



Developing the plastic analysis theory for braced frames and its optimization using genetic algorithm to predict the collapse of steel braced frames

Amir Saedi Daryan*, Soheil Palizi

Faculty of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT: The plastic analysis method is one of the most effective and most used methods in this field. Analysis of moment frames has been carried out with the aid of simple plastic analysis by many researchers. However, the analysis of braced frames due to the buckling of braces and the presence of axial and shear forces simultaneously in the frame members is very complex, and therefore, little research has been done in this area. In this research, a special theory based on a combination of mechanisms method for the plastic analysis of steel braced frames has been presented. Using the genetic algorithm, a program has been proposed to determine the failure mechanism and collapse load of the steel braced frames based on this methodology. The comparison of the results shows that the proposed formula is very accurate and can accurately determine the failure mode and its corresponding load. According to this, three arbitrary frames with differences in the number of stories are investigated. The collapse mechanism corresponding to the critical load factor is obtained using of the Genetic optimization algorithm and the virtual work theory. For Verification, a pushover analysis is performed for the determination of the collapse mode of each frame. In examples one and two which the frames are low-rise, the solution is the same, while in the third example, a slight difference is observed in the location of hinge formations. However, this error had been observed in moment frames due to the difference of the principals in the two applied analysis.

Review History:

Received: 9/28/2018
Revised: 11/8/2018
Accepted: 11/8/2018
Available Online: 12/15/2018

Keywords:

Plastic Analysis
Kinematic Theory
Braced Frame
Optimization
Genetic Algorithm

1. INTRODUCTION

Plastic analysis and design of frames have been investigated by various researchers since the middle of the last century. One of the latest studies is done by Greco et al., in 2017, studied the seismic collapse of moment frames, which presented a method for simulating seismic state and used SAP2000 software to validate this method [1]. Also, Saedi Daryan and Palizi in 2018 determined the failure mechanisms and collapse loads of steel moment frames using plastic analysis and using a modified dolphin metaheuristic algorithm [2].

Although numerous studies have been carried out on the determination of the collapse load and the failure mechanism of moment frames, few studies have been done to determine the failure mechanism of braced framing with the help of the plastic analysis theory.

2. THEORY

In this research, an automated method for evaluating the critical collapse loads and the collapse mechanisms has been introduced. The approach used in this method is based on the use of plastic analysis theory in constructing basic mechanisms and then combining them, which is based on the elimination of braces and the effect of this elimination on

*Corresponding author's email: username@EmailServer.com

the plastic capacity of other members of the structure. Thus, with the assumption of the creation of a mechanism on each brace, there is a new plastic capacity for other members of the structure. By removing braces and knowing the new plastic capacities of the members and using the plastic analysis theory for this new frame, it is possible to find the collapse mechanism of the frame. By eliminating other braces, an operation similar to the above-mentioned one is performed to determine the most critical condition for which the minimum collapse load is obtained. For this purpose, for the frame in question, the tensile yield limit load is placed instead of the brace. Under the effect of each of these brace loads, the axial force and shear force of each member following the creation of mechanism in each of the braces are stored separately in columnar matrices in MATLAB software. The reduced capacity of the members can now be calculated. For different brace mechanisms, new structures are analyzed with the plastic method. Due to the increasing volume of computations for combining the mechanisms of larger frames, a genetic optimization algorithm is used to combine these mechanisms. Finally, the code will provide the collapse mechanism for the desired frame. For verification, after modeling the main frame in ETABS 2015 software and performing standard non-linear pushover analysis, the results are compared with the written code.



2.1. Impact of axial and shear force

When obviating the braces, and replacing the yielding forces instead, axial and shear forces will be created in other members of the frame (beams and columns). The presence of axial and shear forces will change the properties of the cross-section of the members. In numerous studies, relationships have been presented for the reduction of the plastic capacity of members by axial forces as well as shear forces separately [3, 4].

2.2. Defining elementary mechanisms

In order to create the elementary mechanisms, a procedure is used in which the compatibility matrix is formed, and is solved by equating the equation to zero due to the assumption in plastic analysis theory that members do not elongate. Using a mathematical process, the required matrix for reaching elementary mechanisms is obtained.

