



# Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



## Damage detection in steel frames connection based on Modal Assurance Criterion (MAC) and MAC flexibility

Seyed Sina Kourehli \*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

### ABSTRACT

*In this paper, an effective joint damage identification method has been proposed. Beam to columns connections modeled as a rotational mass less spring. Joint damage has been presented as a reduction in the connection rigidity or rotational stiffness factor. Because of sensitivity of mode shapes and frequencies on structural stiffness, the first mode shape and frequency of damaged frame has been used as a feature to identify damage in steel frame connections. This data is acquired by the modal analysis of damaged structure applying the finite element method (FEM). The numerical studies are carried out within the MATLAB (2016) environment, which is used for the solution of finite element problems. To identify joint damage, an optimization problem formulated in which the objective functions formulated based on Modal Assurance Criterion (MAC) and MAC flexibility. To solve the optimization problem, an effective meta-heuristic called Grey Wolf Optimizer is employed to detect damage in beam to columns connections. To evaluate the performance of presented method, three examples consists of a seven, twelve and fifteen story steel frames are chosen with two different scenarios of damage in beam to columns connections for each of them for this purpose. Results reveal that the proposed approach is effective to detect and estimate damage in steel frame connections.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 13 May 2021

**Revise Date:** 12 October 2021

**Accept Date:** 09 November 2021

**Keywords:** *Beam to column connection, Damage identification, Rotational spring, Mode shape, Grey wolf algorithm*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.286068.2454

\*Corresponding author: Seyed Sina Kourehli  
Email address: ss.kourehli@azaruniv.ac.ir

## شناسایی آسیب در اتصالات قابهای فولادی براساس معیار اطمینان مودی و معیار اطمینان بردار انعطاف پذیری

سید سینا کورهلی\*

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

### چکیده

رفتار قابهای فولادی تا حد زیادی متاثر از رفتار اتصالات آنها میباشد. با توجه به اهمیت موضوع، در تحقیق حاضر یک روش کارآمد برای شناسایی آسیب در اتصالات قابهای فولادی ارائه شده است. برای مدلسازی اتصالات قاب فولادی از فنر دورانی در دو انتهای اعضای سازه ای استفاده شده است. با توجه به حساسیت پارامترهای مودال سازه به تغییرات ایجاد شده در سختی سازه، لذا شکل مود اول قابهای مورد مطالعه برای شناسایی آسیب در اتصالات قابهای فولادی استفاده شده است. روش پیشنهادی بصورت یک مسئله معکوس می باشد که برای حل آن یک مسئله بهینه یابی رابطه سازی گردید که توابع هدف بر اساس معیار اطمینان مودی و معیار اطمینان بردار انعطاف پذیری خواهند بود. برای حل این مسئله از الگوریتم گرگ خاکستری بهره برده شده است. مدلسازی المان محدود قابهای مورد مطالعه شامل مدلسازی تیرها، ستونها و فنرهای دورانی اتصالات تیر به ستون و همچنین رابطه سازی مسئله بهینه یابی در نرم افزار متلب صورت گرفته است. در نهایت برای نمایش عملکرد روش پیشنهادی سه قاب فولادی هفت طبقه، دوازده و پانزده طبقه مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان دهنده کارایی روش پیشنهادی در شناسایی آسیب در اتصالات قابهای فولادی با وجود استفاده از داده های مود اول سازه های مورد مطالعه است.

کلمات کلیدی: اتصالات، شناسایی آسیب، فنر دورانی، شکل مودی، الگوریتم گرگ خاکستری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.286068.2454">https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.286068.2454</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2021.286068.2454	۱۴۰۱/۴/۰۱	۱۴۰۰/۸/۱۸	۱۴۰۰/۸/۱۸	۱۴۰۰/۷/۲۰	۱۴۰۰/۰۲/۲۳
			سید سینا کورهلی		*نویسنده مسئول:	
			ss.kourehli@azaruniv.ac.ir		پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

با توجه به نقش مهم اتصالات در رفتار لرزه ای قابهای فولادی لذا شناسایی آسیب در اتصالات می تواند از خرابی های گسترده در این سازه ها جلوگیری نماید. اغلب مطالعات پیشین در زمینه شناسایی آسیب در اعضای سازه ای بوده است، لذا انجام تحقیقات بیشتر در زمینه شناسایی آسیب در اتصالات بیش از پیش لازم به نظر میرسد. در این بخش به مطالعاتی که در زمینه اتصالات انجام گرفته اشاره میگردد.

در تحقیق انجام شده در سال ۲۰۱۷ [۱] با استفاده از مدل کاهش یافته و روش بیزین یک روش شناسایی آسیب در اتصالات قابهای فولادی ارائه شده است. در این تحقیق برای نمایش عملکرد روش پیشنهادی از مثال عددی قاب فولادی چهارطبقه دو دهانه با اتصالات پیچی و قاب با اتصالات پیچی دو طبقه آزمایشگاهی استفاده شده است. در تحقیق دیگری [۲] به شناسایی آسیب اتصالات با استفاده از شبکه شعاعی بهبود یافته در حوزه فرکانس و زمان پرداخته شده است. ورودی شبکه در حوزه فرکانس شاخص های طراحی نرمالیزه شده و در حوزه زمان پاسخ های شتاب سازه بوده و خروجی شبکه حالت آسیب متناظر در اتصالات خواهد بود. نتایج بدست آمده بیانگر دقت و سرعت بالای روش پیشنهادی در مقایسه با شبکه های شعاعی بود. همچنین در سال ۲۰۱۴ [۳] با استفاده از بهینه سازی ازدحام ذرات متحد اقدام به شناسایی آسیب در اتصالات قاب فولادی گردیده است. برای نمایش کارایی روش پیشنهادی از مثالهای عددی و آزمایشگاهی استفاده شده است. همچنین روش زیر سازه ای برای شناسایی آسیب در سازه های بزرگ مقیاس پیشنهاد شده است. در سال ۲۰۱۷ [۴] یک روش سودمند برای شناسایی سیستم در قابهای خمشی فولادی با اتصالات نیمه گیردار ارائه گردید. در این تحقیق با ترکیب روشهای حداقل مربعات تکراری و فیلتر کالمن بدون یو میزان سختی در المانهای قاب فولادی با اتصالات انعطاف پذیر شناسایی گردیده است. برای اعتبار سنجی روش پیشنهادی دو تحریک هارمونیک و ضربه ای بر روی قاب فولادی دو بعدی اعمال گردیده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده عملکرد مناسب روش پیشنهادی در شناسایی آسیب در قابهای فولادی بود. در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۹ [۵] به ارزیابی اتصالات نیمه صلب در سازه های فولادی با استفاده از آنالیز مودال پرداخته شده است. در این تحقیق ابتدا قاب فولادی با فرض اتصالات صلب مدل شده و اشکال مودی و فرکانسهای مربوطه بدست آمده و با اشکال و فرکانسهای آزمایشگاهی مقایسه شده است. در نهایت اتصالات با فرهای دورانی مدلسازی شده و میزان سختی فرها بدست آمده است. کورھلی [۶] در سال ۱۳۹۹ روشی برای پایش سلامتی در اتصالات قابهای فولادی با استفاده از تبدیل موجک ارائه نموده است. در این روش قابهای مورد مطالعه تحت تحریک زمین لرزه قرار گرفته و لحظه آسیب دیدگی در محل اتصالات بر اساس پردازش تاریخچه زمانی پاسخ سازه تشخیص داده شده است. روش کار به این صورت است که از تجزیه تاریخچه زمانی پاسخ سازه، ضرایب جزئیات مربوط به تبدیل موجک بدست آمده که حداکثر ضریب جزئیات در زمان ایجاد آسیب در اتصالات بدست آمده است. در تحقیق دیگری [۷] یک مطالعه آزمایشگاهی برای شناسایی آسیب در المانها و اتصالات سازه ای با ترکیب روش زیر سازه ای و به روز رسانی مدل المان محدود انجام گرفته است. برای نمایش کارایی روش پیشنهادی یک قاب فولادی ۶ طبقه با اتصالات پیچی با مقیاس یک به چهار (برای مدلسازی آسیب در قاب فولادی اتصالات پیچی حذف شده است) و یک قاب بتنی دو طبقه مورد مطالعه قرار گرفته است. یانگ و همکاران [۸] به ارائه روشی برای شناسایی آسیب در سازه ها با استفاده از ترکیب یک مدل کاهش یافته و روش خطای مربع تجمعی درجه دوم تطبیقی با ورودی های ناشناخته پرداخته اند که برای نمایش کارایی روش پیشنهادی از یک قاب شش طبقه فولادی با مقیاس یک به سه استفاده شده است. در تحقیق دیگری [۹] شناسایی آسیب در اتصالات تحت تحریک زمین لرزه ارائه شده است. برای نیل به این هدف روش دو مرحله ای فیلتر کالمن بکار رفته است. برای نمایش کارایی روش پیشنهادی از یک مثال عددی و یک مثال آزمایشگاهی با وجود آسیب در محل اتصالات و تحت تحریک زمین لرزه استفاده شده است.

