

شناسایی خرابی در سازه‌ها با استفاده از روش‌های مبتنی بر تحلیل حساسیت تحت زلزله‌های مصنوعی

غلامرضا هوایی^{*۱}

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

امروزه عیب‌یابی سازه‌ها یکی از فعال‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی می‌باشد. پاسخ‌های سازه‌ای متعددی برای تعیین موقعیت و شدت خرابی در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از پاسخ‌هایی که می‌تواند جهت شناسایی خرابی مورد استفاده قرار گیرد تغییر شکل‌هایی هستند که در تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی به راحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشند. از جمله شتاب‌نگاشت‌هایی که در تحلیل تاریخچه زمانی بکار گرفته می‌شود شتاب‌نگاشت مصنوعی می‌باشد. در این تحقیق جهت تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی، شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی منطبق بر خواص لرزه‌خیزی منطقه تولید شده‌اند و برای این کار توابع موجکی مورد استفاده قرار گرفته است. روشی که جهت شناسایی خرابی مورد استفاده قرار گرفت روش عیب‌یابی مبتنی بر تحلیل حساسیت بود و تغییرهای گره‌ای ناشی از اثر شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی بر سازه، به عنوان پارامترهای ورودی در این مسئله عیب‌یابی بودند. در این تحقیق برای نشان دادن قابلیت شتاب‌نگاشت مصنوعی جهت شناسایی خرابی، دو مثال عددی شامل یک خرابی و یک قاب سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شتاب‌نگاشت مصنوعی نه تنها برای تشخیص خرابی سازه‌ای مؤثر می‌باشد بلکه نتایج دقیق‌تری نیز، نسبت به شتاب‌نگاشت طبیعی ارائه داد.

کلمات کلیدی: عیب‌یابی، تحلیل تاریخچه زمانی، شتاب‌نگاشت مصنوعی، تحلیل حساسیت

Sensitivity Based Analyses by Artificial Earthquake by Measuring Structural Accelerations for Damage Assessment

GholamReza Havaei^{*1}

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In the recent years, damage detection of structures has been one of the active research areas in sensitivity analyses. There are various responses to determine the location and extent of damages in structures which one of them is deformations caused by dynamic stimulation of time history. In this research, artificial acceleration mapping, which is used in time history analyses, produced in agreement with earthquake properties by using wavelet functions. The approach which was used for damage detection was sensitivity based damage detection. Joint deformations caused by artificial acceleration mapping in structures were inputs of damage detection problem. In this research to show the capabilities of artificial acceleration mapping, two numerical cases were studied. Results indicated that artificial acceleration mapping not only was efficient in damage detection, it was more accurate than natural acceleration mapping.

Keywords: Damage detection, Time history analysis, artificial accelerate, Sensitivity analysis

* نویسنده مسئول: غلامرضا هوایی، havaei@aut.ac.ir

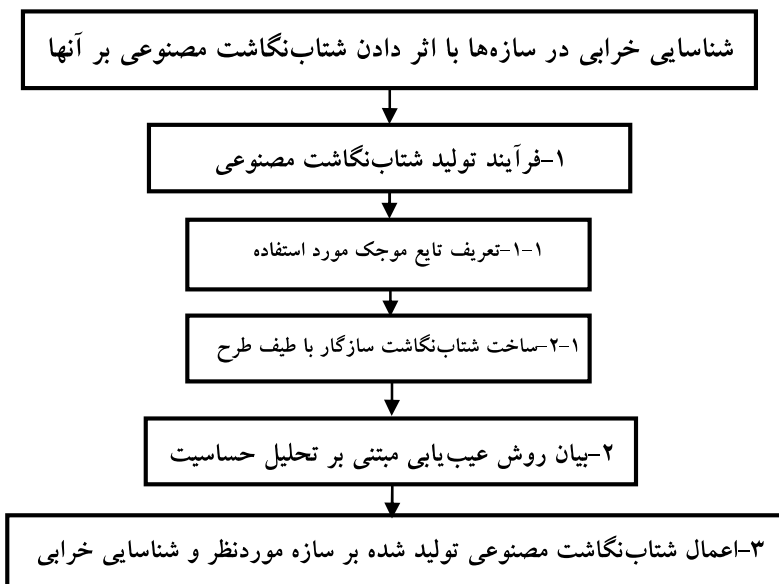
تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۱۱/۱۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۱/۲۵