2.3. Determination of collapse loads and combination of basic mechanisms

Collapse loads in a specified mechanism are obtained using Eq. 1. Displacements and rotations of mechanisms are considered virtually, and the internal and external virtual work equations are written.

$$\lambda_c = \frac{\text{internal virtual work}}{\text{external virtual work}} \quad (1)$$

The external virtual work is obtained by multiplying the forces applied to the nodes P in the corresponding displacement of those nodes for each specific mechanism.

$$\text{external virtual work} = P^T d \quad (2)$$

The internal virtual work is also achieved for each mechanism by multiplying the rotations in the plastic hinge r in the plastic moment of the members in which the hinges are formed.

$$\text{internal virtual work} = M_p^T |r| \quad (3)$$

2.4. Combination of basic mechanisms using the genetic algorithm

The Genetic algorithm is used to select the appropriate basic mechanisms for the combination process. Chromosomes are strings of binary bits whose number of bits is considered to be the number of independent mechanisms. Number 1 for each bit indicates that its corresponding mechanism is involved in the combination of mechanisms, and 0 means that it is not involved. Mutation and crossover is also applied are this process.

3. VERIFICATION OF THE INNOVATIVE FORMULA AND THE PRESENTED CODE IN MATLAB

3.1. Example one: a one-span and five-floor frame

The frame and its characteristics is shown in Fig. 1. The

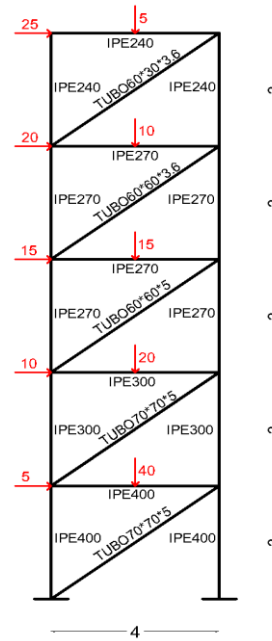


Fig. 1. Example 1

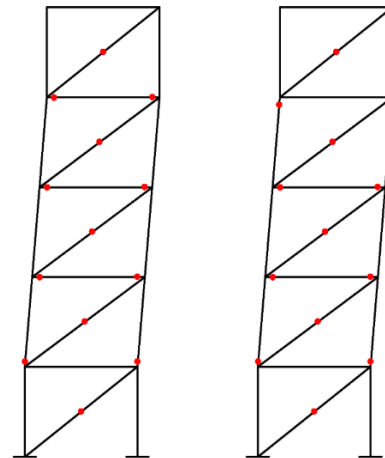
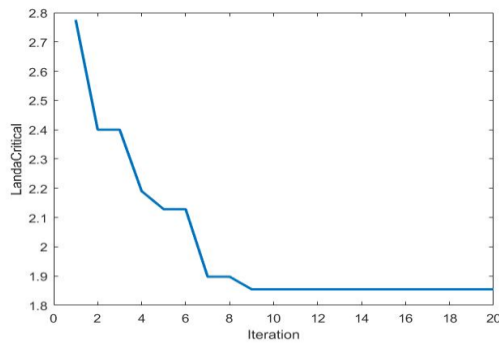


Fig. 2. Right: Collapse mechanism obtained from the code, and Left: Collapse mechanism obtained from static nonlinear analysis in ETABS2015

proposed method showed the failure mechanism in Fig. 2-right, while the pushover result are shown in Fig. 2-left. The only minor difference is observed in the location of a hinge in a column on the fourth floor, which in the model made in ETABS was formed in the fifth-floor beam. It became notable especially with the increase in the number of floors in the structure. The genetic algorithm converged to the minimum load factor of 1.85 after 9 repetitions whose diagram is given in Fig. 3.

4. CONCLUSIONS

In this study, a new formula is presented to evaluate the failure modes of planar frames. This formula, which is presented for the first time for braced frames, is based on



the removal of braces and applying the effects of removing them on the frame then producing the basic mechanisms and combining them. The code written for this approach can automatically calculate the critical collapse mechanism using optimization tools with appropriate accuracy. The efficiency

of this method is compared with that of standard nonlinear static analysis. The collapse mechanism matches the results of the written code. At the same time, the computational effort, the accuracy and speed of the innovative formula, the degree of convergence, and its combination with the genetic algorithm are highly satisfactory.

