Journal of Structural and Construction Engineering, 8(10), 2022, pp. 353-365

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

A new damage identification method in beam to column connections and column base connections of steel frame

Seyed Sina Kourehli[1*]

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

ABSTRACT

In the present study, an effective method for damage detecting in beam to column connections and column to the ground connections is presented. Rotational springs are used to model the joints (beam to column and column to the ground) of the steel frame. After finite element modeling of the studied frames in Matlab software environment, modal analysis was performed. To identification of joint damages, an optimization problem formulated to identify location and severity of damages. A new optimization algorithm called moth-flame algorithm with high accuracy and speed is used to solve this problem. The joint damages modeled through the reduction of the rotational stiffness factors. To show the performance of presented approach, two frames consist of a four-story steel frame and a nine-story steel frame have been investigated. In the studied frames, damage was assumed at the beam to column connections and column to the ground connections and then the severity and location of damage at the assumed joint were identified by the proposed method. The results indicated that the proposed method is robust to detect damage in beam to column connections and column to the ground connections that can accurately identify the location and severity of damage at the joints.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 November 2020
Revise Date: 30 June 2021
Accept Date: 04 July 2021

Keywords:
Damage identification
Beam to column connections
Column to the ground connections
Steel frames
Moth-flame optimization algorithm

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.257528.2293

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

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

ارائه روشی نوین برای شناسایی خرابی در اتصالات تیر به ستون و پای ستون قاب فولادی

سید سینا کورهلی[1*]

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

چکیده

در تحقیق حاضر یک روش موثر برای شناسایی خرابی اتصالات تیر به ستون و پای ستون قاب فولادی ارائه شده است. برای مدلسازی اتصالات از فنرهای دورانی استفاده گردیده که آسیب بصورت کاهش در ضریب سختی فنرها در نظر گرفته شده است. پس از مدلسازی المان محدود قاب های مورد مطالعه در محیط نرم افزار متلب، تحلیل مودال بر روی قابهای مورد مطالعه انجام گرفته است. برای در نظر گرفتن خرابی در محل اتصالات سه حالت خرابی فرضی در نظر گرفته شده است. برای تشخیص موقعیت و مقدار خرابی های فرض شده در اتصالات یک مسئله بهینه یابی رابطه سازی شده است. برای حل این مسئله از الگوریتم نوین شعله پروانه که دارای دقت و سرعت بالایی است استفاده می شود. قابهای مورد مطالعه شامل یک قاب فولادی چهار طبقه و یک قاب فولادی نه طبقه است. در قابهای مورد مطالعه خرابی هایی در محل اتصالات تیر به ستون و پای ستون فرض گردید و سپس با روش ارائه شده مقدار و محل آسیب فرض شده در اتصالات شناسایی گردید. نتایج بدست آمده بیانگر یک روش سودمند برای شناسایی خرابی در محل پای ستون و اتصالات قاب های فولادی است که می تواند با دقت بالایی محل و میزان آسیب در اتصالات را شناسایی نماید.

کلمات کلیدی: شناسایی خرابی، اتصالات تیر به ستون، اتصالات پای ستون، قاب فولادی، الگوریتم شعله پروانه

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.257528.2293
۱۳۹۹/۰۸/۲۸	۱۴۰۰/۰۴/۰۹	۱۴۰۰/۰۴/۱۳	۱۴۰۰/۰۴/۰۳	۱۴۰۰/۱۰/۳۰	doi: 10.22065/jsce.2021.257528.2293

نویسنده مسئول: سید سینا کورهلی

پست الکترونیکی: ss.kourehli@azaruniv.ac.i

۱- مقدمه

برای تشخیص آسیب در سازه ها روشهای مختلفی ارائه شده است که یکی از سودمند ترین آنها بر اساس داده های ارتعاشی سازه می باشد که مورد توجه محققین قرار گرفته است [۳-۱] . اغلب این روشها برای شناسایی آسیب در اعضای سازه ای بکار رفته است و کمتر به موضوع اتصالات پرداخته شده است. با توجه به اهمیت بررسی رفتار اتصالات در رفتار کلی قابهای فولادی و همچنین تشخیص آسیب در آنها تحقیقاتی در این زمینه صورت گرفته است. از مهمترین مطالعات صورت گرفته در این زمینه می توان به تحقیق وانگ و همکاران [۴] اشاره نمود. این روش شامل دو مرحله است که در مرحله اول مشخصه های دینامیکی با استفاده از روش زیرفضا و اندازه گیری های ورودی و خروجی شناسایی گردیده است و در مرحله دوم آسیب سازه ای بر اساس روش بهنگام سازی پیشرونده مدل المان محدود و روش بهینه یابی ارزیابی شده است. در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۱۴ صورت گرفته [۵] به شناسایی آسیب در اتصالات پیچی قاب فولادی پرداخته است. در این تحقیق با استفاده از مدل المان محدود کاهش یافته و روش خطای جمع مربعی درجه دوم تطبیقی با داده های ورودی نامعلوم به تشخیص خرابی پرداخته شده است. برای بررسی کارایی روش پیشنهادی از یک آزمایش میز لرزان شامل قاب فولادی شش طبقه با مقیاس یک سوم استفاده شده است. لی و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۶] روشی برای تشخیص آسیب در قابهای فولادی با اتصالات آسیب دیده تحت تحریک زمین لرزه ارائه نمودند. در این تحقیق یک روش دو مرحله ای بر اساس فیلتر کالمن پیشنهاد گردیده است. تحقیق دیگری برای شناسایی آسیب در گره های سازه ای با استفاده از شبکه عملکرد پایه شعاعی بهبود یافته در حوزه زمان و فرکانس صورت گرفته است [۷] . همچنین در تحقیق انجام شده در سال ۲۰۱۷ [۸] 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.