۱- مقدمه

امروزه عیب‌یابی سازه‌ها یکی از فعال‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی می‌باشد [۱]. اخیراً روش‌های جدید زیادی برای شناسایی خرابی پیشنهاد شده است که از مناسب‌ترین این روش‌ها، روش‌های مبتنی بر تحلیل حساسیت می‌باشد [۲]. در روش‌های مبتنی بر تحلیل حساسیت، پاسخ‌های سازه‌ای متعددی برای تعیین موقعیت و شدت خرابی در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. برای مثال وانگ و هو یک الگوریتم عیب‌یابی سازه‌ای را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی استاتیکی و تغییرات در فرکانس‌های طبیعی ارائه کرده و نشان دادند که الگوریتم پیشنهاد شده برای شناسایی خرابی مؤثر است [۴]. از جمله پاسخ‌های سازه‌ای که می‌توانند جهت عیب‌یابی مورد استفاده قرار گیرند، تغییرشکل‌های ناشی از اثر زلزله بر سازه می‌باشند [۵]. برای تعیین تغییرشکل‌های ناشی از زلزله در سازه‌ها، عموماً سه روش متفاوت از قبیل روش استاتیکی معادل، روش تحلیل طیف پاسخ و روش تحلیل تاریخچه زمانی پیشنهاد می‌شود [۶]. با توجه به محدودیت روش‌های استاتیکی معادل و طیفی برای تحلیل سازه‌های خاص، که دارای مدهای نزدیک به هم و یا درصد مشارکت مدی پایین هستند، عموماً روش تحلیل تاریخچه زمانی جهت به‌دست آوردن تغییرشکل‌های ناشی از زلزله پیشنهاد می‌شود. آیین‌نامه‌ها معمولاً با در نظر گرفتن احتمال وقوع زلزله و سابقه لرزه‌خیزی در هر منطقه، طیفی را متناسب با آن منطقه پیشنهاد می‌کنند و انتخاب شتاب‌نگاشت‌های منطبق بر آن طیف را برای تحلیل تاریخچه زمانی توصیه می‌کنند. از جمله راه‌های مناسب تولید شتاب‌نگاشت‌های سازگار با طیف طرح، اصلاح حرکت یک شتاب‌نگاشت ثبت‌شده و تولید یک شتاب‌نگاشت مصنوعی می‌باشد. یکی از مشکلاتی که تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی منطبق بر طیف دارد بالا رفتن خیلی زیاد شاخص انرژی زلزله است که این امر باعث بالا رفتن انرژی ورودی به سازه از طرف زلزله می‌شود [۷]. در تحقیقاتی که تاکنون انجام شده، با اثر دادن شتاب‌نگاشت‌های طبیعی بر روی سازه‌ها، شناسایی خرابی صورت گرفته است و به دلیل اینکه شتاب‌نگاشت موجود بر طیف طرح منطبق نمی‌باشد، در بعضی مواقع منجر به نتایج غیرواقعی شده است [۵]. در این تحقیق از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی که با استفاده از توابع موجکی، بر طیف طرح منطبق شده‌اند و شاخص انرژی آنها به‌شدت افزایش یافته است، جهت عیب‌یابی استفاده شده است. تغییرشکل‌های گره‌ای، که در اثر اعمال شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی در سازه به دست می‌آید، با تغییرشکل‌های گره‌ای که در سازه سالم به وجود می‌آید، متفاوت می‌باشد. به همین دلیل، دستگاه معادلات خطی عیب‌یابی تعیین گردیده است و ماتریس حساسیت پاسخ سازه‌ای نسبت به خرابی اعضا به‌عنوان ماتریس ضرایب دستگاه معادلات استخراج گردیده است. برای حل چنین دستگاه معادلاتی و به دست آوردن جواب دقیق خرابی، فرآیند نیوتن رافسون که روش بسیار دقیق‌تری در این‌گونه مسائل است، به کار گرفته شده است که در آن ماتریس حساسیت طی هر مرحله، به‌روزرسانی می‌شود. روش عیب‌یابی بیان‌شده بر روی یک سازه برج خرابی و یک قاب سه‌بعدی به کار گرفته شده و نتایج حاصل از آن برای هر دو زلزله واقعی و مصنوعی به‌دست‌آمده است. این نتایج نشان داده که تغییرشکل‌های گره‌ای ناشی از اثر دادن شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی به سازه‌ها، به دلیل بالا بودن شاخص انرژی، یک پاسخ مناسب و مؤثر جهت عیب‌یابی این سازه‌ها می‌باشد.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق هدف شناسایی محل و شدت خرابی با استفاده از تغییرشکل‌های گره‌ای ناشی از اثر شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی بر سازه‌ها و مقایسه نتایج عیب‌یابی ناشی از آن با نتایج ناشی از اثر شتاب‌نگاشت طبیعی می‌باشد. جهت تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی منطبق بر طیف طرح، از توابع موجکی استفاده می‌شود. همچنین روشی که جهت شناسایی خرابی مورد استفاده قرار می‌گیرد روش عیب‌یابی مبتنی بر تحلیل حساسیت می‌باشد بدین‌صورت که دستگاه معادلات خطی عیب‌یابی تعیین گردیده است و برای حل چنین دستگاه معادلاتی و به دست آوردن جواب دقیق خرابی، فرآیند نیوتن رافسون به کار گرفته شده است که در آن ماتریس حساسیت طی هر مرحله، به‌روزرسانی می‌شود. مراحل تحقیق بدین‌صورت می‌باشد که در مرحله اول فرآیند تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی توضیح داده می‌شود و در مرحله دوم روش عیب‌یابی مبتنی بر تحلیل حساسیت بیان شود. در شکل ۱ مراحل شناسایی خرابی در سازه‌ها با اثر دادن شتاب‌نگاشت مصنوعی بر آنها نشان داده شده



شکل ۱: مراحل شناسایی خرابی در سازه‌ها با اثر دادن شتاب‌نگاشت مصنوعی بر آنها

۱-۲- شناسایی خرابی در سازه‌ها با اثر دادن شتاب‌نگاشت مصنوعی

۱-۱-۲- فرآیند تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی

اگر فرض کنیم $F(t)$ همان شتاب‌نگاشت مربوط به حرکت زمین باشد و با $\ddot{x}_g(t)$ نمایش داده شود، رابطه ۱ به صورت زیر می‌باشد [۸].

$$\ddot{x}_g(t) = \sum_{j=1}^n D(a_j, t) \Delta a_j \quad (1)$$

در معادله ۱، a ضریب مقیاس موجک، $D(a, t)$ تابع جزئیات (Detail Function) و n تعداد ضرایب مقیاس نامیده می‌شود. که به صورت روابط ۲ و ۳ تعریف می‌گردند [۸].

$$D(a_j, t_k) \approx \frac{\Delta b}{a_j^{5/2}} \sum_{i=1}^N C(a_j, b_i) \psi\left(\frac{t_k - b_i}{a_j}\right) \quad j = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$a_j = 2^{\frac{j}{8}} \quad j = -(n_0 - 1), -(n_0 - 2), \dots, -(n_0 - n) \quad (3)$$

در روابط ۲ و ۳، ψ تابع موجک مادر، $C(a, b)$ ضرایب موجکی، n مقادیر گسسته و n_0 یک عدد صحیح انتخابی است. شتاب زمین در بازه‌های زمانی برابر با Δt نمونه‌برداری می‌شود. اگر فرض شود رکورد در N زمان معزای t_k نمونه‌گیری شده باشد، b هم باید یک مجموعه N تایی غیر پیوسته باشد، شکل گسسته ضرایب تبدیل موجک به صورت رابطه ۴ بیان می‌شود [۸].

$$C(a_j, b_i) \approx \frac{\Delta t}{\sqrt{a_j}} \sum_{k=1}^N f(t_k) \psi\left(\frac{t_k - b_i}{a_j}\right) \quad i = 1, \dots, N \quad j = 1, \dots, n \quad (4)$$

فرکانس غالب و دوره تناوب هر تابع جزئیات به صورت رابطه ۵ می‌باشد.

