i)-1	3n(3(i-1)-1)+ 3(i)-1	0	0	0	0	-1
	3(i-1)	3(i)	3n(3(i-1)-1)+ 3(i)	0	0	-1	0	0
	3(i)-2	3(i-1)-2	3n(3(i)-2-1)+ 3(i-1)-2	-1	0	0	0	0
	3(i)-2	3(i-1)	3n(3(i)-2-1)+ 3(i-1)-2	0	0	0	-1	0
	3(i)-1	3(i-1)-1	3n(3(i)-1-1)+ 3(i-1)-2	0	-1	0	0	0
	3(i)-1	3(i-1)	3n(3(i)-1-1)+ 3(i-1)-2	0	0	0	0	-1
	3(i)	3(i-1)-2	3n(3(i)-1)+ 3(i-1)-2	0	0	0	-1	0
	3(i)	3(i-1)-1	3n(3(i)-1)+ 3(i-1)-2	0	0	0	0	-1
	3(i)	3(i-1)	3n(3(i)-1)+ 3(i-1)-2	0	0	-1	0	0
	3(i)-2	3(i)-2	3n(3(i)-2-1)+ 3(i-1)-2	1	0	0	0	0
	3(i)-2	3(i)	3n(3(i)-2-1)+ 3(i-1)-2	0	0	0	1	0
	3(i)-1	3(i)-1	3n(3(i)-1-1)+ 3(i-1)-2	0	1	0	0	0
	3(i)-1	3(i)	3n(3(i)-1-1)+ 3(i-1)-2	0	0	0	0	1
	3(i)	3(i)-2	3n(3(i)-1)+ 3(i-1)-2	0	0	0	1	0
	3(i)	3(i)-1	3n(3(i)-1)+ 3(i-1)-2	0	0	0	0	1
	3(i)	3(i)	3n(3(i)-1)+ 3(i-1)-2	0	0	1	0	0
SUM			$7 \times (3n-2)$					

درایه‌های غیر صفر ماتریس سختی کل سازه از حل معادله قبل به دست می‌آید. هر یک از درایه‌های ماتریس سختی کل سازه تابعی از مولفه‌های پنج‌گانه سختی طبقات می‌باشند؛ به عبارت دیگر درایه‌های ماتریس سختی شناسایی شده تابعی از سختی‌های مختلف چندین طبقه است. برای شناسایی دقیق مقدار و شدت آسیب جانبی و پیش‌بینی هر طبقه تعیین مقدار هر

³ Minimum norm least-squares method



کدام از مولفه‌های پنج‌گانه سختی به صورت مجزا در هر طبقه ضروری می‌باشد. برای رفع این مشکل یک ماتریس تبدیل معرفی خواهد شد تا بتوان المان‌های سختی پنج‌گانه هر طبقه و در نتیجه مقدار خرابی جانبی و پیچشی را به دست آورد. در یک قاب سه‌بعدی اگر n تعداد طبقه‌ها باشد، ابعاد ماتریس سختی برابر با $(3n)^2$ است؛ و هر یک از درایه‌های این ماتریس سختی شامل یکی از پارامترهای $k_x, k_y, k_\theta, k_{x\theta}, k_{y\theta}$ یا $k_{y\theta}$ می‌باشد؛ بنابراین بردار \mathbf{k}_0^m را می‌توان به صورت زیر تشکیل داد:

$$\mathbf{k}_0^m = \mathbf{T}_f \mathbf{k}_0^x \quad (19)$$

که در آن

$$\{\mathbf{k}_0^x\}_{5n \times 1} = \{k_{x_1}, k_{y_1}, k_{\theta_1}, k_{x\theta_1}, k_{y\theta_1}, \dots, k_{x_i}, k_{y_i}, k_{\theta_i}, k_{x\theta_i}, k_{y\theta_i}, \dots, k_{y\theta_n}\}^T \quad (20)$$