امورزه روشهای مختلف بهینه یابی برای شناسایی آسیب در سازه ها بکار می روند. کورهلی و همکاران [۹] با استفاده از اطلاعات مودال ناقص سازه و الگوریتم بهینه یابی الگو کاوی[1] به شناسایی آسیب در المانهای مختلف سازه ای پرداخته اند. در تحقیق دیگری کاوه و دادرس [۱۰] به شناسایی آسیب در سازه ها با استفاده از روش بهینه یابی تبادل حرارتی بهبود یافته[2] پرداختند. از جمله الگوریتمهای کارآمد می توان به الگوریتم شعله پروانه اشاره نمود که اخیرا توسط میرجلیلی [۱۱] ارائه گردیده است که علاوه بر سرعت بالا توانایی حل مسائل مربوط به شناسایی آسیب را دارا می باشد. قنادی و کورهلی در سال ۲۰۱۹ [۱۲] برای اولین بار از الگوریتم شعله پروانه برای شناسایی آسیب در سازه ها استفاده نمودند. در این تحقیق از معیار اطمینان مودی بر پایه انعطاف پذیری و فرکانس برای رابطه سازی تابع هدف استفاده گردیده است. در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۱۹ [۱۳] صورت گرفت به شناسایی آسیب توسط الگوریتم شمع و آتش پرداخته شده است. در این تحقیق تابع هدف بر اساس انرژی کرنشی مودال و تغییرمکانهای استاتیکی رابطه سازی شده است. برای نمایش عملکرد روش پیشنهادی از سه مثال شامل خرپا، قاب فولادی مستوی و قاب برشی هشت طبقه استفاده گردیده است.

در تحقیق حاضر یک روش موثر برای شناسایی مقدار و محل خرابی در اتصالات تیر به ستون و پای ستون قابهای فولادی ارائه گردیده است. برای مدلسازی آسیب در اتصالات از فنرهای دورانی استفاده گردیده است که خرابی بصورت کاهش در سختی فنرها مدل شده است. سه نوع المان سختی برای تیرها، ستونها و ستون های دارای اتصال پای ستون استفاده شده که پس از سرهم بندی، ماتریس سختی کل سازه تشکیل میگردد. در مرحله بعدی تابع هدف بر اساس بردار فرکانس سازه رابطه سازی شده و توسط الگوریتم شعله پروانه حل شده است. دو قاب چهار و نه طبقه دارای آسیب در محل اتصالات تیر به ستون و پای ستون مدلسازی شده و مقادیر آسیب در آنها شناسایی شده است.

[1] Pattern search algorithm
[2] Enhanced thermal exchange algorithm

۲- مدلسازی قاب فولادی با گره های انعطاف پذیر

در تحقیق حاضر برای مدلسازی اتصالات تیر به ستون و اتصال پای ستون از رابطه سازی ارائه شده توسط ونگ [۴] استفاده شده است. مدلسازی اتصالات با استفاده از فنرهای دورانی در انتهای تیرها و پای ستون انجام گردیده است. برای مدلسازی المان محدود قابهای فولادی سه نوع المان برای مدلسازی تیرها، ستون ها و ستونهای طبقه اول ارائه گردیده است. Kb_i ماتریس سختی مربوط به المان تیر دارای فنر دورانی در دو انتها بر اساس رابطه زیر بدست می آید:

$$Kb_i = \frac{\bar{\alpha}_i E_i I_i}{L_i}\begin{bmatrix} \frac{12}{L_i^2}\left(1+\frac{\alpha_i^l+\alpha_i^r}{\alpha_i^l\alpha_i^r}\right) & \frac{-6}{L_i}\left(1+\frac{2}{\alpha_i^r}\right) & \frac{-12}{L_i^2}\left(1+\frac{\alpha_i^l+\alpha_i^r}{\alpha_i^l\alpha_i^r}\right) & \frac{-6}{L_i}\left(1+\frac{2}{\alpha_i^l}\right) \\ & 4\left(1+\frac{3}{\alpha_i^r}\right) & \frac{6}{L_i^2}\left(1+\frac{2}{\alpha_i^r}\right) & 2 \\ & & \frac{12}{L_i^2}\left(1+\frac{\alpha_i^l+\alpha_i^r}{\alpha_i^l\alpha_i^r}\right) & \frac{6}{L_i}\left(1+\frac{2}{\alpha_i^l}\right) \\ sym & & & 4\left(1+\frac{3}{\alpha_i^l}\right) \end{bmatrix} \quad (۱)$$

که در رابطه فوق E_i ، I_i و L_i به ترتیب مدول الاستیسیته، ممان اینرسی و طول تیر iام میباشند. همچنین $\bar{\alpha}_i$ براساس رابطه زیر بدست می آید:

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\alpha_i^l \alpha_i^r}{\alpha_i^l\alpha_i^r + 4\alpha_i^l + 4\alpha_i^r + 12} \quad (۲)$$

در روابط فوق α_i^l و α_i^r به ترتیب ضریب سختی دورانی فنر سمت چپ و راست تیر i ام است.

$Kbase_i$ ماتریس سختی ستونهای دارای اتصال پای ستون بر اساس رابطه زیر حاصل می شود:

$$Kbase_i = \frac{E_i I_i}{L_i}\begin{bmatrix} \frac{12}{L_i^2}\left(\frac{\alpha_0+1}{\alpha_0+4}\right) & \frac{-6}{L_i}\left(\frac{\alpha_0+2}{\alpha_0+4}\right) \\ sym & 4\left(\frac{\alpha_0+3}{\alpha_0+4}\right) \end{bmatrix} \quad (۳)$$

که در رابطه فوق E_i ، I_i و L_i به ترتیب مدول الاستیسیته، ممان اینرسی و طول ستون iام دارای فنر دورانی در محل پای ستون میباشند. همچنین α_0 ضریب سختی دورانی فنر پای ستون i ام است.

برای مدلسازی سختی در ستونها از رابطه زیر استفاده گردیده است:

$$Kc_i = \frac{E_i I_i}{L_i}\begin{bmatrix} \frac{12}{L_i^2} & \frac{6}{L_i} & -\frac{12}{L_i^2} & \frac{6}{L_i} \\ & 4 & -\frac{6}{L_i} & 2 \\ & & \frac{12}{L_i^2} & -\frac{6}{L_i} \\ sym & & & 4 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

که در رابطه فوق E_i ، I_i و L_i به ترتیب مدول الاستیسیته، ممان اینرسی و طول ستون i ام میباشند.

در نهایت پس از سرهم بندی ماتریسهای سختی المانهای مختلف، ماتریس سختی کلی قاب بدست آمده است. در تحقیق حاضر مدلسازی آسیب بصورت کاهش در سختی فنرهای دورانی دو انتهای تیرها (α_i^l و α_i^r) و پای ستونها (α_0) انجام شده است.

۳- مسئله بهینه یابی

در تحقیق حاضر مسئله تشخیص محل و مقدار آسیب در محل اتصالات تیر به ستون و پای ستون به صورت یک مسئله بهینه یابی رابطه سازی شده است. مسئله بهینه یابی شامل تابع هدف، کرانه ها و الگوریتم حل مسئله خواهد بود که در بخش های زیر ارائه شده اند.

۳-۱- تابع هدف و کرانه ها

تابع هدف رابطه سازی شده در تحقیق حاضر بر اساس اختلاف بردارهای فرکانس قاب فولادی با آسیب در اتصالات فرضی و قاب با آسیب شناسایی شده در اتصالات می باشد. بنابراین در صورت تشخیص صحیح محل و مقدار آسیب در اتصالات مقادیر فرکانس قاب با مقادیر متناظر قاب با خرابی فرضی در اتصالات یکسان بوده و مقدار تابع هدف حداقل می گردد.

$$Minimize:\ fun(x) = \left(1 - \frac{\left|\{F^i\}^T \{F^j\}\right|^2}{\left(\{F^i\}^T \{F^i\}\right)\left(\{F^j\}^T \{F^j\}\right)}\right) \quad (۵)$$

در رابطه بالا F^i و F^j بردارهای فرکانسی قاب با اتصالات آسیب دیده فرض شده و قاب با اتصالات آسیب دیده شناسایی شده است. قیود خرابی برای اتصالات ما بین صفر و یک در نظر گرفته شده است که مقدار صفر به معنی عدم وجود آسیب و مقدار یک آسیب کامل اتصال خواهد بود.