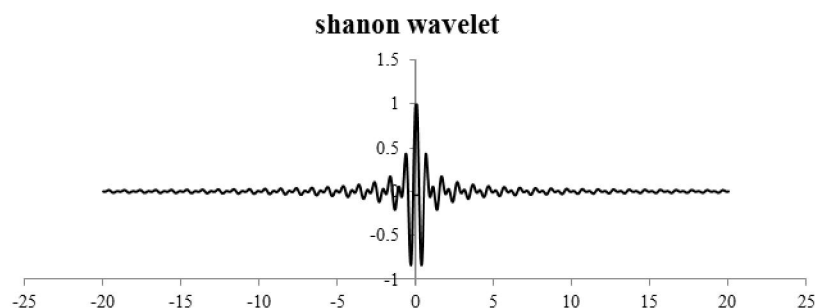
$$\omega_j = \frac{\Omega}{a_j}, \quad T_j = \frac{2\pi}{\Omega} a_j \quad (5)$$

در این پژوهش از بخش حقیقی موجک مادر شانون که موجکی سینوسی است و شباهت زیادی به امواج زلزله دارد استفاده شده است و به صورت معادله ۶ می‌باشد. در شکل ۲ دامنه‌ی موجک شانون مشخص شده است [۹]. ω فرکانس غالب تابع موجک مادر است که برای بخش حقیقی موجک شانون برابر $12/4$ به دست می‌آید.

$$\psi(x) = (f_b^{0.5}) \times (\text{sinc}(f_b x)) \times \exp(2\pi i \times f_c \times x)$$

$$f_b = 1, \quad f_c = 1.5 \quad (6)$$

$$\text{sinc}(x) = \begin{cases} 1 & t = 0 \\ \frac{\sin(\pi t)}{\pi t} & t \neq 0 \end{cases}$$



شکل ۲: دامنه پاسخ موجک شانون (بخش حقیقی) [۹]

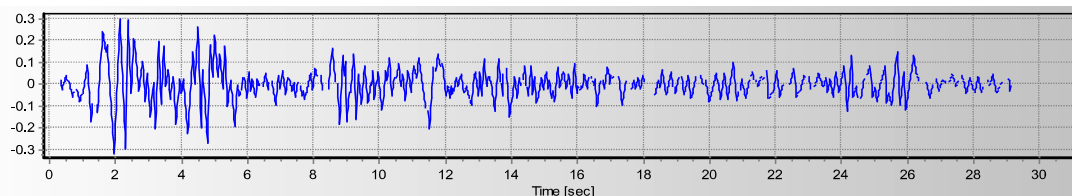
۲-۱-۲- ساخت شتاب‌نگاشت سازگار با طیف طرح

گام اول در ساخت شتاب‌نگاشت سازگار با طیف، انتخاب مقادیر گسسته a_j است. این کار باید به نحوی انجام شود که دوره تناوب‌های T_j از رابطه ۵ به خوبی محدوده‌ی دوره تناوب طیف پاسخ زلزله موردنظر (طیف هدف) را بپوشاند. با توجه به اینکه a_j به صورت $2^{j/8}$ بیان شد، مقادیر n و n_0 بیان‌کننده مقدار T_j و a_j است. در اینجا مقادیر $n=55$ و $n_0=31$ را برای بخش حقیقی موجک شانون پیشنهاد می‌کنیم. با انتخاب این مقادیر برای موجک شانون، T_j از 30 تا 24 و a_j از 0.0743 تا 8 تغییر می‌کند، و پریودها نیز از 0.03705 sec تا 0.05 sec تغییر می‌کند. از آنجاکه محدوده‌ی پریودهای طیف پاسخ بین 0 و 4 است مشاهده می‌شود که با انتخاب مقادیر پیشنهادی n و n_0 بازه به طور کامل پوشش داده می‌شود. در گام بعد طیف پاسخ رکورد انتخابی در دوره‌ی تناوب‌های T_j محاسبه می‌شود و نسبت طیف هدف به این طیف در پریودهای مختلف به صورت معادله ۷ حاصل می‌شود [۸]:

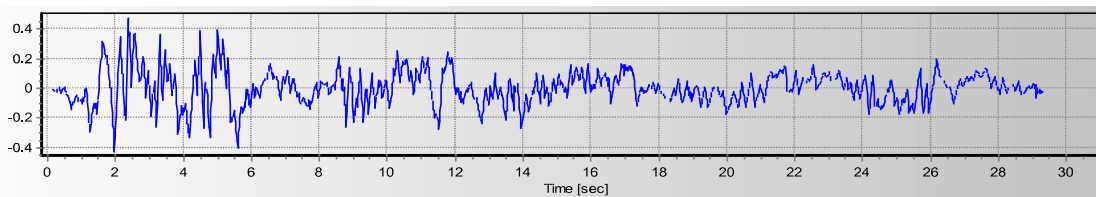
$$\gamma_j = \frac{[Sa(T_j)]_{\text{target}}}{[Sa(T_j)]_{\text{reconstructec}}} \quad (7)$$

هر تابع جزئیات در γ_i مربوطه ضرب و رکورد جدیدی بازسازی می‌شود. مجدداً طیف پاسخ این رکورد که تطابق بیشتری با طیف طرح دارد به دست می‌آید. این فرآیند تکرار می‌شود تا زمانی که تمامی مقادیر γ_i به اندازه کافی به 1 نزدیک شوند. این روش در مقایسه با

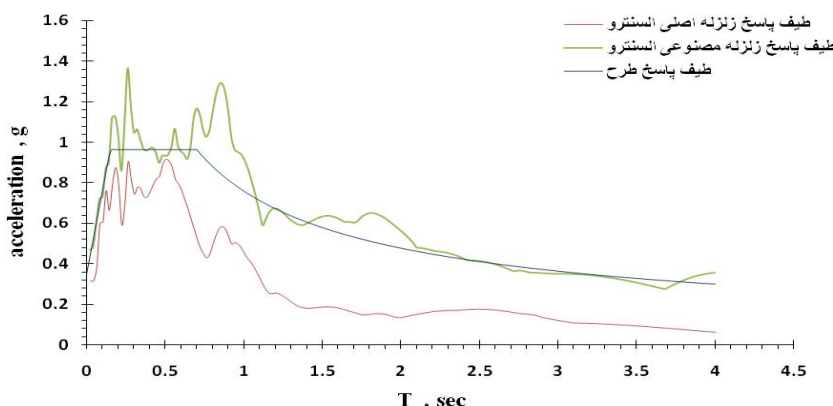
روش‌هایی که بر مبنای تکرار تبدیل معکوس فوریه و بدون استفاده از یک شتاب‌نگاشت اولیه به تولید حرکت زلزله می‌پردازند، نیاز به تعریف تابع پوشش برای غیر ایستا کردن فرآیند ندارد. در اینجا از شتاب‌نگاشت الاسترو که در سایت پیر ثبت شده [۱۰]، انتخاب شده است. طیف هدف از حاصل ضرب طیف بازتاب آئین‌نامه ۲۸۰۰، در شتاب مبنای طرح (A) حاصل می‌شود. نتایج حاصل در شکل‌های ۳ الی ۵ ارائه شده است (خاک نوع III).