در بردار مولفه‌های پنج‌گانه سختی \mathbf{k}_0^x با ابعاد $5n \times 1$ پارامترهای $k_{x_i}, k_{y_i}, k_{\theta_i}, k_{x\theta_i}, k_{y\theta_i}$ به ترتیب متناظر با سختی جانبی در جهت x سختی جانبی در جهت y ، معیاری از خروج از مرکزیت سازه در جهت x معیاری از خروج از مرکزیت سازه در جهت y و سختی پیچشی سازه می‌باشند. ماتریس \mathbf{T}_f با ابعاد $7(3n-2) \times 5n$ یک ماتریس تبدیل است که با ضرب آن در بردار \mathbf{k}_0^x درایه‌های غیر صفر ماتریس سختی کل سازه به صورت ستونی به دست می‌آید. از طرفی با توجه به اینکه ضرب ماتریس تبدیل در ماتریس مولفه‌های پنج‌گانه سختی باید مولفه‌های سختی کلی سازه را نتیجه دهد بنابراین رابطه زیر باید برقرار باشد.

$$\mathbf{K}_{rs} = \left[\mathbf{T}_f^{(CN, 1:5n)} \right] \left\{ \mathbf{k}_0^x \right\}_{5n \times 1} \quad (21)$$

$$[\mathbf{T}_f]_{(3n)^2 \times 5n} = \begin{bmatrix} & k_{x_1} & k_{y_1} & k_{\theta_1} & k_{x\theta_1} & k_{y\theta_1} & \dots & k_{x_i} & k_{y_i} & k_{\theta_i} & k_{x\theta_i} & k_{y\theta_i} & \dots & k_{y\theta_n} \\ 1 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 5 & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 9 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 3n(x-1)+x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 3n(x-1)+y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 3n(x-1)+\theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 & \dots & 0 \\ 3n(y-1)+x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 3n(y-1)+y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 3n(y-1)+\theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & \dots & 0 \\ 3n(\theta-1)+x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 & \dots & 0 \\ 3n(\theta-1)+y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & \dots & 0 \\ 3n(\theta-1)+\theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (3n)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

که در آن منظور از $\mathbf{T}_f^{(CN, 1:5n)}$ سطر CN ام ماتریس تبدیل است و r و s به ترتیب شماره سطر و ستون آن مولفه سختی در ماتریس کلی سازه می‌باشد. مقدار CN برابر $3n(r-1)+s$ است. مفهوم رابطه (۲۱) آن است که سطر CN ام ماتریس تبدیل، درایه (r, s) ماتریس سختی کل سازه را می‌سازد. بازه‌ی تغییر r و s برای طبقه i از $(3(i-1)-2, 3(i-1)-2)$ تا $(3i, 3i)$ می‌باشد. بنابراین ماتریس تبدیل کل سازه بر اساس جدول (۱) تشکیل می‌شود که در آن ستون‌های شماره $5(i-1)+1$ تا $5(i-1)+5$ برای تهیه \mathbf{K}_j می‌باشد. ماتریس تبدیل به شکل رابطه (۲۲) حاصل می‌گردد.

ماتریس تبدیل \mathbf{T}_f به دست آمده از رابطه (۲۲) اگر در بردار \mathbf{k}_0^x ضرب شود درایه‌های صفر ماتریس \mathbf{K}_0 (یا همان \mathbf{K}_T) را هم شامل می‌شود و نتیجه به دست آمده بردار \mathbf{k}_0 خواهد بود. برای دست یابی به بردار \mathbf{k}_0^m باید سطرهایی از ماتریس



T_f که با ضرب شدن در بردار k_0^x صفر می‌شوند را حذف کرد؛ بنابراین ابعاد ماتریس T_f برابر با $7(3n-2) \times 5n$ می‌شود. با جایگذاری رابطه (۱۹) در (۱۸) خواهیم داشت:

$$A_k^m T_f k_0^x = h_k \quad (23)$$

با استفاده از روش حل مینیمم حداقل مربعات بردار k_0^x محاسبه می‌شود.