با توجه به مقید بودن فرم استاندارد بهینه سازی، در تحقیق حاضر مقدار کرانه پایین برابر ۰،۰۱ و کرانه بالا برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

۲-۳- الگوریتم بهینه یابی شعله پروانه

الگوریتم شعله پروانه یکی از الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری است که اخیراً توسط میر جلیلی در سال ۲۰۱۵ [۱۱] ارائه شده است. این الگوریتم از رفتار پروانه ها در کنار شعله و علاقه مندی آن ها به شعله الهام گرفته است. در این الگوریتم از روش ناوبری پروانه ها در طبیعت به نام جهت گیری عرضی[3] الهام گرفته شده است. پروانه ها با حفظ یک زاویه ثابت با توجه به ماه، پرواز در شب را برای مسافت های طولانی انجام می دهند ولی در یک مسیر مارپیچی کشنده در اطراف چراغ های مصنوعی به دام می افتند. دراین الگوریتم فرض بر این است که راه حل های کاندید پروانه ها هستند و متغیرهای مسئله موقعیت پروانه ها در فضا است. بنابراین، پروانه ها با تغییر بردارهای موقعیتی خود می توانند در فضای یک بعدی، دو بعدی یا سه بعدی پرواز کنند. پروانه ها عوامل جستجوی واقعی هستند که در فضای جستجو حرکت می کنند، در حالی که شعله های آتش بهترین موقعیت پروانه ای هستند که تاکنون بدست آمده است. به عبارت دیگر، شعله ها را می توان پرچم ها یا پین هایی دانست که هنگام جستجوی فضای جستجو، توسط پروانه ها فرو میروند. بنابراین هر پروانه در اطراف یک پرچم (شعله) جستجو می کند و در صورت پیدا کردن راه حل بهتر، آن را به روز می کند. توضیحات بیشتر در مرجع [۱۱] ارائه شده است.

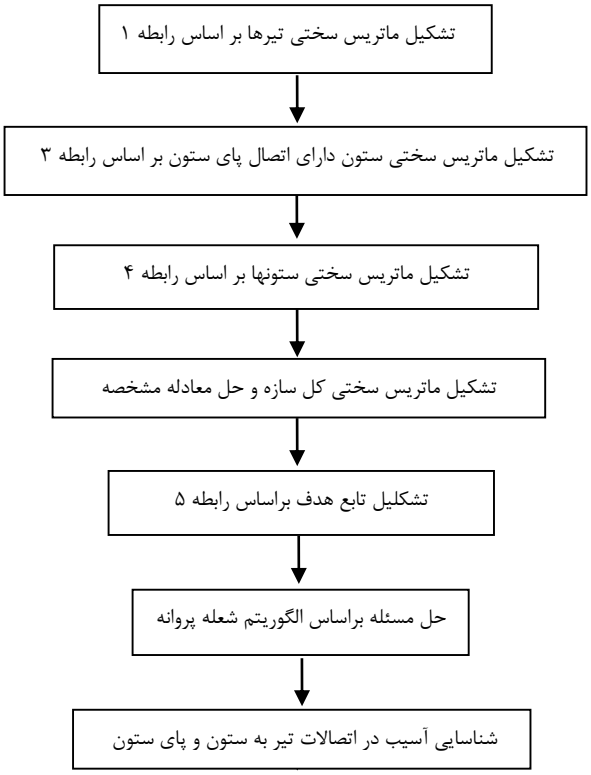
۴- قاب های مورد مطالعه

برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی اقدام به مدلسازی المان محدود دو قاب فولادی چهار و نه طبقه گردیده است. برای مدلسازی از محیط نرم افزار متلب استفاده گردیده است که برای تشکیل ماتریس سختی قابهای مورد مطالعه از سه المان زیر استفاده گردیده است: ۱- تیر دارای فنرهای دورانی برای در نظر گرفتن انعطاف پذیری اتصال تیر به ستون (بر اساس روابط ۱ و ۲) ۲- ستون دارای اتصال پای ستون (بر اساس رابطه ۳) ۳- المان ستونها (بر اساس رابطه ۴). همچنین طول دهانه تیرها ۴ متر و ارتفاع طبقات ۳,۵ متر است. گردش کار روش ارائه شده در شکل ۱ نشان داده شده است. در الگوریتم بهینه یابی مقدار جمعیت و تکرار الگوریتم به ترتیب برابر صد و پانصد در نظر گرفته شده است. همچنین جمعیت اولیه بصورت تصادفی انتخاب می شوند. برای بررسی وضعیت همگرایی مسئله بهینه یابی پیشنهاد شده برای یافتن پاسخ بهینه، هر یک از حل های بهینه ۱۰ بار تکرار شده و مقادیر میانگین حاصل شده در بخش نتایج و در اشکال ۳ و۶ ارائه شده است.

