Damage Detection in Three-Dimensional Frames by Use of Rotational Components of Mode Shapes

Omid Bahar
Associate Professor, Structural Engineering Research Center
omidbahar@iiees.ac.ir

Zahra Torang

Damage in structural elements causes obvious changes in their physical properties such as stiffness and damping. These changes affect the stiffness and damping matrices of whole building so its mode shapes change. Therefore, mode shapes of existing building are widely used in damage detection methods. This paper focused on considering the importance of using some rotational/translational components of the mode shapes to detect damages in structural frames. In order to analysis the frames and update them, an automatic iterative model updating program is developed in MATLAB software which works with OpenSees for conducting finite element analysis. The iterative program evaluates a set of objective functions in each step and tries to optimize them by means of nonlinear least square method. Objective functions are defined based on combination of two criteria of these four items: comparison between frequencies and/or mode shapes of two situations, the modal assurance criteria (MAC), and the modal flexibility matrices. In order to verify the effectiveness of the developed program, some three-dimensional steel structures are modeled and evaluated. It has been considered that these frames suffered damages which are defined by different scenarios for each of them. Actually, in this study damages are defined by reduction in elements' stiffness. Mode shape components and natural frequencies of damaged structures are the only needed input data for the program. In order to investigate the influence of rotational components in model updating, frames have been analyzed with three types of data in each scenario, all translational/ or rotational components, and all components of mode shapes. Extensive analyses show that among employed objective function, the one which compares mode shapes is the most successful one in damage detection. The findings indicated that the translational components of mode shapes are not capable of detecting damages accurately. It can be concluded that using rotational data leads to more precise results in determining both locations of damage and their intensities. Real data which are extracted from existing building always are polluted by noises due to human or machine faults or sometimes errors in numerical methods

تشخیص آسیب در قابهای سه‌بعدی با بکارگیری مؤلفه‌های دورانی شکل‌های مودی

امید بهار
دانشیار پژوهشکده مهندسی سازه omidbahar@iiees.ac.ir

زهرا تورنگ

هنگامی که سازه‌ها تحت بارهای متوسط تا شدید محیطی آسیب می بینند، مشخصات فیزیکی آنها مانند سختی، میرایی و در نتیجه شکل مودهای ارتعاشی آنها تغییر می‌نماید. مرور ادبیات فنی و بررسی نتایج تحقیقات مذکور، حاکی از مؤثر بودن استفاده از اطلاعات مودی در تشخیص آسیب سازه‌ها می‌باشد. در حالت کلی، بردارهای شکل مودی در سازه‌ها شامل مؤلفه‌های دورانی و انتقالی در درجات آزادی سازه می‌باشند. با توجه به اینکه اندازه‌گیری مؤلفه‌های شکل مودی در درجات آزادی دورانی کار آسانی نیست، در اکثر تحقیقات انجام شده فقط از مؤلفه‌های انتقالی شکل مود در تشکیل توابع هدف استفاده شده است. در این تحقیق، تأثیر مؤلفه های دورانی شکل مود در افزایش کارایی روش‌های به‌روزرسانی و تدقیق موقعیت و میزان آسیب در قابهای سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.

در این راستا، یک برنامه اتوماتیک به روزرسانی سازه که به روش تکرارشونده عمل می‌کند در فضای نرم‌افزارMATLAB ایجاد گردید که از نرم‌افزار اجزای محدود OpenSees برای تحلیل سازه، بهره می‌گیرد. به منظور شناسایی آسیب در این تحقیق توابع هدف مختلفی مورد استفاده قرار گرفتند که در تعریف آنها شکل‌های مودی تجربی و تحلیلی به کارگرفته شده است. این توابع ترکیبی از معیار ارزیابی مودی، تفاضل اشکال مودی، تفاضل ماتریس نرمی مودال و تفاضل فرکانس‌های طبیعی سازه آسیب‌دیده موجود و مدل تحلیلی می‌باشند. توابع هدف مورد نظر توسط روش کمترین مربعات غیرخطی بهینه‌یابی گردیدند. برای بررسی عملکرد هر دسته از مؤلفه‌های مودی در به روزرسانی مدل سه روش داده برداری مختلف شامل: الف) مؤلفه‌های انتقالی اشکال مودی، ب) مؤلفه‌های دورانی اشکال مودی و ج) تمامی مؤلفه‌های مودی در درجات آزادی سازه در نظر گرفته شده است.