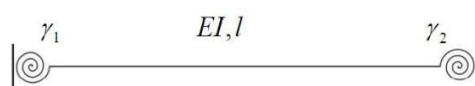
برای شناسایی آسیب در سازه ها روشهای مختلفی ارائه شده است که از سودمندترین آنها الگوریتم های بهینه یابی فراابتکاری هستند. کورھلی و همکاران [۱۰] با استفاده از اطلاعات مودال ناقص سازه و الگوریتم بهینه یابی الگو کاوی به شناسایی آسیب در المانهای مختلف سازه ای پرداخته است. در تحقیق دیگری کاوه و دادرس [۱۱] به شناسایی آسیب در سازه ها با استفاده از روش بهینه یابی تبادل حرارتی بهبود یافته پرداختند. در تحقیق دیگری [۱۲] با استفاده از یک الگوریتم بهینه یابی موقعیت بهینه سنسورها تعیین شده و سپس آسیب در سازه های کامپوزیت چند لایه شناسایی شده است. در تحقیق دیگری [۱۳] خرابی در تیرهای کامپوزیت با استفاده از روش تجزیه متعامد مناسب با استفاده از توابع شعاعی و الگوریتم فاخته شناسایی شده است. نتایج بدست آمده بیانگر کارایی روش پیشنهادی برای

شناسایی عمق، عرض و موقعیت ترک بر روی تیرهای مورد مطالعه دارد. همچنین در مطالعه دیگری [۱۴] از الگوریتم ازدحام ذرات ارتقا یافته برای شناسایی آسیب بر روی سازه های تیر، خرپا و ورق استفاده شده است. اخیراً کورهللی [۱۵] روشی نوین برای شناسایی آسیب در اتصالات تیر به ستون و اتصالات پای ستون قابهای فولادی ارائه نموده است که برای شناسایی آسیب یک مسئله بهینه یابی رابطع سازی شده است. با رابطه سازی تابع هدف بر اساس مقادیر فرکانس و استفاده از الگوریتم شعله پروانه آسیب در اتصالات شناسایی گردیده است.

در مطالعه حاضر یک روش کارآمد برای شناسایی آسیب در اتصالات قابهای فولادی ارائه شده است. برای مدلسازی میزان خرابی در اتصالات قاب از رابطه سازی ماتریس سختی مربوط به قاب با اتصالات انعطاف پذیر استفاده شده است. با توجه به اینه تغییر در سختی اتصالات باعث تغییر در سختی کل سازه شده و در نتیجه شکل مودی سازه نیز تغییر می یابد که به عنوان شاخص شناسایی آسیب استفاده گردیده است. برای شناسایی آسیب که بصورت یک مسئله معکوس می باشد از الگوریتم گرگ خاکستری استفاده شده است. در نهایت برای نمایش کارایی روش ارائه شده، آسیب در اتصالات دو قاب فولادی هفت و دوازده طبقه شناسایی شده است.

## ۲- مدلسازی خرابی در اتصالات قاب خمشی

برای مدلسازی خرابی در اتصالات قاب خمشی فولادی فرض گردیده است که اتصالات بصورت فنر دورانی باشند (شکل ۱). در این روش خرابی در محل اتصالات بصورت کاهش در ضریب صلبیت اتصالات لحاظ شده است. برای مدلسازی قاب فولادی با اتصالات انعطاف پذیر از رابطه سازی ارائه شده توسط یون و همکاران [۱۶] استفاده شده است. در این رابطه ماتریس سختی تیر با اتصالات انعطاف پذیر بصورت رابطه (۱) خواهد بود:



شکل ۱- تیر فولادی با فنر دورانی در دو انتها

$$[k] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} \left( \frac{f_1}{f_7} \right) & \frac{6EI}{l^2} \left( \frac{f_2}{f_7} \right) & 0 & -\frac{12EI}{l^3} \left( \frac{f_1}{f_7} \right) & \frac{6EI}{l^2} \left( \frac{f_6}{f_7} \right) \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} \left( \frac{f_2}{f_7} \right) & \frac{4EI}{l} \left( \frac{f_3}{f_7} \right) & 0 & -\frac{6EI}{l^2} \left( \frac{f_2}{f_7} \right) & \frac{2EI}{l} \left( \frac{f_5}{f_7} \right) \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} \left( \frac{f_1}{f_7} \right) & -\frac{6EI}{l^2} \left( \frac{f_2}{f_7} \right) & 0 & \frac{12EI}{l^3} \left( \frac{f_1}{f_7} \right) & -\frac{6EI}{l^2} \left( \frac{f_6}{f_7} \right) \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} \left( \frac{f_6}{f_7} \right) & \frac{2EI}{l} \left( \frac{f_5}{f_7} \right) & 0 & -\frac{6EI}{l^2} \left( \frac{f_6}{f_7} \right) & \frac{4EI}{l} \left( \frac{f_4}{f_7} \right) \end{bmatrix}$$

(۱)

که در رابطه فوق پارامتر  $f$  بر اساس ضریب صلبیت اتصال تیر در سمت چپ  $\gamma_1$  و راست  $\gamma_2$  بصورت زیر خواهد بود:

$$f_1 = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_1 \gamma_2$$

$$f_2 = \gamma_1 (2 + \gamma_2) \quad (۲)$$

$$f_3 = 3\gamma_1$$

$$f_4 = 3\gamma_2 \quad f_5 = 3\gamma_1\gamma_2$$

$$f_6 = \gamma_2(2 + \gamma_1)$$

$$f_7 = 4 - \gamma_1\gamma_2$$

در واقع میزان خرابی در محل اتصالات بصورت زیر خواهد بود:

$$d_1 = 1 - \gamma_1 \quad (3)$$

$$d_2 = 1 - \gamma_2$$

که در رابطه فوق  $d_1$  میزان خرابی در اتصال سمت چپ تیر و  $d_2$  میزان خرابی در اتصال سمت راست تیر را نشان می دهد.