۱-۴- قاب چهار طبقه

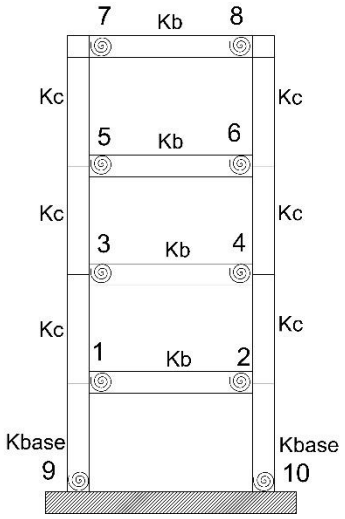
اولین مثال مورد مطالعه شامل یک قاب فولادی چهار طبقه است. همانطوریکه در شکل ۲ دیده می شود سه نوع المان سختی برای مدلسازی المان محدود این قاب استفاده شده است. ممان اینرسی ستونها cm^4 ۸۰۹۰ ، ممان اینرسی تیرها cm^4 ۵۷۰۰، سطح مقطع ستونها ۹۱ سانتی متر مربع، سطح مقطع تیرها ۷۸,۱ سانتی متر مربع، مدول الاستیسیته فولاد مصرفی برابر ۲۰۰ گیگا پاسکال و چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. شماره گذاری اتصالات بر روی شکل ۱ دیده می شود.