$$k_0^x = (A_k^m T_f)^\dagger h_k \quad (24)$$

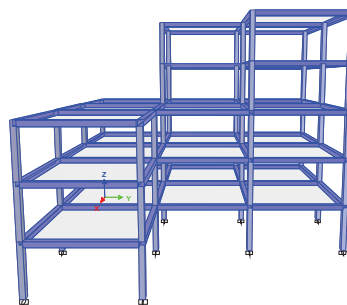
با تعیین سختی انتقالی و پیچشی سازه در هر طبقه شناسایی می‌گردد. همان‌طور که ذکر شد، از بردار پنج مولفه‌ای سختی سازه (k_0^x) می‌توان ماتریس سختی کل سازه را به دست آورد. بنابراین با در دست داشتن مقدار k_0^x می‌توان خسارت را در مدل سه بعدی سازه شناسایی کرد. مقدار خسارت در بردار پنج مولفه‌ای سختی سازه به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta k^x (\%) = \frac{|k_0^x - k_d^x|}{k_0^x} \times 100 \quad (25)$$

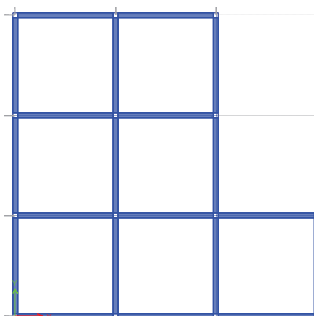
که در آن k_0^x سختی اولیه شناسایی شده سازه و k_d^x سختی شناسایی شده سازه آسیب دیده می‌باشد. آسیب ممکن است به دلیل عوامل مختلفی در سازه از جمله شکستن اتصالات، شکست اعضای سازه‌ای و یا آتش سوزی در ساختمان رخ دهد.

۴- مثال عددی

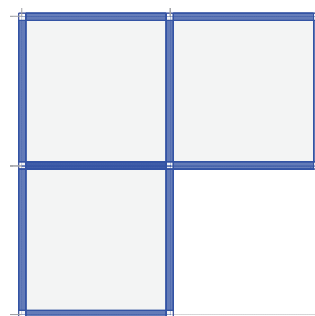
در این مثال از یک ساختمان قاب خمشی فولادی پنج طبقه نامنظم در پلان و ارتفاع برای ارزیابی عملکرد روش شناسایی آسیب پیشنهادی استفاده می‌گردد. تصویر سه بعدی از سازه مورد بررسی در شکل (a-۱) نشان داده شده است. پلان طبقات ۱ تا ۳ در شکل (b-۱) و طبقات ۴ و ۵ در شکل (c-۱) آمده است. فاصله کلیه دهانه‌ها ۶ متر می‌باشد. مقدار سختی طبقات سازه از نرم افزار SAP2000 استخراج شده و در جدول (۲) آمده است. در این مثال در کل درجات آزادی برای شناسایی سازه و ضبط پاسخهای ضربه حسگر قرار داده می‌شود.



(a)



(b)



(c)

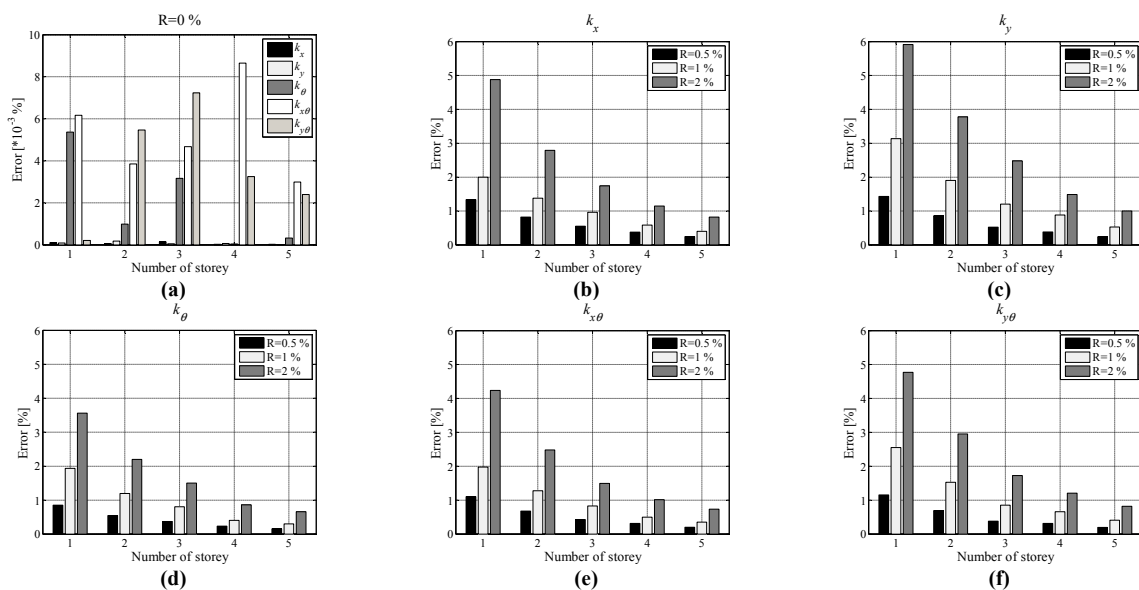
شکل ۱: (a) نمای سه بعدی سازه (b) پلان طبقات اول، دوم و سوم (c) پلان طبقات چهارم و پنجم