### ۳- مسئله بهینه یابی

در مطالعه حاضر برای شناسایی موقعیت و میزان خرابی در محل اتصالات به رابطه سازی یک مسئله بهینه یابی و حل آن بوسیله الگوریتم گرگ خاکستری اقدام گردیده است که در بخش های زیر توضیح داده شده است.

#### ۳-۱- توابع هدف بکاررفته

یکی از مهمترین مراحل بهینه سازی انتخاب تابع هدف مناسب می باشد که نسبت به وجود آسیب حساسیت لازم را داشته باشد. در مطالعه حاضر از دو تابع هدف بر اساس معیار اطمینان مودی و معیار اطمینان بردار انعطاف پذیری استفاده شده است.

##### ۳-۱-۱- معیار اطمینان مودی

تابع هدف شماره یک بر اساس معیار اطمینان مودی<sup>۱</sup> قایهای مورد مطالعه رابطه سازی شده است. معیار اطمینان مودی بین دو مود  $i, j$  بصورت زیر خواهد بود که در صورت تطابق کامل مودی مقدار یک و در صورت عدم انطباق کامل مقدار صفر خواهد بود.

$$MAC(i, j) = \frac{\left| \{\phi\}_i^T \{\phi\}_j \right|^2}{\{\phi\}_i^T \{\phi\}_i \{\phi\}_j^T \{\phi\}_j} \quad (4)$$

در نهایت تابع هدف بصورت زیر تعریف شده است:

$$1 - MAC(r, p) \quad (5)$$

که در رابطه فوق  $r, p$  به ترتیب نشان دهنده حالت آسیب دیده فرض شده واقعی (سناریوی فرض شده) و حالت آسیب تشخیص داده شده است. به عبارت دیگر در صورتی که محل و مقدار آسیب در اتصالات بدرستی تشخیص داده شود شکل مودی حالت تشخیص داده شده برابر شکل مودی حالت آسیب فرض شده خواهد بود و مقادیر معیار اطمینان مودی تابع هدف به ترتیب برابر یک و صفر خواهد بود. در نهایت مسئله بهینه یابی بصورت یک مسئله کمینه یابی خواهد بود.

##### ۳-۱-۲- معیار اطمینان بردار انعطاف پذیری

<sup>1</sup> Modal Assurance Criterion (MAC)

تابع هدف شماره دو بر اساس معیار اطمینان بردار انعطاف پذیری<sup>۲</sup> قابهای مورد مطالعه رابطه سازی شده است. معیار اطمینان بردار انعطاف پذیری بین سازه واقعی و سازه مورد بررسی بصورت زیر خواهد بود:

$$MACflex(Flex_j^{ex}, Flex_j^{nu}) = \frac{\left| \{Flex_j^{ex}\}^T \{Flex_j^{nu}\} \right|^2}{\left( \{Flex_j^{ex}\}^T \{Flex_j^{ex}\} \right) \left( \{Flex_j^{nu}\}^T \{Flex_j^{nu}\} \right)} \quad (6)$$

در رابطه فوق  $Flex_j^{ex}, Flex_j^{nu}$  ماتریس انعطاف پذیری سازه مورد بررسی و سازه واقعی می باشد که بر اساس رابطه زیر محاسبه میگردد. همچنین  $n$  مجموع درجات آزادی در مود مورد بررسی می باشد.

$$[Flex] = [\varphi][\Lambda]^{-1}[\varphi]^T = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i^2} \{\varphi_i\} \{\varphi_i\}^T \quad (7)$$

در رابطه فوق  $\{\varphi_i\}$  و  $\omega_i$  شکل مودی و فرکانس مود  $i$ ام سازه مورد مطالعه می باشد.

متغیرهای مسئله مقادیر آسیب در محل اتصالات است بصورت رابطه زیر میباشد:

$$Find : x = \{d_1, \dots, d_{nj}\}^T \quad (8)$$

که  $d_{nj}$  تعداد اتصالات در سازه میباشد.

کرانه های در نظر گرفته شده برای متغیرهای فوق بصورت زیر می باشد:

$$Bound : 0 \leq d_e \leq 1 \quad (9)$$

در نهایت تابع هدف بصورت زیر تعریف شده است:

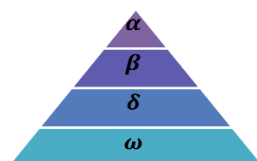
$$Minimize : f(x) = \sum_{j=1}^n (1 - MacFlex(Flex_j^{ex}, Flex_j^{nu})) \quad (10)$$

که در رابطه فوق  $ex, nu$  به ترتیب نشان دهنده حالت آسیب دیده فرض شده واقعی (سناریوی فرض شده) و حالت آسیب تشخیص داده شده است. به عبارت دیگر در صورتی که محل و مقدار آسیب در اتصالات بدرستی تشخیص داده شود ماتریس انعطاف پذیری حالت تشخیص داده شده برابر ماتریس انعطاف پذیری حالت آسیب فرض شده خواهد بود و مقادیر معیار اطمینان بردار انعطاف پذیری برابر یک و تابع هدف صفر خواهد بود. در نهایت مسئله بهینه بایی بصورت یک مسئله کمینه بایی خواهد بود.

### ۳-۲- الگوریتم گرگ خاکستری

<sup>2</sup> Modal Assurance Criterion (MAC)

الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری<sup>۳</sup> از سازمان دهی موجود در گرگ خاکستری برای شکار کردن در طبیعت الگو برداری می‌کند. این الگوریتم در سال ۲۰۱۴ میلادی توسط میرجلیلی و همکاران [۱۷] ارائه شده است. گردش کار الگوریتم بهینه یابی گرگ خاکستری در شکل ۲ ارائه شده است. گرگهای خاکستری ترجیح می دهند در یک گروه (دسته) زندگی کنند. همه اعضای این گروه دارای سلسله مراتب تسلط اجتماعی بسیار دقیق هستند و وظایف خاصی دارند. همانطوریکه در شکل ۲ ارائه شده است در هر گله از گرگ ها برای شکار کردن چهار درجه وجود دارد. گرگ های رهبر گروه آلفا نامیده می شوند که این گرگ ها بر گله تسلط دارند. گرگ های بتا کمک به گرگ های آلفا در فرایند تصمیم گیری بوده و همچنین مستعد انتخاب شدن به جای آن ها هستند. گرگ های دلتا پایین تر از گرگ های بتا و شامل گرگ های پیر، شکارچی ها و گرگ های مراقبت کننده از نوزادان هستند. گرگ های امگا پایین ترین مرتبه در هرم سلسله مراتب هستند که کمترین حق را نسبت به بقیه اعضای گروه دارند.