REFERENCES

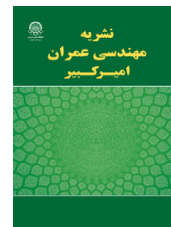
- [1] Greco, A., Cannizzaro, F., and Pluchino, A., 2017. "Seismic Collapse Prediction of Frame Structures by Means of Genetic Algorithm". *J Engineering Structures*, Vol. 153, p. 152-168.
- [2] Saedi, A., and Palizi, S., Farhoudi N., 2018. "Optimization of plastic analysis of moment frames using modified Dolphin Echolocation algorithm". Submitted in *J Advances in Structural Engineering*.
- [3] Chen, W.F., and Sohal, I., 1995. "Plastic Design and Second-order Analysis of Steel Frames". In *Springer*, New York Inc.
- [4] Wong, M.B., 2009. "Plastic Analysis and Design of Steel Structures". *Butterworth-Heinmann*, 1st Edn. (2009).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Saedi Daryan, S. Palizi, *Developing the plastic analysis theory for braced frames and its optimization using genetic algorithm to predict the collapse of steel braced frames*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(2) (2021) 105-108.

DOI: [10.22060/ceej.2018.15001.5819](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.15001.5819)





توسعه‌ی روش تحلیل پلاستیک برای قاب های مهاربندی و بهینه سازی آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت پیش بینی فروریزش قاب های فولادی با مهاربند

امیر ساعدی داریان^{۱*}، سهیل پالیزی^۲

^۱ استادیار دانشگاه شهید بهشتی

^۲ کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۶

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۸/۱۷

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۹/۲۴

کلمات کلیدی:

تحلیل پلاستیک

تئوری کینماتیک

قاب مهاربندی

بهینه یابی

الگوریتم ژنتیک

خلاصه: روش تحلیل پلاستیک از جمله موثرترین و پرکاربردترین روش ها در این حوزه می باشد. با وجود این که استفاده از روش تحلیل پلاستیک در قاب های خمشی به صورت دستی امری بسیار زمان بر و خسته کننده می باشد، روند تحلیل ساده بوده و محققین متعدد در این حوزه فعالیت هایی داشته اند. لکن تحلیل قاب های مهاربندی به دلیل مسئله کمانش مهاربندها و وجود نیروهای محوری و برشی در اعضای قاب بسیار پیچیده بوده و لذا تحقیق چندانی در این حوزه انجام شده استنشده است. در این تحقیق، ابتدا روشی ویژه جهت تحلیل پلاستیک قاب های فولادی مهاربندی بر اساس روش ترکیب مکانیزم های پایه ارائه شده است و در ادامه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ی مدونی جهت تعیین مکانیزم خرابی و بار فروریزش قاب های فولادی مهاربندی بر اساس این روش ابداعی ارائه شده است. مقایسه‌ی نتایج نشان می دهد روش ارائه شده بسیار دقیق بوده و با دقت بالایی توانایی تعیین مود خرابی و بار معادل آن را دارد. بر این اساس، سه قاب فرضی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مکانیزم فروریزش متناظر با ضریب بار فروریزش بحرانی، با کمک تئوری کار مجازی و بهینه یابی با استفاده از الگوریتم ژنتیک به دست آمد. به منظور صحت سنجی، یک تحلیل پوش اور هم برای تعیین مود فروریزش در هر مثال انجام شد. در دو مثال اول که سازه ها کوتاه مرتبه تر بودند، مود فروریزش هر دو روش یکسان بود. در حالی که اندکی خطا در تشکیل مفاصل در قاب بلندمرتبه مشاهده شد که این خطا به دلیل تفاوت بین دو روش تحلیل در برخی قاب های خمشی هم مشاهده شده بود.