شکل ۳: تاریخچه زمانی اصلی زلزله الاسترو



شکل ۴: تاریخچه زمانی اصلاح شده زلزله الاسترو



شکل ۵: طیف حرکت اصلی و اصلاح شده الاسترو

مشخصات زلزله‌های واقعی و اصلاح شده در جدول ۱ بیان شده است. در ادامه روش عیب‌یابی مبتنی بر تحلیل حساسیت توضیح داده شده و با استفاده از تغییر شکل‌های گره‌ای ناشی از تحلیل تاریخچه زمانی در اثر زلزله‌های مصنوعی و واقعی الاسترو بر روی یک سازه خرابی سه‌بعدی و یک قاب سه‌بعدی، شناسایی خرابی صورت گرفته است.

جدول ۱: مقایسه شاخص انرژی زلزله‌های واقعی و مصنوعی تولید شده

چگالی شاخص انرژی (cm ² /sec)		زلزله
مصنوعی	اصولی	السترو
۵۳۸۵۸	۲۰۴۰	

۲-۱-۳- روش عیب‌یابی مبتنی بر تحلیل حساسیت

پس از به دست آوردن زلزله اصلاح شده، از این زلزله که شاخص انرژی بالایی دارد جهت شناسایی خرابی سازه استفاده می‌شود. در اینجا روش عیب‌یابی مورد استفاده، مبتنی بر تحلیل حساسیت می‌باشد که به صورت رابطه ۸ و ۹ بیان می‌شود [۳].

$$R_d = R(X) \quad (8)$$

$$X = \{ x_1, x_2, \dots, x_n \} \quad 0 \leq x_i \leq 1 \quad (9)$$

در روابط ۸ و ۹، R_d پاسخ سازه خراب (منظور از پاسخ سازه در اینجا، تغییر شکل گره‌ای ناشی از اعمال شتاب‌نگاشت طبیعی یا مصنوعی بر سازه می‌باشد)، X بردار خرابی و n تعداد اعضا می‌باشد. اگر مقدار x_i برابر با صفر باشد عضو، سالم می‌باشد ولی اگر مقدار آن برابر با یک شد عضو، کاملاً خراب می‌باشد. در اینجا هدف حل دستگاه معادله رابطه ۸ است که یک دستگاه غیرخطی می‌باشد. بسط تیلور $R(X)$ نوشته می‌شود و رابطه ۸ به صورت روابط ۱۰ تا ۱۳ بیان می‌شود (از مراتب بالاتر بسط تیلور صرف نظر شده است) [۱۱].

$$\Delta R = R_d - R_h = \frac{\partial R}{\partial X} \Delta X \quad (10)$$

$$S = \frac{\partial R}{\partial X} \quad (11)$$

$$\Delta R = S \times \Delta X \quad (12)$$

$$\Delta R = S \times (X - X_0) \quad (13)$$

R_h در رابطه ۱۰ پاسخ سازه سالم و X_0 در رابطه ۱۳ مقدار خرابی در سازه سالم است پس مقدار آن صفر می‌باشد و S ماتریس حساسیت می‌باشد که به صورت روابط ۱۴ تا ۱۶ به دست می‌آید:

$$\Delta R = S \times X \quad (14)$$

$$S = \frac{\partial R}{\partial X} = [S_1 \ S_2 \ S_3 \ \dots \ S_n] \quad (15)$$

$$S_i = \frac{R_h - R_{di}}{0.001} \quad (16)$$

که در آن R_{di} پاسخ ناشی از خرابی عضو i در اثر ۰/۰۰۱ خرابی می‌باشد (در اینجا خرابی ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است و خرابی به صورت کاهش در مدول الاستیسیته عضو اعمال شده است). برای به دست آوردن ماتریس حساسیت، باید هر عضو را به اندازه ۰/۰۰۱ خراب در نظر گرفته و تغییر شکل گره‌ای که با اثر دادن شتاب‌نگاشت مصنوعی یا طبیعی به دست می‌آید را از آن را به دست آورد سپس از روابط ۱۵ و ۱۶ ماتریس حساسیت به دست می‌آید (روش تفاوت‌های محدود) [۳]. مقدار X در رابطه ۱۴ با استفاده از رابطه ۱۷ به دست می‌آید.

$$X = S^+ \Delta R \quad (17)$$

مسئله عیب‌یابی به صورت حل رابطه ۱۷ می‌باشد که جواب آن از طریق فرآیند نیوتن رافسون و به‌روزرسانی ماتریس حساسیت به دست می‌آید. به این صورت که در ابتدا بردار X برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود (سازه سالم فرض می‌شود) و R اولیه برابر با R سازه سالم

می‌باشد (R_h). ماتریس S^+ اولیه با استفاده از R_h و اعمال به‌طور مثال $0/001$ خرابی در هر عضو آن به دست می‌آید. و پاسخ ناشی از خرابی واقعی (R_d) می‌باشد. در روابط ۱۸ تا ۲۱ نحوه به دست آوردن بردار خرابی نشان داده شده است.

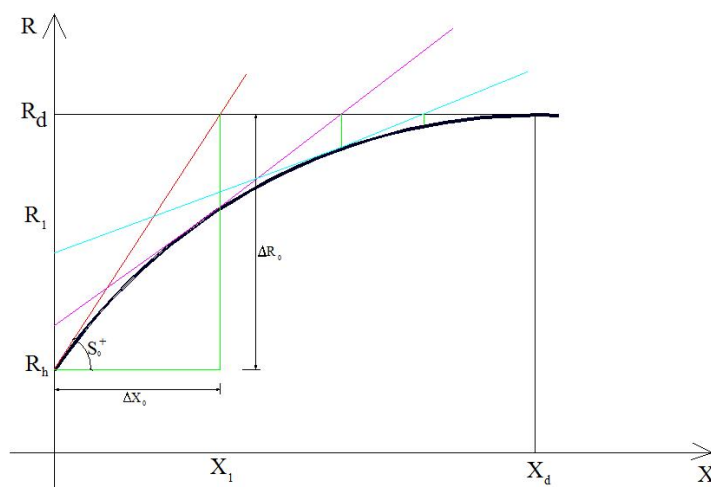
$$\Delta X_0 = S_0^+ \Delta R_0 = S_0^+ (R_d - R_h) \quad (18)$$

$$X_1 = X_0 + \Delta X_0 \Rightarrow R_1 \Rightarrow S_1^+ \quad (19)$$

$$\Delta R_1 = R_d - R_1 \quad (20)$$

$$\Delta X_{i+1} = S_i^+ \Delta R_{i+1} \Rightarrow X_{i+2} = X_{i+1} + \Delta X_{i+1} \quad (21)$$

در انتها باید به مقدار خرابی واقعی (همان بردار X سازه خراب) برسیم یعنی مقادیری از X که شامل عضوهای خراب هستند به مقدار خرابی و بقیه مقادیر X صفر باشند. در شکل ۶ چگونگی فرآیند نیوتن رافسون نشان داده شده است.