شکل ۲- ساختار سلسله مراتبی گروههای گرگهای آلفا، بتا، دلتا و امگا

همانطوریکه در شکل ۳ نشان داده شده است این الگوریتم شامل سه مرحله اصلی است: (۱) مشاهده شکار، ردیابی و تعقیب آن<sup>۴</sup> (۲) نزدیک شدن، احاطه کردن (حلقه زدن) به دور شکار و گمراه کردن آن تا زمانی که از حرکت باز بماند<sup>۵</sup> (۳) حمله به شکار<sup>۶</sup>. با توجه به کارایی بسیار بالای این روش، الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری در شاخه های مختلف علوم مورد استفاده گسترده ای قرار گرفته است [۱۸]. برای روشن شدن گردش کار الگوریتم گرگ خاکستری در شکل ۴ ارائه شده است.



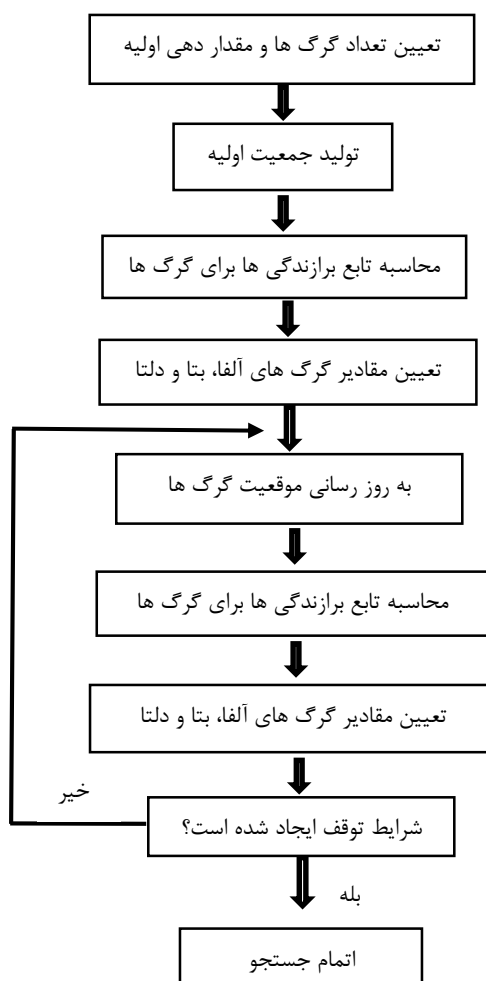
<sup>3</sup> Grey Wolf Optimization (GWO)

<sup>4</sup> Tracking and Approaching

<sup>5</sup> Pursing and encircling

<sup>6</sup> Attacking

شکل ۳- مراحل الگوریتم: الف- مشاهده شکار، ردیابی و تعقیب آن، ب، ج و د- نزدیک شدن، احاطه کردن (حلقه زدن) به دور شکار و- حمله به شکار



شکل ۴- گردش کار الگوریتم بهینه یابی گرگ خاکستری

#### ۴- قابهای فولادی مورد مطالعه

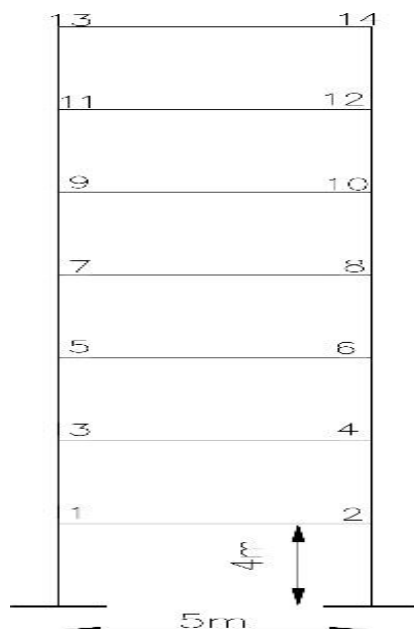
برای بررسی کارایی روش ارائه شده سه قاب فولادی هفت، دوازده و پانزده طبقه مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مدلسازی المان محدود قابهای مورد مطالعه از نرم افزار Matlab 2017 استفاده شده است. برای شناسایی آسیب در قابهای مورد مطالعه از شکل مود اول قاب برای رابطه سازی تابع هدف استفاده گردیده است. در مطالعه حاضر میزان تکرار الگوریتم بهینه یابی و تعداد جمعیت برابر هزار در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۱- قاب فولادی هفت طبقه

قاب مورد مطالعه دارای ۱۴ اتصال تیر به ستون و ۴۲ درجه آزادی است (شکل ۵). سطح مقطع ستونها ۱۸۱ سانتی متر مربع، سطح مقطع تیرها ۱۴۹ سانتی متر مربع، ممان اینرسی ستونها  $43190 \text{ cm}^4$ ، ممان اینرسی تیرها  $25170 \text{ cm}^4$ ، مدول الاستیسیته فولاد مصرفی برابر  $200$  گیگا پاسکال و چگالی  $7850$  کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. شماره گذاری اتصالات از گره چپ تیر طبقه اول شروع



شده و آخرین اتصال (شماره چهارده) مربوط به گره راست تیر طبقه هفتم می باشد. همچنین برای شناسایی آسیب در محل اتصالات قاب مورد مطالعه دو حالت آسیب فرض شده است. در حالت اول اتصال سمت چپ تیر طبقه اول به میزان ۲۰ درصد دارای خرابی است. در حالت دوم اتصالات تیر طبقات سوم، پنجم و هفتم به میزان ۱۰ درصد دچار آسیب گشته اند.



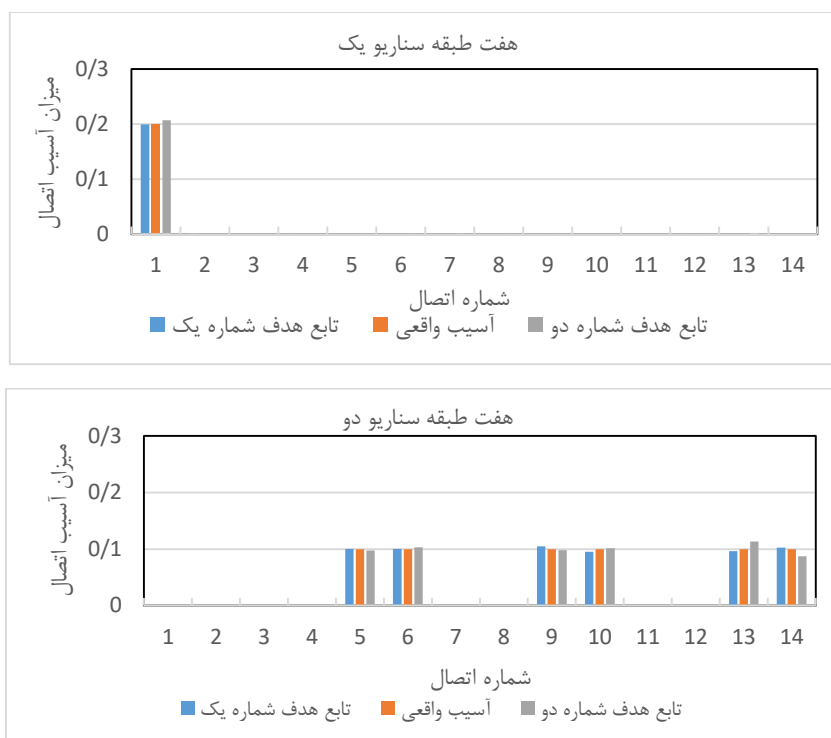
شکل ۵- شماره گذاری اتصالات در قاب فولادی هفت طبقه