جهت ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، سازه‌های فلزی مختلف با سناریوی متفاوت آسیب آنالیز گردیدند. آسیب در این تحقیق به صورت کاهش سختی المان تعریف شده است. در واقع درصد کاهش سختی المان نسبت به المان سالم به عنوان میزان آسیب لحاظ گردیده است. در هریک از سناریوهای مورد بررسی فرض شده که چند المان مختلف سازه که در موقعیت‌های پراکنده وجود دارند، دچار آسیب گردیده است. نتایج تحلیل‌های گسترده نشان می‌دهد که استفاده از مؤلفه‌های دورانی در افزایش دقت شناسایی آسیب تأثیر به سزایی دارد به نحوی که با استفاده از این مؤلفه‌ها هم موقعیت المان‌های آسیب دیده به خوبی شناسایی می گردد و هم میزان آسیب موجود در آنها به درستی تخمین زده می‌شود. به علاوه، گزارش خطا در المان‌های سالم به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین بررسی نتایج تحلیل حاکی از کارآمدی روش در شناسایی آسیب حتی با داده‌های آغشته به نوفه می‌باشد. با توجه به اینکه برداشت داده‌های دورانی در سازه‌های واقعی دشوار می‌باشد در ادامه با بکارگیری روش‌های گسترش مودال و استفاده

lead to inexact input data. Since the data which has been employed in this study are exact numerical data, to consider the effects of these errors, analytical modal data has been polluted by some noises. Surprisingly, the results show that even with noisy data, the proposed method can detect damages precisely. Since measuring rotational components of mode shapes still is not very convenient, modal dynamic expansion technique is applied to generate rotational components from measured translational ones. The findings indicated that the developed model updating program is really efficient in damage detection even with generated data and considering noise effects. Moreover, methods which use rotational components of mode shapes can predict damage's location and its intensity more precisely than the ones which only work with translational data. At the end, experimental data that has been extracted from a full-scale model of a steel frame are used to detect damaged elements and the intensity of their damage, that the results were acceptable.

The purpose of the current study was to determine the influence of rotational components of mode shapes in enhancing the accuracy of damage detection analysis. This paper has two main parts where the first parts focused on introduction of a new algorithm that uses optimization method in an iterative manner with an objective function for model updating. This program has been developed in MATLAB that uses OpenSees as its finite element analysis engine. Two three-dimensional steel frames have been analyzed and the results confirmed that this algorithm can precisely detect damages in different scenarios. Also, the results show that using rotational components of mode shapes is a great help for damage detection. The most obvious finding to emerge from this study is that, when only rotational or both rotational and translational components of mode shapes are employed in composition of objective function, damages' location can be detected more accurately and reported intensity of damages are very closer to the actual ones. Since in most of the experimental cases measuring rotational components is not convenient, the second part of the study uses a data expansion method to produce the rotational components of mode shapes. In order to generate the unmeasured component of mode shapes, Kammer expansion method has been used in an iterative manner where in each stage the updated model's mode shapes have been used for data expansion in experimental case. Two mentioned frames have been investigated and only their translational components of mode shape have been measured. By expanding modal data to generate rotational components and using them in model updating algorithm, damaged elements have

از داده‌های انتقالی یا همان مؤلفه‌های انتقالی شکل مود، به تولید مؤلفه‌های دورانی و به‌روزرسانی مدل پرداخته شد. شایان ذکر است، در این مسیر ماتریسهای تبدیل مورد استفاده برای بازتولید داده‌های دورانی، در گامهای مختلف با داده‌های سازه به روز شده در آن گام، اصلاح می‌گردند تا نتایج تدقیق گردد. آنالیزهای متعددی روی سازه‌های سه بعدی با سناریوهای مختلف آسیب انجام گرفت که نتایج حاکی از کارآمدی روش ارائه شده در تشخیص موقعیت المان‌های آسیب دیده و برآورد میزان آسیب وارد به آنها بودند. سپس آنالیزها با استفاده‌های برداشت داده‌های انتقالی در برخی از درجات آزادی سازه، یا به عبارتی داده‌های ناکامل نیز تکرار شدند که نتایج نشان دادند در این حالات نیز شناسایی آسیب به درستی صورت گرفته است. در انتها، با استفاده از داده‌های آزمایش صورت گرفته روی یک سازه سه طبقه فولادی با مقیاس واقعی، آسیبهای وارد به آن از طریق الگوریتم پیشنهادی شناسایی گردیدند. نتایج این تحلیل نیز عملکرد مناسب روش را در بازتولید داده و شناسایی آسیبهای سازه تأیید نمود.