[3] transverse orientation

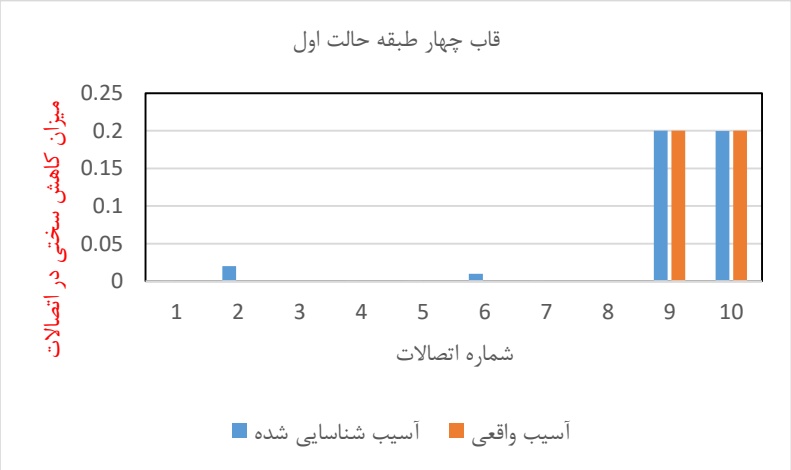


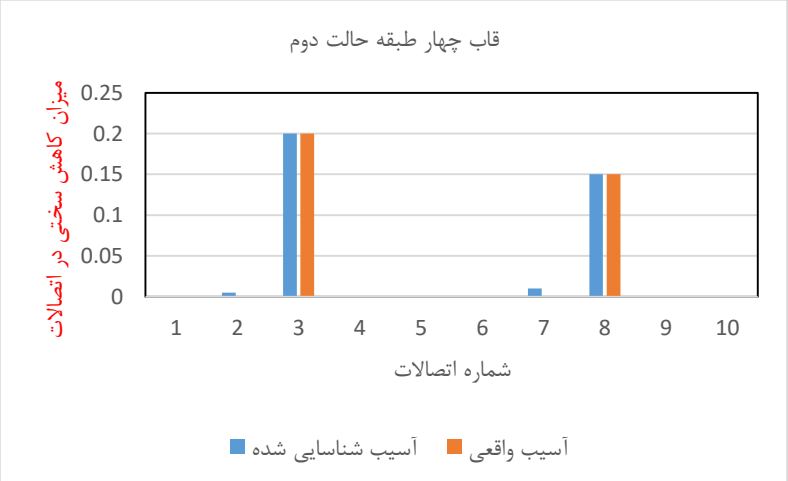
شکل ۱- گردش کار روش ارائه شده

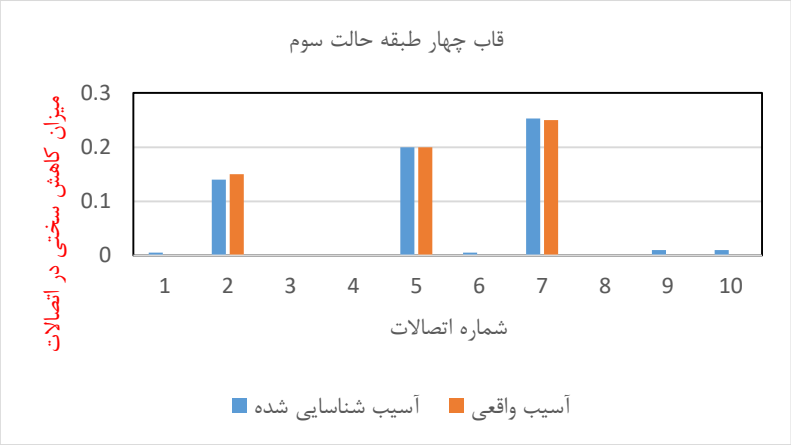
در قاب مورد مطالعه سه حالت فرضی آسیب در اتصالات در نظر گرفته شده است. حالت اول با در نظر گرفتن آسیب در اتصال شماره ۹ و ۱۰ (پای ستون) به مقدار ۲۰ درصد، حالت دوم بصورت آسیب در اتصالات شماره ۳ و ۸ به ترتیب بمیزان۲۰ و ۱۵ درصد، و در حالت سوم آسیب در اتصالات ۲، ۵ و ۷ به ترتیب به میزان ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد در نظر گرفته شده است. نتایج مربوط به شناسایی آسیب در اتصالات مختلف و حالتهای متفاوت در شکل ۳ ارائه گشته است. همانطوریکه مشاهده می شود روش پیشنهادی توانسته است محل و مقدار آسیب در اتصالات را بدرستی شناسایی نماید.



شکل ۲- قاب فولادی چهار طبقه با شماره گذاری اتصالات

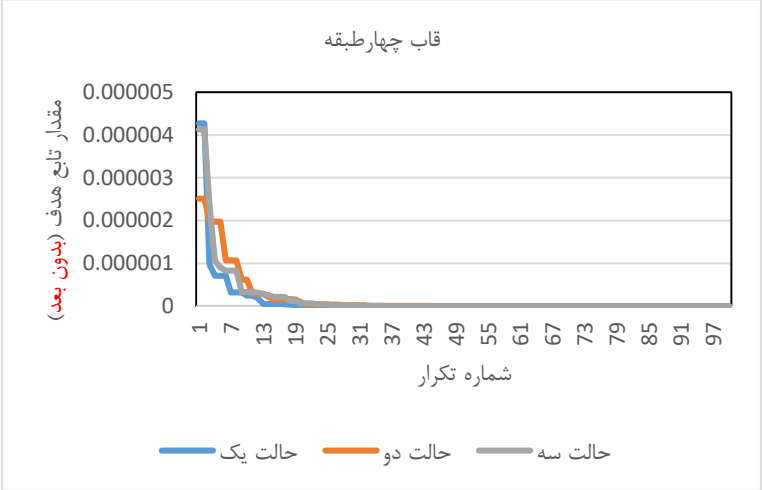






شکل ۳- آسیب شناسایی شده مربوط به سه حالت مختلف در اتصالات قاب چهار طبقه

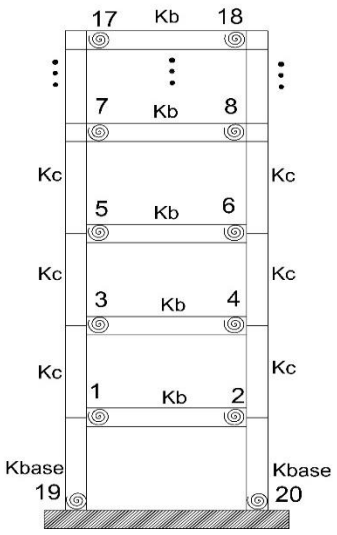
برای بررسی کارایی الگوریتم شمع پروانه در حل مسئله بهینه یابی برای سه حالت مختلف آسیب در اتصالات نمودار مربوط به مقادیر تابع هدف در تکرارهای مختلف در شکل ۴ ارائه گردیده است. با توجه به اینکه از تکرار ۱۰۰ به بعد تغییر چندانی در پاسخ های بهینه ایجاد نمیشود لذا روند بهینه یابی در ۱۰۰ تکرار اول ارائه شده است. همانطوریکه مشاهده میشود الگوریتم شعله پروانه دارای سرعت همگرایی بسیار بالایی است و توانسته تابع هدف را با سرعت بالایی حداقل نماید.