برای نمایش اثر وجود آسیب اتصالات در مشخصات دینامیکی سازه های مورد مطالعه، مقادیر فرکانس (هرتز) مربوط به ده مود اول قاب هفت طبقه سالم و قاب دارای آسیب در محل اتصالات در جدول یک ارائه شده است. وجود آسیب در محل اتصالات باعث کاهش سختی سازه شده و در نتیجه مقادیر فرکانس ها نسبت به سازه سالم کاهش یافته است که به هر میزان محل آسیب و مقدار آسیب افزایش یابد این مقدار کاهش بیشتری خواهد داشت.

جدول ۱- مقادیر فرکانس (هرتز) قاب سالم و آسیب دیده هفت طبقه

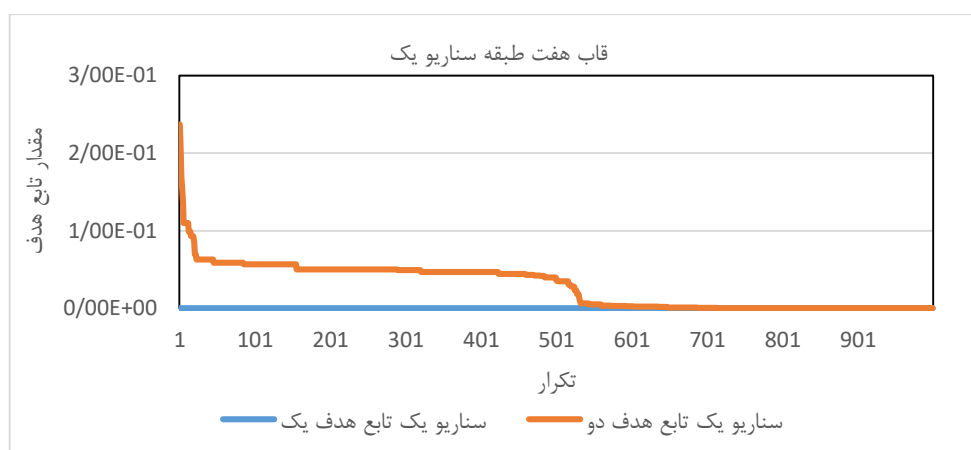
سالم	حالت آسیب دیده اول	حالت آسیب دیده دوم
2.019058	1.965699	1.973243
6.536648	6.392933	6.400213
12.34993	12.21189	12.08593
19.60869	19.53803	19.31448
28.43779	28.43456	28.00612
33.89466	33.89461	33.88949
38.22876	38.2056	37.89267
41.44804	41.43279	41.24481
47.25443	47.1911	47.1343
57.75912	57.75824	57.50361

نتایج بدست آمده از روش ارائه شده برای شناسایی آسیب در محل اتصالات قاب فولادی هفت طبقه در شکل ۶ ارائه شده است. همانطوریکه دیده می شود هر دو تابع هدف بکار رفته توانسته است محل و میزان آسیب در محل اتصالات قاب فولادی را به درستی شناسایی نماید.

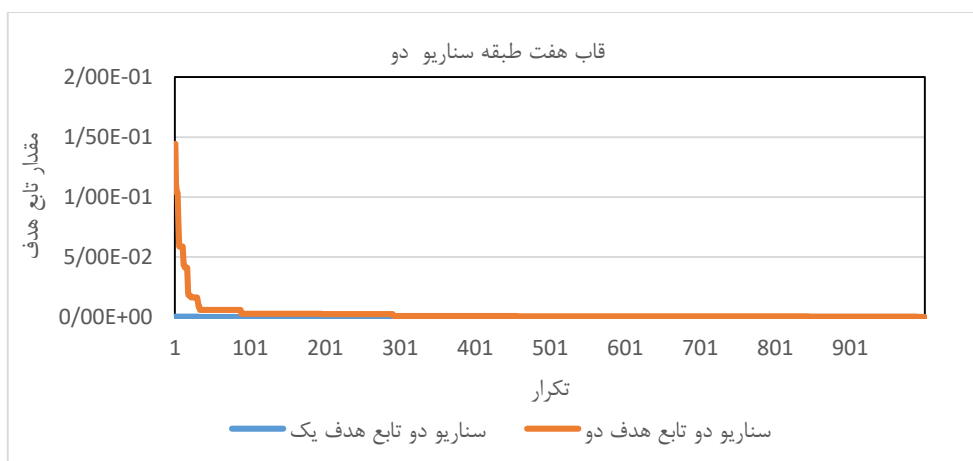


شکل ۶- آسیب شناسایی شده در قاب هفت طبقه

در بخش دیگری از مطالعه صورت گرفته عملکرد الگوریتم گرگ خاکستری برای شناسایی آسیب در اتصالات با استفاده از مقدار توابع هدف مختلف در تکرارهای مختلف نمایش داده شده است (اشکال ۷ و ۸). همانطوریکه دیده می شود سرعت همگرایی تابع هدف شماره یک بیشتر از تابع هدف شماره دو میباشد که در نهایت هر دو تابع هدف توانسته اند به مقدار کمینه برسند.



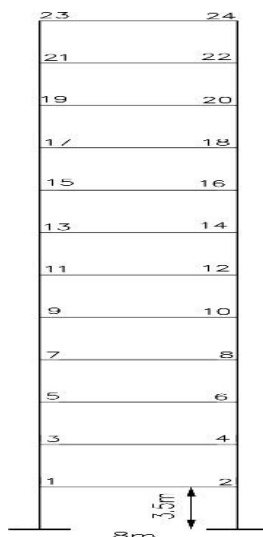
شکل ۷- روند بهینه یابی در قاب هفت طبقه برای سناریو شماره یک



شکل ۸- روند بهینه یابی در قاب هفت طبقه برای سناریو شماره دو

#### ۲-۴- قاب فولادی دوازده طبقه

در بخش دیگری از مطالعه حاضر به شناسایی آسیب در اتصالات قاب دوازده طبقه پرداخته شده است. قاب دوازده طبقه دارای ۲۴ اتصال تیر به ستون و ۷۲ درجه آزادی است (شکل ۹). سطح مقطع ستونها ۲۱۸ سانتی متر مربع، سطح مقطع تیرها ۱۸۱ سانتی متر مربع، ممان اینرسی ستونها  $79890 \text{ cm}^4$ ، ممان اینرسی تیرها  $43190 \text{ cm}^4$ ، مدول الاستیسیته فولاد مصرفی برابر ۲۰۰ گیگا پاسکال و چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. شماره گذاری اتصالات از گره چپ تیر طبقه اول شروع شده و آخرین اتصال (شماره بیست و چهار) مربوط به گره راست تیر طبقه دوازدهم می باشد. همچنین برای شناسایی آسیب در محل اتصالات قاب مورد مطالعه دو حالت آسیب فرض شده است. در حالت اول اتصالات تیر طبقه دوازدهم به میزان ۳۰ درصد دارای خرابی است. در حالت دوم اتصالات سمت چپ و راست تیرهای طبقات سوم، پنجم به ترتیب به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد دچار آسیب گشته اند. همچنین مقادیر فرکانس (هرتز) قاب سالم و آسیب دیده دوازده طبقه در جدول درج شده است.