نتایج تحلیل‌های انجام شده حاکی از این است که تابع هدف تعریف شده با استفاده از معیار ارزیابی شاخص مودی در هیچ یک از موارد قادر به شناسایی دقیق موقعیت و میزان آسیب نبوده است.

- استفاده از داده‌های انتقالی در الگوریتم تعریف شده با توابع هدف مورد نظر، به تنهایی تقریباً در هیچ موردی منجر به شناسایی دقیق محل و میزان آسیب نمی‌گردد و حتی در مواردی که المان‌های آسیب‌دیده تشخیص داده می‌شوند، میزان آسیب گزارش شده در المان‌های سالم نیز قابل ملاحظه است.
- به طور کلی بررسی تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های دورانی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج شناسایی آسیب دارد به نحوی که میزان و موقعیت آسیب با دقت بیشتری مشخص می‌گردد و در المان‌های سالم نیز آسیب بسیار کمی گزارش می‌شود که قابل چشم‌پوشی می‌باشد.
- برنامه ارائه شده با تابع هدف اول که تفاضل شکل‌های مودی را نشان می‌دهد در همه سناریوها عملکرد خوبی در شناسایی آسیب داشته است.
- همچنین نتایج تحلیل‌های انجام شده روی داده‌هایی که نوفه به آنها وارد شده، حاکی از توانایی روش ارائه شده در شناسایی آسیب حتی با وجود استفاده از داده‌های اولیه غیردقیق می‌باشند.
- بررسی‌های صورت گرفته روی نتایج تحلیل‌های گسترده، نشان می‌دهد که روش ارائه شده برای شناسایی آسیب با تابع هدف تفاضل شکل‌های مودی از همگرایی بسیار خوبی برخوردار است.
- نتایج تحلیل‌های صورت گرفته با داده‌های دورانی بازتولید شده با تکنیک‌های گسترش مودال بیانگر سازگاری روش انتخابی با الگوریتم کلی به روزرسانی سازه می‌باشد که منجر به نتایج دقیقی در شناسایی آسیب گردیده است.
- تحلیل‌های که با داده‌های برداشت شده از نیمی از درجات آزادی انتقالی هر طبقه انجام گرفته نشان می‌دهد که با این تعداد داده‌ها و گسترش آنها نیز آسیب به خوبی شناسایی گردیده که حاکی از عملکرد بسیار خوب برنامه توسعه یافته می‌باشد.

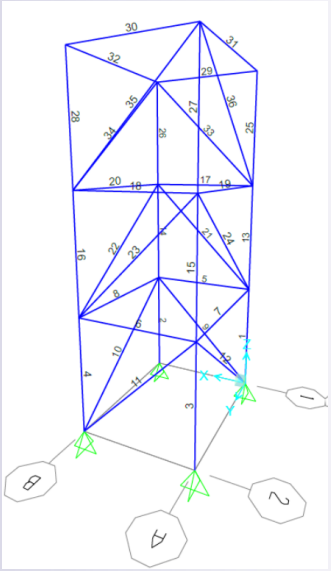
unesco
Category 2 Centre under the auspices of UNESCO
RCECWA
Regional Education and Research Center on Earthquake Risk Management and Resilience for West and Central Asia
International Institute of Earthquake Engineering and Seismology

been detected and the severity of their damage have been estimated accurately. Actually, almost all damaged elements are detected and some minor false damages are reported in undamaged elements. It is clear that in damage detection, overestimation of damages or reporting false damage in undamaged elements puts the plan in the safe side.

Generally speaking, investigating all analyses results in this research, it can be concluded that when the developed model updating program works with rotational components of mode shapes, the outcomes are more precise in comparison to using only translational components.