شکل ۶: چگونگی فرآیند نیوتن رافسون [۳]

۲-۱-۴- مدل‌سازی نویز با استفاده از توزیع نرمال

در بسیاری از مطالعات و بهره‌بردارهای معمول (بسته به نوع کاربرد) چندین متغیر تصادفی پاسخ مسئله هستند و نوع کارایی سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهند در مقابل این نوع، سیستم‌هایی نیز وجود دارند که تنها با تجزیه و تحلیل یک پارامتر پاسخ سیستم را مورد بررسی قرار می‌دهند. در نوع اول خروجی به پارامترهای متعددی از ورودی‌ها و متغیرهای ناخواسته سیستم (مثل نویز و...) بستگی پیدا می‌کند. بنابراین هنگامی که هدف داشتن خروجی قابل کنترل باشد تک‌تک این پارامترها در صحت آن دخیل خواهند بود. در اینجا نیز پاسخ‌هایی که از طریق اندازه‌گیری سنسورها به دست می‌آید به دلیل خطاهایی که در اندازه‌گیری وجود دارد دارای انواع نویز می‌باشند. نویزها که از طریق فرآیند تصادفی ایجاد می‌شوند دارای توزیع گوسی یا نرمال می‌باشند. به دلیل اینکه پاسخ‌ها در یک فضای چندبعدی می‌باشند این توزیع نرمال به صورت توزیع نرمال چندمتغیره می‌باشد. این نویزها می‌توانند به صورت جمعی و یا ضربی اعمال شوند. نمایش توزیع نرمال به صورت زیر می‌باشد.

$$Y \sim N(\mu, \Sigma) \quad (22)$$

که در آن Y بردار متغیر تصادفی، μ بردار میانگین و Σ ماتریس کواریانس می‌باشد.

۲-۱-۴-۱- نوین جمع

اگر A پاسخ سازه باشد و با Y جمع شود. نمایش توزیع نرمال آن به صورت زیر است.

$$Z \sim A + Y \quad (23)$$

$$Z \sim N(A + \mu, \Sigma) \quad (24)$$

اگر نمایش توزیع نرمال به صورت رابطه ۲۴ باشد آن را نوین جمع می‌گویند. به عبارتی در نوین جمع پاسخی مورد نظر با نوین جمع می‌شود.

۲-۱-۴-۲- نوین ضربی

اگر A در Y ضرب شود. نمایش توزیع نرمال آن به صورت زیر است.

$$Z = AY \quad (25)$$

$$Z \sim N(A\mu, A\Sigma A^T) \quad (26)$$

اگر نمایش توزیع نرمال به صورت رابطه ۲۶ باشد نوین ضربی می‌باشد.

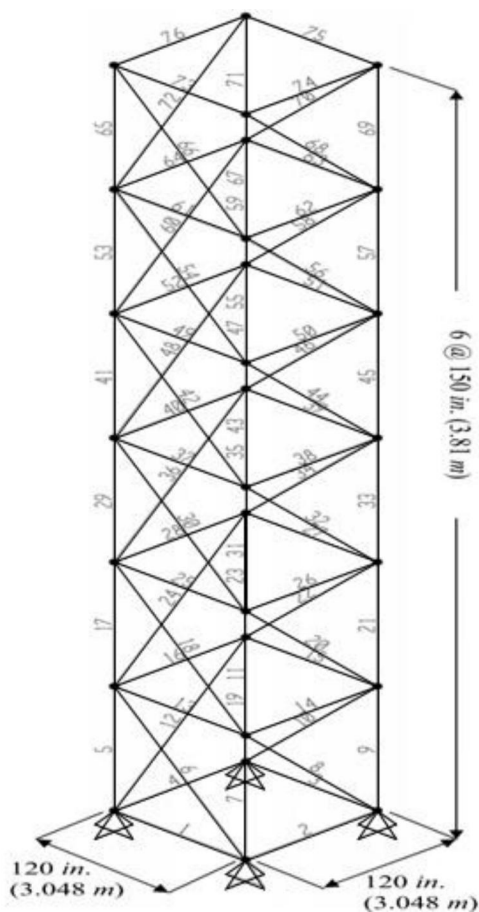
۳- مطالعات موردی

۱-۳- خرابی سه بعدی

سازه مورد مطالعه یک سازه خرابی سه بعدی می‌باشد که آن را که تحت اثر زلزله مصنوعی السترو قرار دارد و با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود Opensees تحلیل تاریخچه زمانی کرده و پاسخ تغییر شکل ناشی از آن به دست می‌آید. این سازه به ارتفاع ۲۲/۸۶ متر شامل ۷۶ عضو و ۲۸ گره، با ۸۴ درجه آزادی کل و ۷۲ درجه آزادی فعال در شکل ۷ نشان شده است. مدول الاستیسیته و جرم مخصوص فولاد به ترتیب $2038901/9 \text{ kg/cm}^2$ و 7850 kg/m^3 و سطح مقطع اعضای افقی، مایل و عمودی به ترتیب برابر $129/032 \text{ cm}^2$ ، $141/935 \text{ cm}^2$ و $258/064 \text{ cm}^2$ می‌باشد. شناسایی محل و شدت خرابی این سازه خرابی با استفاده از به روزرسانی ماتریس حساسیت انجام می‌شود. دو حالت مختلف آسیب در جدول ۲ نشان داده شده است.

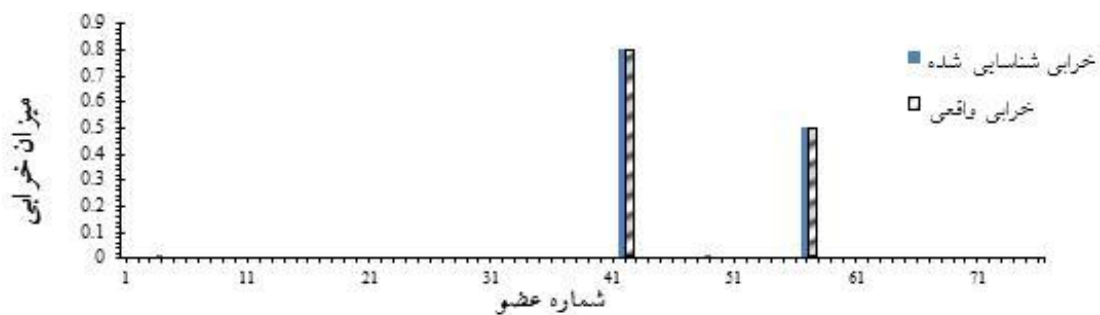
جدول ۲: حالات مختلف آسیب در سازه

حالت خرابی	اعضای آسیب دیده	درصد خرابی در عضو آسیب دیده	سطح مقطع عضو آسیب دیده (cm^2)
۱	شماره ۴۲	۸۰	۲۸/۳۸۷۰
	شماره ۵۷	۵۰	۱۲۹/۴۶۷۵
۲	شماره ۱۸	۴۵	۹۹/۳۵۴۵
	شماره ۴۳	۳۰	۱۴۱/۹۳۵۲
	شماره ۵۰	۵۰	۶۴/۵۱۶