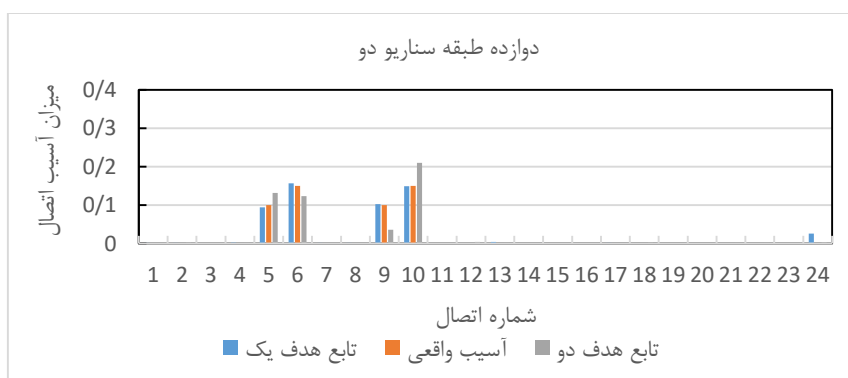
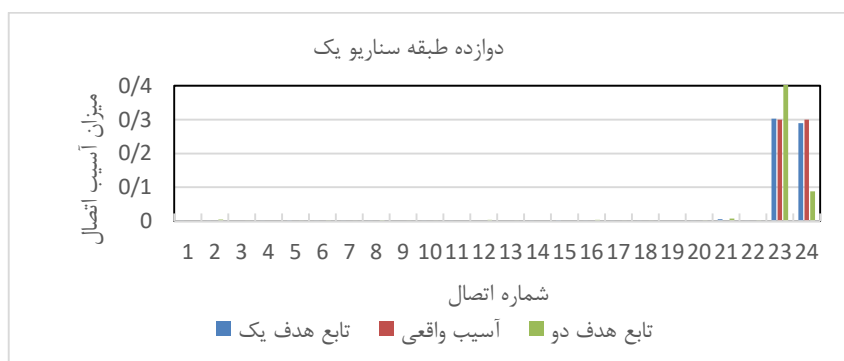


شکل ۹- شماره گذاری اتصالات در قاب فولادی دوازده طبقه

جدول ۲- مقادیر فرکانس (هرتز) قاب سالم و آسیب دیده دوازده طبقه

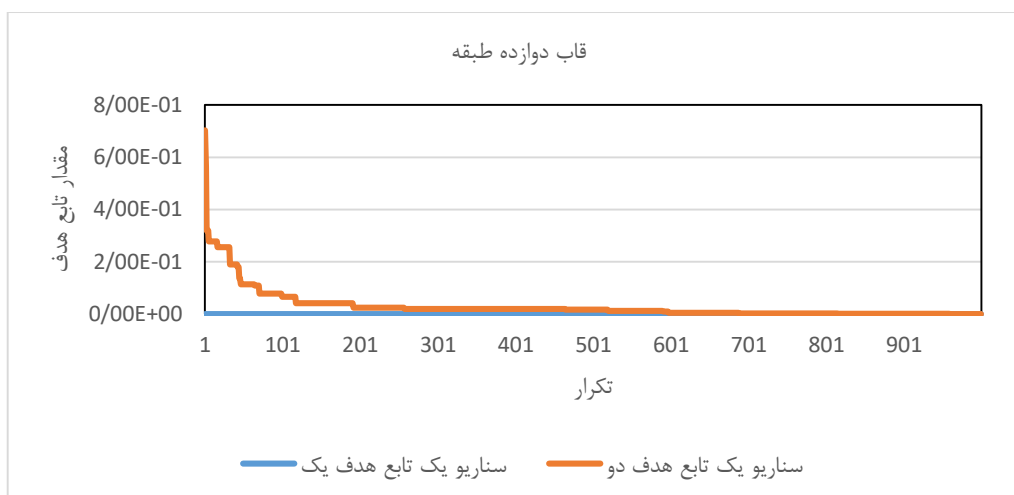
سالم	حالت آسیب دیده اول	حالت آسیب دیده دوم
1.346119	1.345342	1.303091
4.258087	4.238441	4.223656
7.81216	7.72782	7.694073
11.99238	11.80731	11.89465
17.03561	16.73907	16.82666
20.88594	20.88403	20.88588
22.94268	22.57658	22.65124
26.84365	26.71459	26.80246
29.8703	29.37672	29.85311
37.54789	37.05687	37.38124

نتایج مربوط به شناسایی آسیب اتصالات در قاب دوازده طبقه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطوریکه مشاهده می شود روش پیشنهادی توانسته است با دقت بالایی میزان آسیب در اتصالات سازه فولادی را شناسایی نماید.

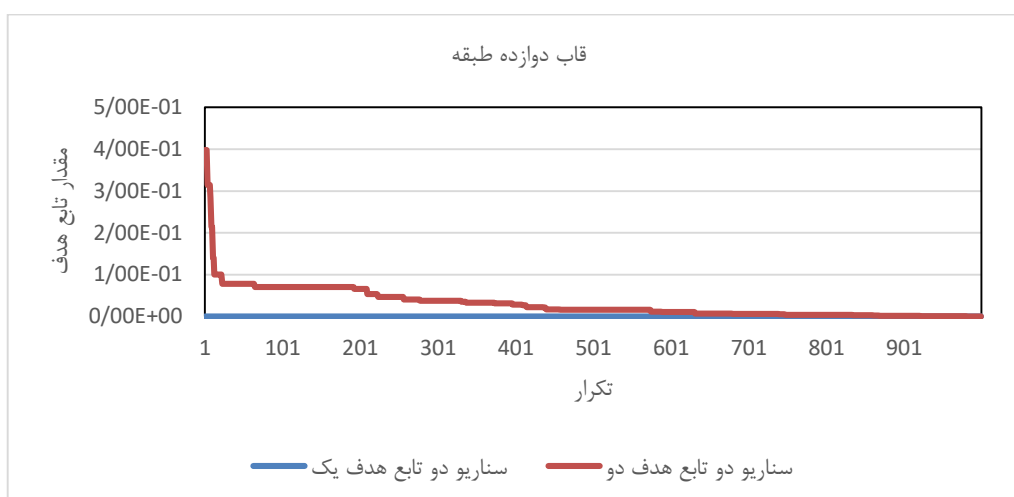


شکل ۱۰- آسیب شناسایی شده در قاب دوازده طبقه

روند بهینه یابی مربوط به قاب دوازده طبقه در اشکال ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. همانطوریکه مشاهده می شود سرعت همگرایی تابع هدف شماره یک بیشتر از تابع هدف دوم است که در نهایت هر دو تابع هدف به مقدار کمینه همگرا شده است.