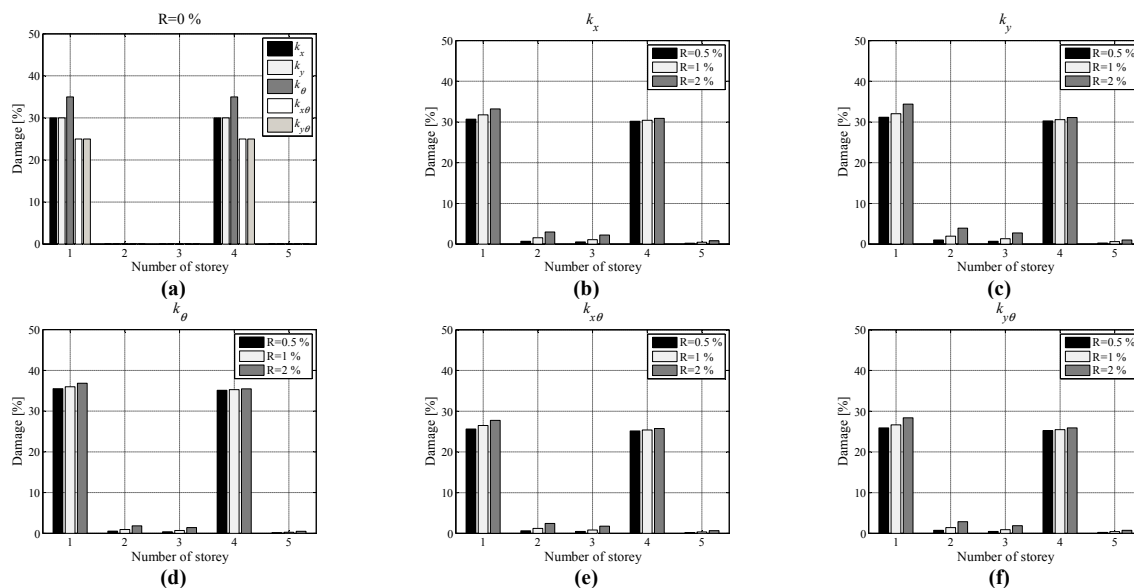
در حالت واقعی و در صورت خراب نشدن حسگرها و تجهیزات ارتباطی مقدار نویز در ضبط پاسخ ضربه توسط حسگرها در سازه را می‌توان به صفر رساند. مقدار خطای شناسایی سختی در هر کدام از مولفه‌های پنج‌گانه ماتریس سختی در نویز صفر درصد در شکل (a-۲) آمده است. محور عمودی این نمودار برحسب هزارم درصد از سختی واقعی آن مولفه می‌باشد. همان‌طور که در شکل (a-۲) نمایان است مقدار حداکثر خطای شناسایی در نویز صفر درصد کمتر از ۰/۰۰۹ درصد از سختی واقعی می‌باشد که مقدار خطای بسیار ناچیزی است.