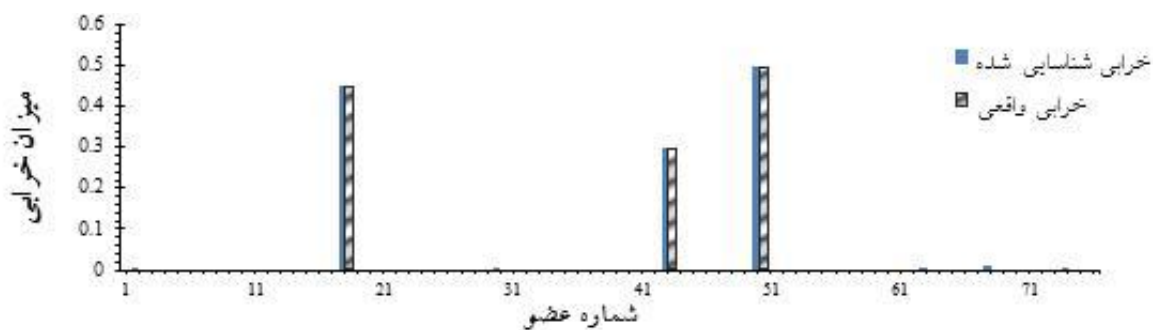


شکل ۷: سازه خرپای سه بعدی

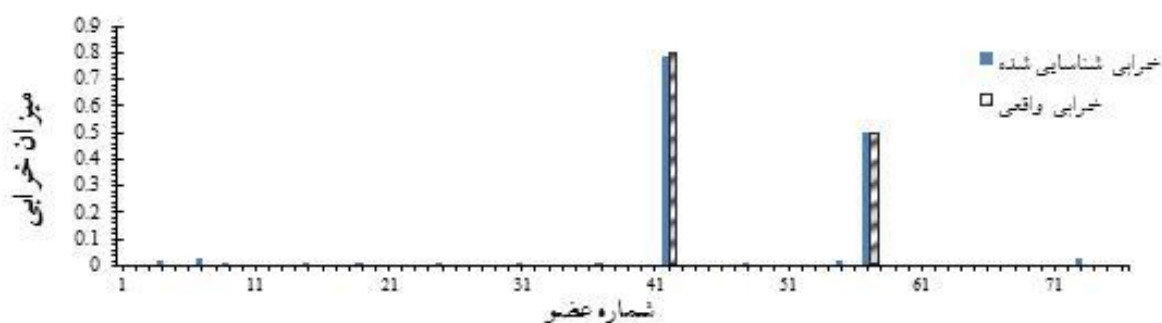
با استفاده از روش به روزرسانی نیوتن رافسون و پس از طی چند مرحله تکرار خرابی به خرابی واقعی نزدیک تر می شود. در مورد اول پس از ۸ بار تکرار و در مورد دوم پس از ۱۰ بار تکرار محل و شدت خرابی پیدا می شود. در شکل ۸ و ۹ مقدار خرابی واقعی و خرابی پیدا شده طی فرآیند نیوتن رافسون پس از طی مراحل تکرار بیان شده به ترتیب برای حالت اول و دوم خرابی نشان داده شده است و در شکل ۱۰ و ۱۱ این مقادیر برای زلزله واقعی نشان داده شده است.



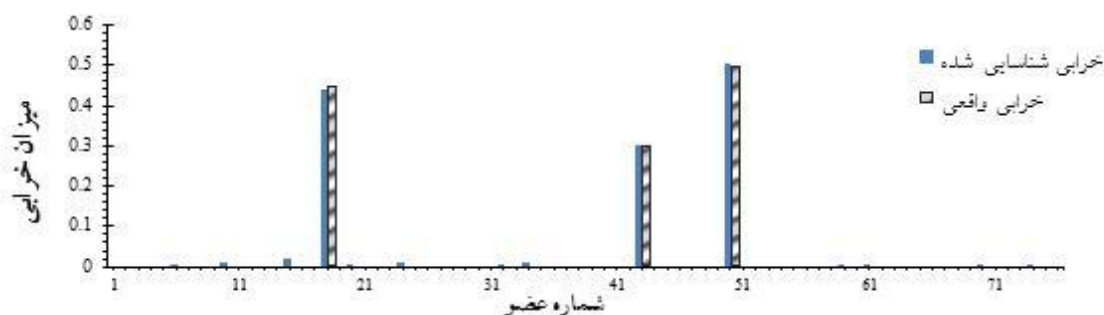
شکل ۸: مقدار خرابی واقعی و خرابی پیدا شده در حالت اول خرابی (تحت زلزله مصنوعی)



شکل ۹: مقدار خرابی واقعی و خرابی پیدا شده در حالت دوم خرابی (تحت زلزله مصنوعی)



شکل ۱۰: مقدار خرابی واقعی و خرابی پیدا شده در حالت اول خرابی (تحت زلزله طبیعی)



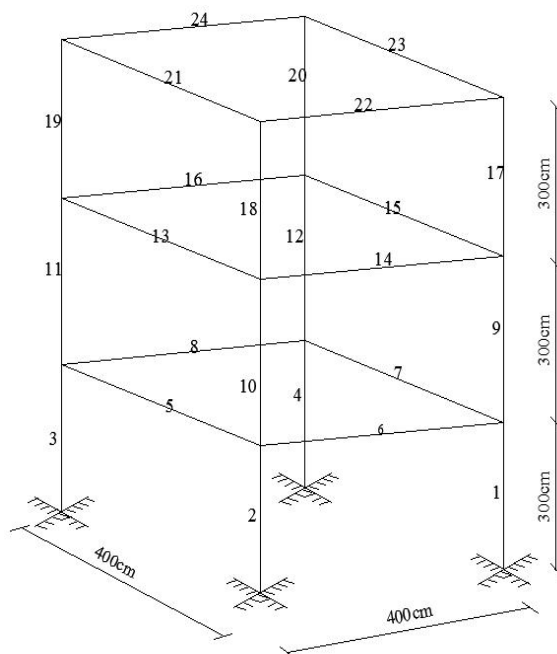
شکل ۱۱: مقدار خرابی واقعی و خرابی پیدا شده در حالت دوم خرابی (تحت زلزله طبیعی)