شکل ۴- روند بهینه یابی در قاب چهار طبقه

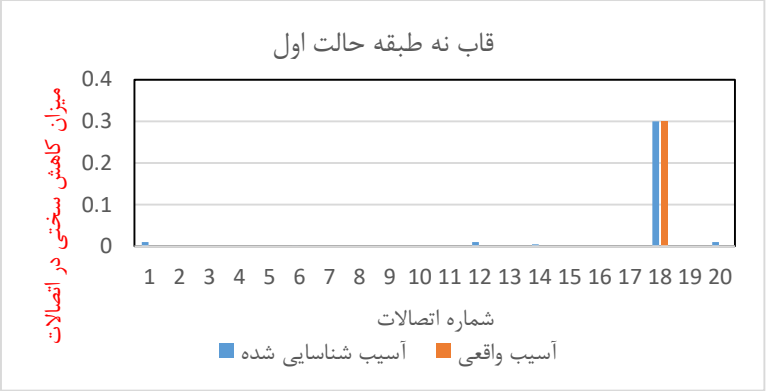
۲-۴- قاب نه طبقه

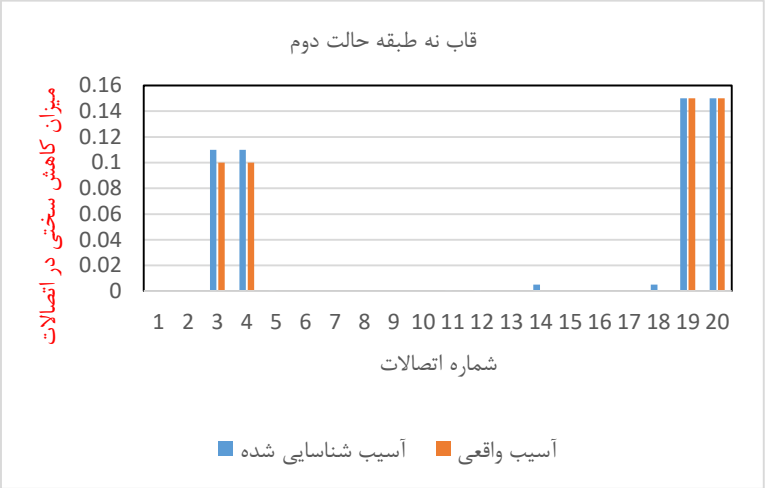
همانطوریکه در شکل ۵ دیده می شود دومین مثال شامل یک قاب فولادی نه طبقه است. ممان اینرسی ستونها cm^4 ۱۱۲۶۰ ، ممان اینرسی تیرها cm^4 ۸۰۹۰، سطح مقطع ستونها ۱۰۶ سانتی متر مربع، سطح مقطع تیرها ۹۱ سانتی متر مربع، مدول الاستیسیته فولاد مصرفی برابر ۲۰۰ گیگا پاسکال و چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.

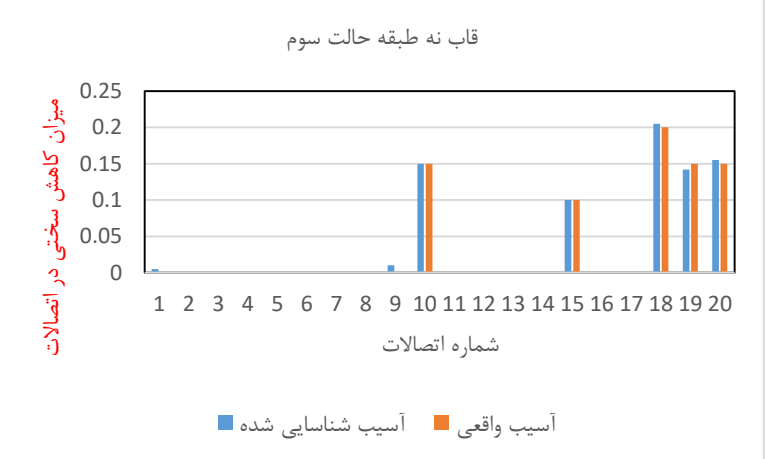


شکل ۵- قاب فولادی نه طبقه با شماره گذاری اتصالات

برای آزمون کارایی روش پیشنهادی سه حالت آسیب در اتصالات فرض گردیده است. در حالت اول، آسیب در اتصال شماره ۱۸ به میزان ۳۰ درصد لحاظ شده است. در حالت دوم اتصالات شماره ۳، ۴، ۱۹ و ۲۰ به مقدار ۰,۱، ۰,۱، ۰,۱۵ و ۰,۱۵ دچار آسیب گشته اند و در حالت سوم اتصالات شماره ۱۰، ۱۵، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ به مقدار ۰,۱۵، ۰,۱۰، ۰,۲، ۰,۱۵ و ۰,۱۵ دچار آسیب گشته اند. نتایج مربوط به شناسایی آسیب در اتصالات مختلف قاب نه طبقه در شکل ۶ نمایش داده شده است. همانطوریکه مشاهده می شود روش پیشنهادی قابلیت بسیار بالایی برای شناسایی محل و مقدار آسیب در اتصالات مختلف را دارد.