Besides, analysis confirmed that even in cases that data is contaminated with noise, results are acceptable. Although the study has successfully demonstrated that using rotational components of mode shapes is efficient in model updating, it has certain limitations. For instance, only two frames have been investigated here, and for generalization more analysis on different frames is needed. This study provided an appropriate program for model updating and damage detection of existing structure by use of experimental data. Besides, these findings enhanced our understanding of the role of rotational degree of freedom in health monitoring and proved the efficiency of used expansion method in generating valid rotational data. To extend our research, we intend to analyze more complicated structures, with the hope that these planned tests can confirm our findings.

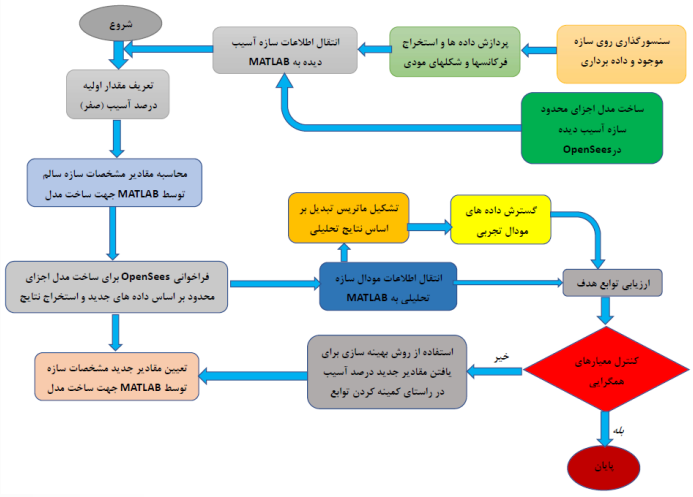
Keywords: Model updating method; Iterative optimization method; Damage detection method; Rotational DOFs; translational DOFs; Modal dynamic expansion method



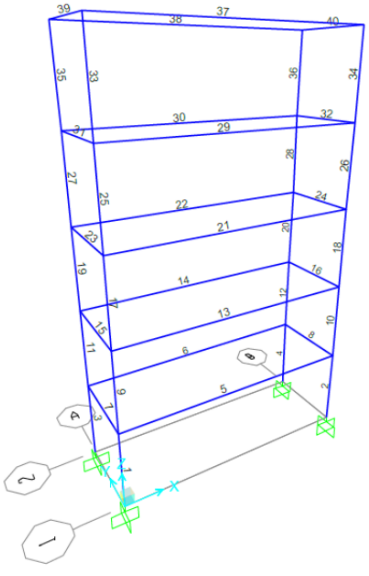
نتایج شناسایی آسیب قاب مهاربندی برای سناریوی آسیب دوم با داده‌های بازتولید شده

♦ تحلیل‌های انجام شده بر روی سازه آزمایش شده که در آن نیز برداشت داده به صورت ناکامل صورت گرفته و توسط برنامه گسترش داده و شناسایی آسیب انجام شده نیز از دقت خوبی برخوردار می‌باشد.

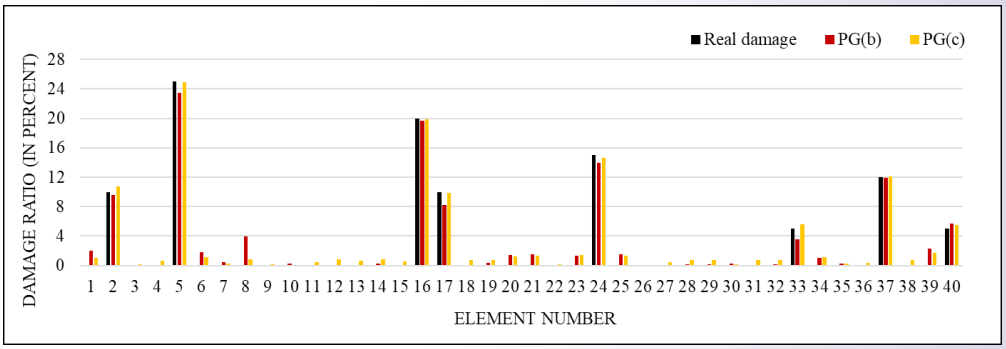
واژه‌های کلیدی: روش به‌روزرسانی، بهینه‌سازی تکرارشونده، روش شناسایی آسیب، درجات آزادی انتقالی، درجات آزادی دورانی