اگر این سازه را تحت زلزله واقعی (در اینجا زلزله السترو) قرار داده و تحلیل کنیم، و عیب‌یابی هم با استفاده از روش به‌روزرسانی نیوتن رافسون، انجام شود در حالت اول خرابی پس از ۱۳ بار تکرار و در حالت دوم پس از ۱۴ بار به خرابی واقعی نزدیک می‌شود (مقادیر خرابی واقعی و خرابی شناسایی شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تحت زلزله واقعی نشان داده شده است). همان‌طور که در شکل‌ها نشان داده شده است، پس از طی مراحل تکرار بیان شده در حالت استفاده از زلزله واقعی، نسبت به حالتی که از زلزله مصنوعی استفاده شده، خرابی شناسایی شده مقداری اختلاف با خرابی واقعی دارد و مقدار خطای بیشتری ایجاد می‌شود. دلیل این موضوع افزایش خیلی زیاد شاخص انرژی در زلزله مصنوعی تولید شده می‌باشد که باعث افزایش انرژی ورودی به سازه می‌شود.

۲-۳- قاب سه‌بعدی

سازه دیگری که در اینجا مورد مطالعه قرار می‌گیرد قاب سه‌بعدی یک ساختمان بتنی است که آن را که تحت اثر زلزله مصنوعی السترو قرار داده و پاسخ تغییر شکل ناشی از آن را به دست می‌آوریم. سازه بتنی مورد نظر دارای ۲۴ المان و ۱۶ گره می‌باشد. ارتفاع طبقات ۳۰۰

سانتیمتر و فاصله بین ستون‌ها ۴۰۰ سانتیمتر می‌باشد. ابعاد تیرها ۴۵×۵۰ و ابعاد ستون‌ها ۴۵×۴۵ است. و f'_c برابر ۲۸۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. در شکل ۱۲ مشخصات این سازه نشان داده شده است.



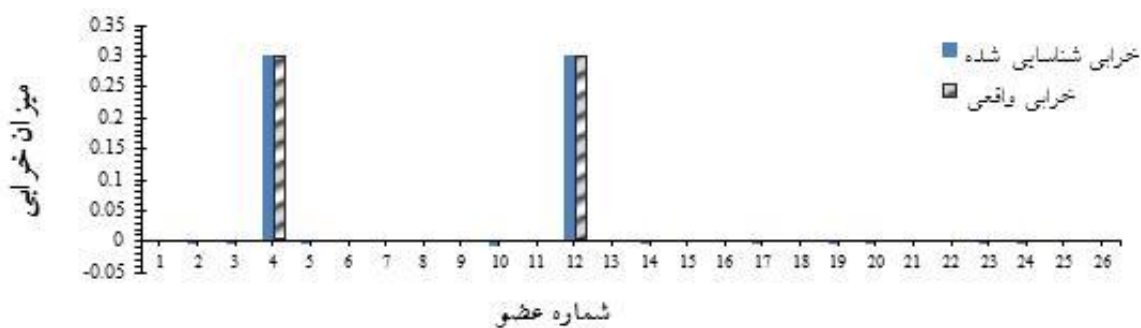
شکل ۱۲: هندسه قاب سه‌بعدی

این سازه با استفاده از به‌روزرسانی ماتریس حساسیت عیب‌یابی می‌شود. دو حالت مختلف آسیب برای این قاب سه‌بعدی در جدول ۳ نشان داده شده است.

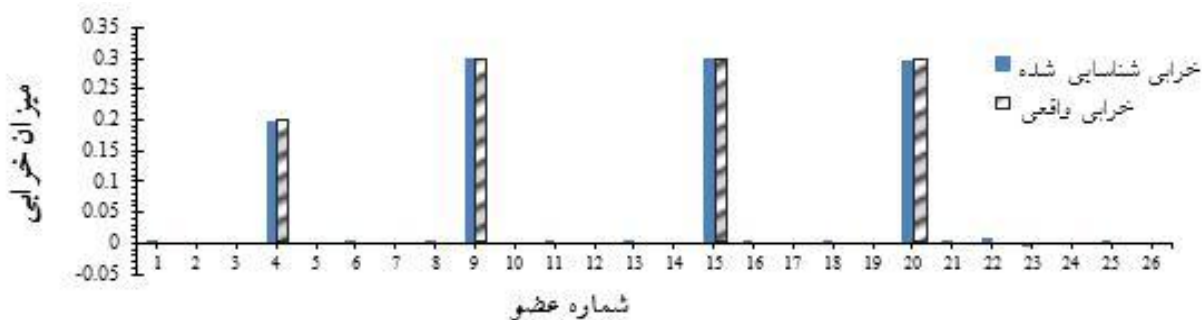
جدول ۳: حالات مختلف آسیب در سازه قاب سه‌بعدی

درصد خرابی در عضو آسیب‌دیده	اعضای آسیب‌دیده	حالت خرابی
۳۰	شماره ۴	۱
۳۰	شماره ۱۲	
۲۰	شماره ۴	۲
۳۰	شماره ۹	
۳۰	شماره ۱۵	
۳۰	شماره ۲۰	

با استفاده از روش به‌روزرسانی نیوتن رافسون و پس از چند مرحله تکرار خرابی به خرابی واقعی نزدیک‌تر می‌شود. در مورد اول پس از ۱۰ بار تکرار و در مورد دوم پس از ۱۲ بار تکرار خرابی پیدا می‌شود. در شکل ۱۳ و ۱۴ مقدار خرابی واقعی و خرابی پیدا شده طی فرآیند نیوتن رافسون پس از مراحل تکرار بیان شده برای حالت اول و دوم خرابی و در حالت استفاده از زلزله مصنوعی نشان داده شده است.