برای بررسی دقت روش پیشنهادی در شرایط وجود نویز، یک آنالیز حساسیت نیز انجام می‌گیرد؛ که علاوه بر حالت عدم وجود اغتشاش سه سطح نویز با شدت‌های مختلف $R=0.5\%$ ، $R=1.0\%$ و $R=2.0\%$ در روند شناسایی در نظر گرفته می‌شود. رابطه شدت نویز در مرجع [۱۵] آمده است. شکل (b-۲) تا (f-۲) به ترتیب مقدار خطا در شناسایی سختی k_x ، k_y ، k_θ ، $k_{x\theta}$ و $k_{y\theta}$ را در سه حالت ذکر شده برحسب درصد نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (b-۲) تا (f-۲) دیده می‌شود، مقدار خطا در شناسایی مولفه‌های پنج‌گانه بردار سختی به ترتیب در نویز ۰/۵ درصد و ۱ درصد کمتر از ۱/۵ درصد و ۳/۵ درصد می‌باشد؛ که خطای کمی در شناسایی سیستم می‌باشد. مقدار خطای شناسایی در نویز ۲ درصد، که درصد نویز بالایی نیز است، کمتر از ۶ درصد می‌باشد.

در ادامه مشابه با حالت شناسایی سیستم به شناسایی خسارت می‌پردازیم. برای این منظور سناریویی از آسیب در طبقات مختلف در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌گردد که سختی هر یک از مولفه‌های k_x ، k_y ، k_θ ، $k_{x\theta}$ و $k_{y\theta}$ در طبقات اول و چهارم به ترتیب به اندازه‌ی ۳۰، ۳۰، ۳۵ و ۲۵ درصد سختی اولیه در سازه کاهش پیدا کرده‌اند. هدف آن است با استفاده از روش پیشنهادی مکان، اندازه و نوع آسیب در سازه شناسایی گردد. شناسایی آسیب در حالت بدون وجود نویز در شکل (۳-۱) آمده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد مکان، اندازه و نوع آسیب در طبقات بالا و بدون خطای شناسایی شده‌اند. برای بررسی اثرات وجود نویز نیز همانند شناسایی سیستم در اینجا سه شدت نویز با سطح‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود. شکل (b-۳) تا (f-۳) به ترتیب مقدار آسیب (کاهش) در سختی‌های k_x ، k_y ، k_θ ، $k_{x\theta}$ و $k_{y\theta}$ را در سه حالت ذکر شده برحسب درصد سختی اولیه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (b-۳) تا (f-۳) دیده می‌شود مقدار خطا در شناسایی آسیب با افزایش سطح نویز افزایش می‌یابد. اما با این وجود مقدار خطا در شناسایی آسیب در مولفه‌های پنج‌گانه بردار سختی حتی با وجود شدت نویز بالا ($R=2\%$) کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. این دامنه مقادیر خطا حتی با وجود شدت نویز بالا، برای مقاصد کنترل سازه و SHM قابل قبول هستند.



شکل ۲: مقدار خطا در شناسایی سختی (a) پنج‌گانه (b) k_x (c) k_y (d) k_θ (e) $k_{x\theta}$ (f) $k_{y\theta}$



شکل ۳: شناسایی آسیب (کاهش) در سختی‌های (a) پنج‌گانه (b) k_x (c) k_y (d) k_θ (e) $k_{x\theta}$ (f) $k_{y\theta}$

جدول ۲: مولفه‌های پنج‌گانه سختی مثال عددی بر حسب $(N/m) \times 10^6$

نوع سختی	شماره طبقه				
	1	2	3	4	5
k_x	10527.82	10527.82	9037.06	2040.53	2040.53
k_y	16366.89	16366.89	13866.96	2686.04	2686.04
k_θ	1047482.28	1047482.28	945702.80	105240.69	105240.71
$k_{x\theta}$	9910.33	9910.33	4783.51	510.10	510.12
$k_{y\theta}$	13152.85	13152.85	4089.01	671.47	671.50

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق روش جدیدی برای شناسایی وجود، مکان، اندازه و نوع آسیب در سازه‌های سه‌بعدی ارائه گردید. در روش پیشنهادی علاوه بر سختی جانبی طبقه سختی پیچشی طبقه نیز شناسایی می‌گردد؛ که این خود می‌تواند در بررسی و کنترل سازه‌های حساس به پیچش مورد استفاده واقع شود. نتایج به دست آمده در آنالیز حساسیت مربوط به دقت شناسایی سیستم و آسیب نشان داد که الگوریتم پیشنهادی در حالت‌های وجود نویز حتی با شدت بالا، عملیات شناسایی را به طور موثر با خطای کم و قابل قبول انجام می‌دهد؛ به طوری که مکان، اندازه و نوع آسیب به طور موثری شناسایی می‌گردد.