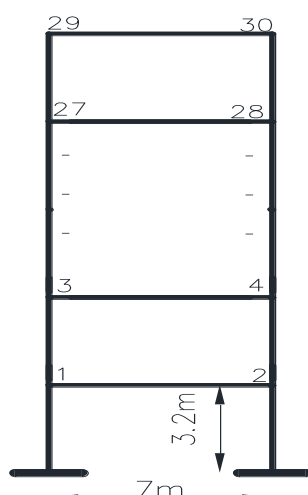
شکل ۱۱- روند بهینه یابی در قاب دوازده طبقه برای سناریو شماره یک



شکل ۱۲- روند بهینه یابی در قاب دوازده طبقه برای سناریو شماره دو

#### ۳-۴- قاب پانزده طبقه

برای نمایش کارایی روش پیشنهادی در سازه های بلندمرتبه از یک قاب پانزده طبقه استفاده شده است. همانطوریکه در شکل ۱۳ ارائه شده قاب مورد مطالعه دارای ۳۰ ستون و ۱۵ المان تیر و ۳۰ اتصال تیر به ستون می باشد. مشخصات هندسی مقاطع بکار رفته شامل سطح هندسی و ممان اینرسی ستونها برابر ۲۳۹ سانتی متر مربع و  $107200 \text{ cm}^4$  و برای تیرها ۱۹۸ سانتی متر مربع و  $57680 \text{ cm}^4$  می باشد. مدول الاستیسیته فولاد مصرفی برابر ۲۰۰ گیگا پاسکال و چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.



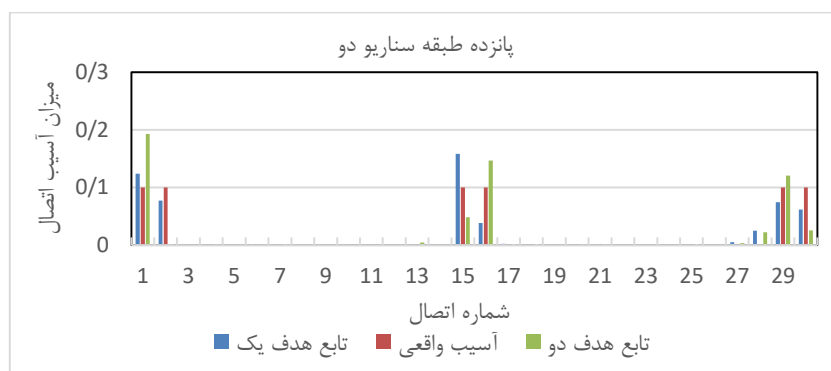
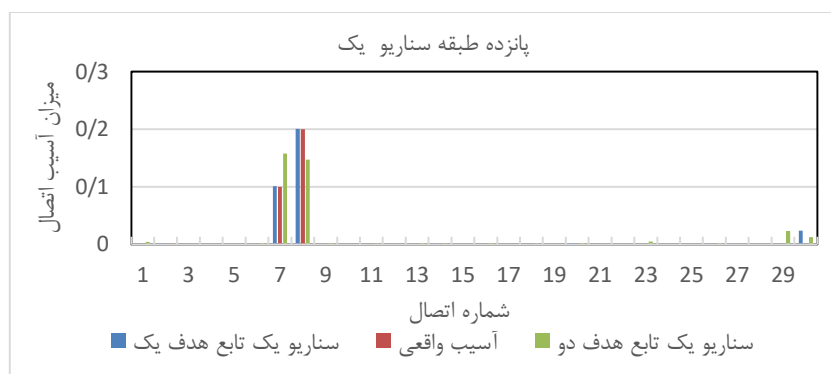
شکل ۱۳- شماره گذاری اتصالات در قاب فولادی پانزده طبقه

برای بررسی کارایی روش پیشنهادی برای تشخیص آسیب در اتصالات قاب مورد مطالعه دو حالت آسیب فرض شده است. در حالت اول مقدار آسیب در اتصالات شماره ۷ و ۸ به ترتیب برابر ۰٫۱ و ۰٫۲ و در حالت دوم در اتصالات شماره ۱، ۲، ۱۵، ۱۶، ۲۹ و ۳۰ به میزان ۱۰٪ آسیب در نظر گرفته شده است. برای نمایش تاثیر آسیب اتصالات در مشخصات دینامیکی سازه مورد مطالعه، مقادیر فرکانس ۱۰ مود اول سازه برای حالت بدون آسیب و سناریوهای آسیب در اتصالات ارائه شده است. همانطوریکه مشاهده می شود آسیب های جزئی در اتصالات باعث تغییر ناچیز مقادیر فرکانس میگردد که برای تشخیص این نوع آسیب در سازه ها نیازمند استفاده از روشهای کارآمد و حساس به تغییرات کوچک در مشخصات دینامیکی سازه ها می باشد.

جدول ۳- مقادیر فرکانس (هرتز) قاب سالم و آسیب دیده پانزده طبقه

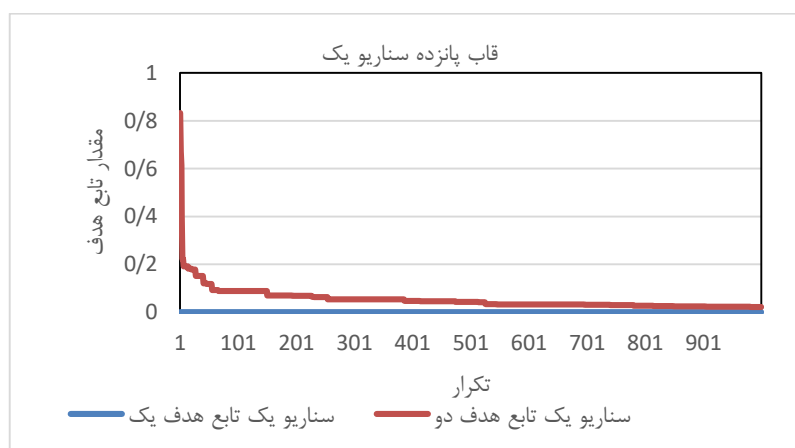
سالم	حالت آسیب دیده اول	حالت آسیب دیده دوم
0.734397	0.743705	0.741458
0.231004	0.232421	0.23328
0.124822	0.124876	0.126432
0.083039	0.083614	0.083992
0.059594	0.060199	0.060199
0.05354	0.05354	0.053541
0.045148	0.045266	0.045495
0.037942	0.037987	0.038137
0.034841	0.034849	0.035141
0.028075	0.02816	0.028284

برای نمایش کارایی روش پیشنهادی برای شناسایی آسیب در اتصالات سازه پانزده طبقه اقدام به شناسایی آسیب با استفاده از دو سناریو و در تابع هدف اشاره شده در بخش های پیشین گردیده است. همانطوریکه در شکل ۱۴ مشاهده می شود سناریو یک با دقت قابل قبولی شناسایی شده است. در مورد سناریو دو هم روش پیشنهادی توانسته محل و مقدار آسیب را شناسایی کند. هرچند که در این سناریو مقدار آسیب با خطایی مواجه است که در مورد تابع هدف دو این خطا بیشتر است.