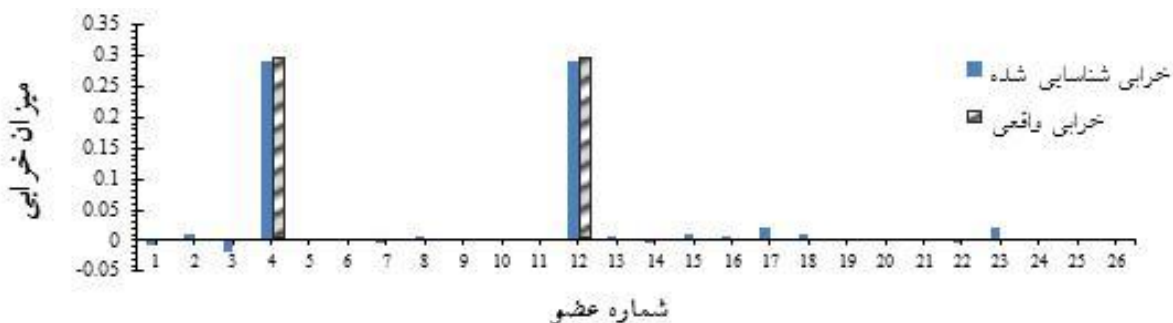


شکل ۱۳: مقدار خرابی واقعی و خرابی پیدا شده در حالت اول خرابی (تحت زلزله مصنوعی)

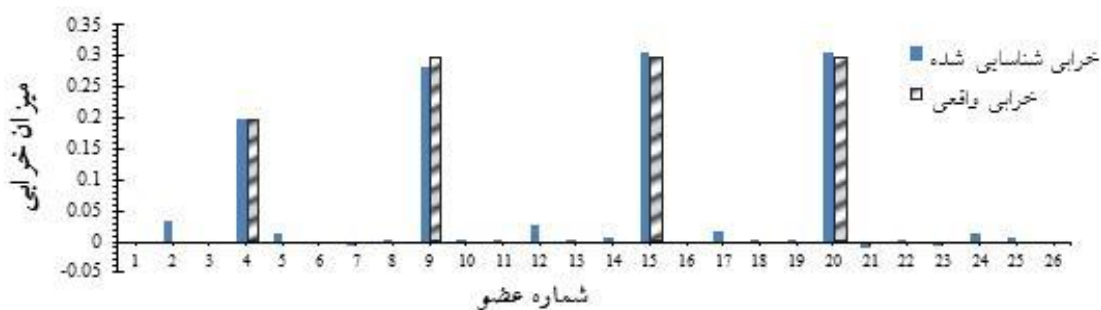


شکل ۱۴: مقدار خرابی واقعی و خرابی پیدا شده در حالت دوم خرابی (تحت زلزله مصنوعی)

اگر این سازه تحت زلزله واقعی السسترو قرار گرفته و تحلیل شود و با استفاده از فرآیند بروزرسانی نیوتن رافسون عیب‌یابی انجام شود، در حالت اول خرابی پس از ۱۵ بار و در حالت دوم پس از ۱۶ بار به خرابی واقعی نزدیک می‌شویم. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مقدار خرابی واقعی و خرابی پیدا شده در این حالت نشان داده شده است.



شکل ۱۵: مقدار خرابی واقعی و خرابی پیدا شده در حالت اول خرابی (تحت زلزله طبیعی)



شکل ۱۶: مقدار خرابی واقعی و خرابی پیدا شده در حالت دوم خرابی (تحت زلزله طبیعی)

همان‌طور که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است خرابی پیدا شده در این سازه با استفاده از پاسخ ناشی از زلزله مصنوعی السنترو نسبت به زلزله واقعی آن دارای خطای کمتری است و در تعداد مراحل کمتری به خرابی واقعی نزدیک می‌شویم.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق در ابتدا شتاب‌نگاشت مصنوعی منطبق بر طیف طرح تولید شده که برای این کار از توابع موجک استفاده شده است. با اعمال شتاب‌نگاشت مصنوعی تولید شده (زلزله السنترو) بر روی یک سازه خرابی سه‌بعدی و یک قاب سه‌بعدی، با استفاده از روش‌های مبتنی بر تحلیل حساسیت، به شناسایی محل و شدت خرابی پرداخته شد و جواب دقیق خرابی طی فرآیند نیوتن رافسون با به‌روزرسانی ماتریس حساسیت و تشکیل دستگاه معادلات خطی به دست آمد. سپس نتایج عیب‌یابی حاصل از شتاب‌نگاشت مصنوعی با اثر ناشی از شتاب‌نگاشت طبیعی مقایسه شد. با استفاده از نمودارهای رسم شده نشان داده شد که خرابی پیدا شده با استفاده از تغییر شکل گره‌ای سازه‌ای ناشی از شتاب‌نگاشت مصنوعی السنترو نسبت به شتاب‌نگاشت واقعی آن دارای خطای کمتری است و در تعداد مراحل کمتری به خرابی واقعی نزدیک می‌شود. دلیل این موضوع افزایش خیلی زیاد شاخص انرژی زلزله می‌باشد که در نتیجه انرژی بیشتری به سازه وارد می‌شود و تحریک‌های دینامیکی در سازه افزایش پیدا می‌کند. به همین دلیل تغییر شکل ناشی از اعمال شتاب‌نگاشت مصنوعی بر سازه‌ها، یک پاسخ مؤثر جهت شناسایی خرابی می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] Doebling, S.W. and Farrar, C.R. and Prime, M.B. and Shevitz, S.W.; "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics"; Los Alamos National Laboratory Report LA 5, 13070, 1996.
- [2] Weber, B. and Paultre, P. and Proulx, J.; "Consistent regularization of nonlinear model updating for damage identification"; *Mechanical Systems and Signal Processing* 23, 1965–1985, 2009.
- [3] Naseralavi, S.S. and Salajegheh, J. and Salajegheh, E. and Fadaee, M.J.; "An improved genetic algorithm using sensitivity analysis and micro search for damage detection"; *Asian journal of civil engineering (building and housing)* 6, 717-240, 2010.
- [4] Wang, X. and Hu, N.; "Structural damage identification using static test data and changes in frequencies"; *Journal of Structural Engineering*, 199, 23-718, 2007.
- [5] Yam, L.H. and Li, Y.Y. and Li, X.Y. and Law, S.S.; "Adaptive Tikhonov regularization for damage detection based on nonlinear model updating"; *Mechanical Systems and Signal Processing* 24, 1646–1664, 2010.
- [6] آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (۱۳۸۴-۲۸۰۰)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ویرایش سوم
- [7] Naeim, F. and Lew, M.; "On the use of design spectrum compatible time histories"; *Earthquake Spectra* 11, 111–127, 1995.
- [8] Suárez, L.E. and Montejó, L.A.; "Generation of artificial earthquakes via the wavelet transform"; *International Journal of Solids and Structures* 42, 5905-5919, 2005.
- [9] حیدری، ع.; «بهینه‌سازی سازه‌ها با استفاده از روش‌های پیشرفته»؛ رساله‌ی دکتری تخصصی مهندسی عمران سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهیدباهنر کرمان، ۱۳۸۵.
- [10] PEER strong motion database, <http://peer.berkeley.edu/smcat>.
- [11] Wittrick, W.H.; "Rates of change of eigenvalues, with reference to buckling and vibration problems"; *Journal of the Royal Aeronautical Society* 66, 590-1, 1962.