۶- قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از حمایت مالی دانشگاه کردستان جهت انجام این پروژه تحقیقاتی تشکر و قدردانی نمایند.



مراجع

- [1] Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., and Czarnecki, J. J., *A review of structural health monitoring literature: 1996-2001*. 2004: Los Alamos National Laboratory Los Alamos, NM.
- [2] Natke, H. and C. Cempel, *Model-aided diagnosis based on symptoms*. Structural Damage Assessment Using Advanced Signal Processing Procedures, 1997: p. 363-375.
- [3] Doebling, S. and C. Farrar, *Using statistical analysis to enhance modal-based damage identification*. Structural Damage Assessment Using Advanced Signal Processing Procedures, 1997: p. 199-210.
- [4] Ahmadian, H., J. Mottershead, and M. Friswell, *Substructure Modes for Damage Detection*. Structural Damage Assessment Using Advanced Signal Processing Procedures, 1997: p. 257-268.
- [5] Ettouney, M., Daddazio, R., Hapij, A., and Aly, A. *Health monitoring of complex structures, smart structures and materials: industrial and commercial applications of smart structures technologies*. in *Proc. SPIE*. 1999.
- [6] Aktan, A. E., Catbas, F. N., Grimmelsman, K. A., and Tsikos, C. J., *Issues in infrastructure health monitoring for management*. Journal of Engineering Mechanics, 2000. **126**(7): p. 711-724.
- [7] Banan, M.R. and Y. Mehdi-Pour, *Detection and assessment of damage in 2D structures using measured modal response*. Journal of Sound and Vibration, 2007. **306**(3): p. 803-817.
- [8] Rahai, A., F. Bakhtiari-Nejad, and A. Esfandiari, *Damage assessment of structure using incomplete measured mode shapes*. Structural Control and Health Monitoring, 2007. **14**(5): p. 808-829.
- [9] Zárate, B.A. and J.M. Caicedo, *Finite element model updating: Multiple alternatives*. Engineering Structures, 2008. **30**(12): p. 3724-3730.
- [10] Amini, F. and M.S. Shahidzadeh, *Damage detection using a new regularization method with variable parameter*. Archive of Applied Mechanics, 2010. **80**(3): p. 255-269.
- [11] Duan, H., S. Li, and Y. Liu, *A nonlinear two-stage damage identification method for steel frames*. IJACT: international Journal of advancements in computing technology, 2011. **3**(4): p. 109-120.
- [12] Çelebi, M., Huang, M., Shakal, A., Hooper, J., and Klemencic, R., *Ambient response of a unique performance-based design tall building with dynamic response modification features*. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2013. **22**(10): p. 816-829.
- [13] Bagheri, A. and S. Kourehli, *Damage detection of structures under earthquake excitation using discrete wavelet analysis*. Asian J. Ci. Eng.(BHRC), 2013. **14**: p. 289-304.
- [14] Cherng, A.-P., *Optimal sensor placement for modal parameter identification using signal subspace correlation techniques*. Mechanical systems and signal processing, 2003. **17**(2): p. 361-378.
- [15] Amini, F. and K. Karami, *Damage detection algorithm based on identified system Markov parameters (DDA/ISMP) in building structures with limited sensors*. Smart Materials and Structures, 2012. **21**(5): p. 055010.
- [16] Bighamian, R., H.R. Mirdamadi, and J.-O. Hahn, *Damage Identification in Collocated Structural Systems Using Structural Markov Parameters*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2015. **137**(4): p. 041001.
- [17] Juang, J.N., *Applied System Identification*. 1994: Prentice Hall.
- [18] Chopra, A.K., *Dynamics of structures*. Vol. 3. 1995: Prentice Hall New Jersey.