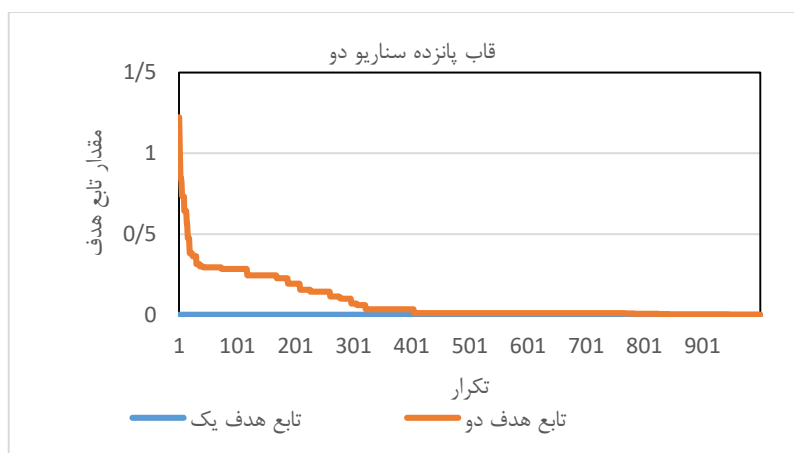


شکل ۱۴- آسیب شناسایی شده در قاب پانزده طبقه

برای نمایش روند کمینه سازی توابع هدف بکار رفته در روند شناسایی آسیب در سناریوهایی مختلف مقادیر توابع هدف در اشکال ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است. همانطوریکه مشاهده می شود سرعت همگرایی تابع هدف شماره یک بیشتر از تابع هدف شماره دو می باشد.



شکل ۱۵- روند بهینه یابی در قاب پانزده طبقه برای سناریو یک



شکل ۱۶- روند بهینه یابی در قاب پانزده طبقه برای سناریو دو

### ۵- نتیجه گیری

با توجه به اینکه اغلب روشهای شناسایی آسیب مربوط به المانهای سازه ای است، لذا در تحقیق حاضر به ارائه روشی کارا و سودمند برای شناسایی آسیب در اتصالات قاب فولادی پرداخته شد. برای مدلسازی خرابی در اتصالات قاب فولادی از رابطه سازی مربوط به اتصالات انعطاف پذیر استفاده گردید. روش پیشنهادی بصورت یک مسئله معکوس رابطه سازی گردید که برای حل آن از شکل مود اول سازه و الگوریتم گرگ خاکستری بهره برده شده است. برای نمایش کارایی روش پیشنهادی از سه قاب فولادی هفت، دوازده و پانزده طبقه استفاده شده است. آسیب در تمامی اتصالات قابهای مورد مطالعه بررسی گردید و با دقت خوبی محل و مقدار آسیب در اتصال آسیب دیده شناسایی گردید.



## مراجع

- [1] Yin, T., Jiang, Q. H., & Yuen, K. V. (2017). Vibration-based damage detection for structural connections using incomplete modal data by Bayesian approach and model reduction technique. *Engineering Structures*, 132, pp. 260-277.
- [2] Machavaram, R., & Shankar, K. (2013). Joint damage identification using Improved Radial Basis Function (IRBF) networks in frequency and time domain. *Applied Soft Computing*, 13(7), pp. 3366-3379.
- [3] Nanda, B., Maity, D., & Maiti, D. K. (2014). Modal parameter based inverse approach for structural joint damage assessment using unified particle swarm optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 242, pp. 407-422.
- [4] Katkhuda, H., Shatarat, N. and Hyari, K. (2017). Damage detection in steel structures with semi-rigid connections using unscented Kalman filter. *International Journal of Structural Integrity*, 8 (2), pp. 222-239.
- [5] Türker, T., Kartal, M. E., Bayraktar, A., & Muvafik, M. (2009). Assessment of semi-rigid connections in steel structures by modal testing. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(7), pp. 1538-1547.
- [6] Kourehli, S. (2018). Health monitoring of connections in steel frames using wavelet transform. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(3), 11-11. doi: 10.22060/ceej.2018.14815.5750.
- [7] Weng, J. H., Loh, C. H., & Yang, J. N. (2009). Experimental study of damage detection by data-driven subspace identification and finite-element model updating. *Journal of structural engineering*, 135(12), 1533-1544.
- [8] Yang, J. N., Xia, Y., & Loh, C. H. (2014). Damage identification of bolt connections in a steel frame. *Journal of Structural Engineering*, 140(3), 04013064.
- [9] Lei, Y., Li, Q., Chen, F., & Chen, Z. (2014). Damage identification of frame structures with joint damage under earthquake excitation. *Advances in Structural Engineering*, 17(8), 1075-1087.
- [10] Kourehli, S., Amiri, G.G., Ghafory-Ashtiany M., et al. (2013). Structural damage detection based on incomplete modal data using pattern search algorithm. *Journal of vibration and control*, 19, pp. 821-833.
- [11] Kaveh, A. and Dadras, A. (2018). Structural damage identification using an enhanced thermal exchange optimization algorithm. *Engineering Optimization*, 50, pp. 430-451.
- [12] Dinh-Cong D, Dang-Trung H, Nguyen-Thoi T. (2018). An efficient approach for optimal sensor placement and damage identification in laminated composite structures. *Advances in Engineering Software*, 119, pp. 48-59.
- [13] Khatir, S., Brahim, B., Capozucca, R., et al. (2018a). Damage detection in CFRP composite beams based on vibration analysis using proper orthogonal decomposition method with radial basis functions and cuckoo search algorithm. *Composite Structures*, 187, pp. 344-353.
- [14] Wei, Z., Liu, J. and Lu, Z. (2018). Structural damage detection using improved particle swarm optimization. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 26, pp. 792-810.
- [15] Kourehli, S. (2021). A new damage identification method in beam to column connections and column base connections of steel frame. *Journal of Structural and Construction Engineering*, doi: 10.22065/jsce.2021.257528.2293.
- [16] Yun, C. B., Yi, J. H., & Bahng, E. Y. (2001). Joint damage assessment of framed structures using a neural networks technique. *Engineering structures*, 23(5), pp. 425-435.
- [17] Mirjalili, S., Mirjalili, S.M. and Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, pp. 46-61.
- [18] Faris, H., Aljarah, I., Al-Betar, M.A., et al. (2018). Grey wolf optimizer: a review of recent variants and applications. *Neural Computing and Applications*, 30, pp. 413-435