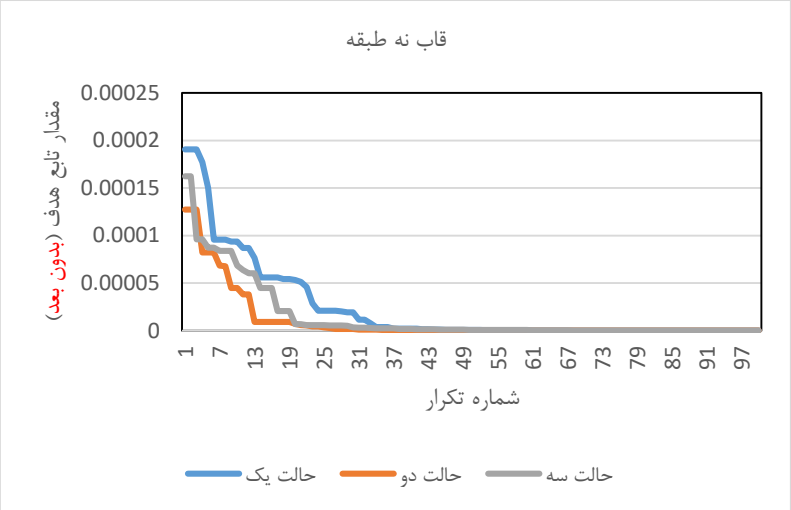






شکل ۶- آسیب شناسایی شده مربوط به سه حالت مختلف در اتصالات قاب نه طبقه

همچنین روند بهینه شده تابع هدف درتکرارهای مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطوریکه دیده می شود الگوریتم دارای سرعت بالایی برای رسیدن به پاسخ بهینه است.



شکل ۷- روند بهینه یابی در قاب نه طبقه

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر یک روش نوین برای شناسایی آسیب در اتصالات تیر به ستون و پای ستون قابهای فولادی ارائه گردید. برای مدلسازی اتصالات از فنرهای دورانی استفاده گردید که آسیب بصورت کاهش در ضریب سختی فنرها در نظر گرفته شد. مدلسازی المان محدود قابهای فولادی با استفاده از سه نوع المان سختی انجام شده و سپس آنالیز مودال انجام گرفته است. شناسایی آسیب یک مسئله معکوس است که با در دست داشتن مقادیر ویژه قاب آسیب دیده خواستار شناسایی ماتریس سختی کل سازه و ماتریس های متناظر المانها می باشیم. برای نیل به این هدف اقدام به حل کردن یک تابع هدف بر اساس داده های فرکانسی با استفاده از یک الگوریتم نوین بهینه یابی (الگوریتم پروانه شمع) گردید. در نهایت برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی اقدام به شناسایی حالت های مختلف آسیب در قابهای فولادی چهار و نه طبقه گردید. نتایج بدست آمده بیانگر کارایی بسیار خوب روش ارائه شده برای تشخیص آسیب در اتصالات تیر به ستون و پای ستون قابهای فولادی است.

منابع

[1] Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M., Esfandiari, A. (2019). “Structural health monitoring of a concrete-filled tube column”, Magazine of Civil Engineering, 85(1), pp. 136–145, DOI: 10.18720/MCE.85.11.
[2] Rezaifar, O., Doostmohammadi, M. (2016). “Damage detection of axially loaded beam: A frequency-based method”, Civil Engineering Infrastructures Journal, 49(1), pp.165-172. doi: 10.7508/ceij.2016.01.012.
[3] Younesi, A., Rezaeifar, O., Gholhaki, M., Esfandiari, A. (2020). “Damage detection in concrete filled tube columns based on experimental modal data and wavelet technique”, Mechanics of Advanced Composite Structures, 7(2), pp. 245-254, doi: 10.22075/macs.2020.17087.1195.
[4] 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), pp. 1533-1544.
[5] 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.
[6] 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), pp. 1075-1087.
[7] 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.
[8] 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.

[9] Kourehli, S.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.
[10] Kaveh, A., and Dadras A. (2018). "Structural damage identification using an enhanced thermal exchange optimization algorithm", Engineering Optimization, 50, pp. 430-451.
[11] Mirjalili S. (2015). "Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm", Knowledge-based systems, 89, pp. 228-249.
[12] Ghannadi P., Kourehli S. S. (2019). "Structural damage detection based on MAC flexibility and frequency using moth-flame algorithm", Structural Engineering and Mechanics, 70(6), pp. 649-659.
[13] Mohamadi Dehcheshmeh, M., Ghodrati Amiri, G., Zare Hosseinzadeh, A., Torbatinejad, V. (2019). "Structural damage detection based on modal data using moth-flame optimisation algorithm", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, pp.1-15.