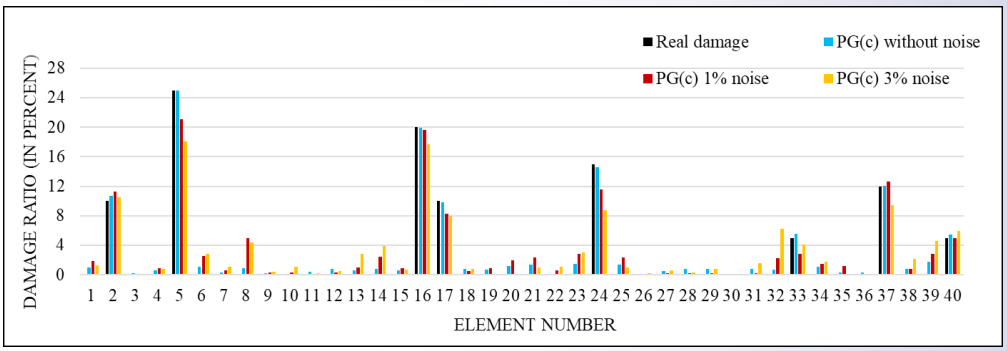
فلوچارت نحوه عملکرد برنامه شناسایی آسیب با بازتولید داده‌ها



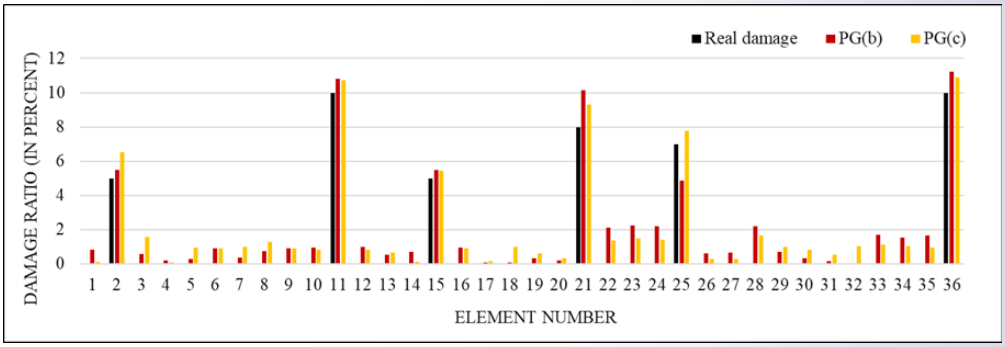
قاب خمشی پنج طبقه مورد بررسی



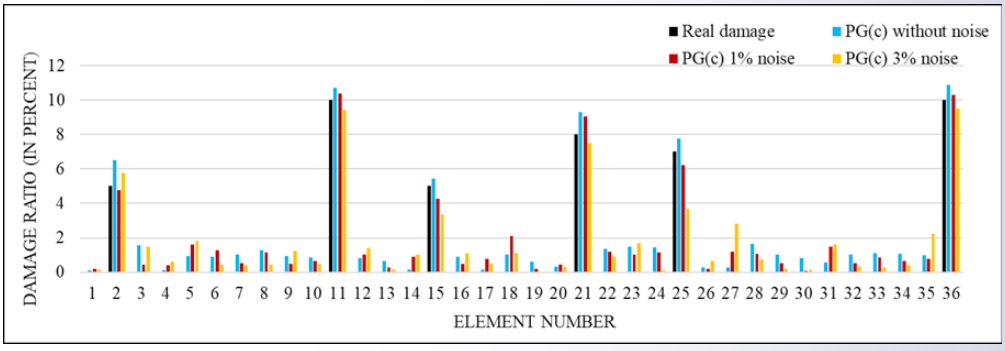
نتایج شناسایی آسیب قاب خمشی برای سناریوی آسیب سوم با داده‌های بازتولید شده



نتایج شناسایی آسیب قاب خمشی برای سناریوی آسیب سوم با داده‌های بازتولید شده و اثر نوفه



قاب مهاربندی سه طبقه فولادی



نتایج شناسایی آسیب قاب مهاربندی برای سناریوی آسیب دوم با داده‌های بازتولید شده و اثر نوفه