۱- مقدمه

روش دقیقاً بر اساس تئوری کینماتیک تحلیل حدی است. به این صورت که تمام مکانیزم های فروریزش ممکن در سازه مورد بررسی قرار می گیرند و بار نهایی فروریزش آن ها محاسبه می شود. سپس حداقل مقدار بار فروریزش به عنوان بار فروریزش بحرانی و مکانیزم متناظر آن به عنوان مکانیزم فروریزش سازه معرفی می شود. بنابراین در این روش نیاز به محاسبه ی مستقیم ماتریس سختی سازه و یا اعمال تاریخچه ی بارگذاری نیست.

مشکل اصلی در این روش زمانی است که تعداد دهانه ها و تعداد طبقات سازه زیاد باشد. در این حالات ترکیب مکانیزم های اولیه با هم برای یافتن مکانیزم بحرانی کاری بسیار خسته کننده و در

مسئله ی طراحی و تحلیل پلاستیک قاب ها از اواسط قرن گذشته توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. در رویکرد کینماتیکی، برای یک قاب تحت بارهای λP ، مقدار λ برای هر مکانیزم فرضی باید بیشتر و یا برابر با ضریب بار فروریزش بحرانی λ_c باشد. تحلیل حدی که اطلاعاتی درباره ی ظرفیت باربری و مکانیزم فروریزش سازه ها فراهم می آورد، روشی بسیار سریع و قابل اعتماد در مقایسه با روش های تحلیل دینامیکی و استاتیکی غیرخطی می باشد. به همین دلیل به کرات مورد استفاده واقع شده است. این

*نویسنده عهده دار مکاتبات: amir_saedi_d@yahoo.com



و از نرم افزار سپ ۲۰۰۰ و تحلیل پوش اور برای صحت سنجی این روش استفاده نمودند [۱۵]. در این تحقیق از بارهای ثقلی به صورت گسترده استفاده شده است که به صورت افزایشی نیستند. در کنار آن بارهای جانبی که افزایشی هستند به منظور بار لرزه ای در نظر گرفته شده است. نحوه ی تشکیل مفصل هم به دلیل اعمال بار گسترده در نقطه ای نزدیک به وسط دهانه در تیرها بود و در ستون ها همان نقاط بحرانی قبلی نقاط تشکیل مفصل بودند. ساعدی^۵ و پالیزی^۶ در سال ۲۰۱۸ با استفاده از تحلیل پلاستیک و به کمک الگوریتم جدیدی که با نام دلفین اصلاح شده معرفی نمودند، مکانیزم خرابی و بارفروریزش قاب های خمشی فولادی را تعیین نموده اند و به نوعی همان مسئله ی بررسی شده توسط محققین قبلی را با الگوریتم جدیدتری انجام دادند و سرعت نتایج را بهبود بخشیدند [۱۶].

با وجود آن که تحقیقات متعددی بر روی تعیین بار فروریزش و مکانیزم خرابی قاب های خمشی انجام شده است ولیکن تحقیقات چندانی در خصوص تعیین مکانیزم خرابی قاب های دارای مهاربند با کمک تئوری تحلیل پلاستیک انجام شده است و تاکنون روش مدون و یکپارچه ای بر پایه تحلیل پلاستیک جهت تعیین مکانیزم فروریزش بحرانی قاب های دارای مهاربند ارائه شده است. دلایل متعددی در این خصوص وجود دارد که از آن جمله می توان به رفتار پیچیده کمانشی مهاربندها در حین مکانیزم شدن اشاره کرد. نکته دیگر وجود نیروهای محوری و برشی قابل توجه در اعضا می باشد که موجب می شود تعیین مکانیزم های پایه به سادگی میسر نباشد.

در این تحقیق، روشی خودکار برای ارزیابی بارهای فروریزش و مکانیزم های فروریزش بحرانی قاب های صفحه ای دارای مهاربند معرفی شده است. رویکرد موجود در این روش بر استفاده از تئوری تحلیل پلاستیک در ساختن مکانیزم های پایه و سپس ترکیب آن ها با یکدیگر استوار است. رویکرد موجود در این روش بر اساس حذف مهاربندها و اعمال تاثیر حذف آن بر ظرفیت پلاستیک سایر اعضای سازه است. به این ترتیب با فرض مکانیزم شدن هر مهاربند، ظرفیت پلاستیک جدیدی برای سایر اعضای سازه متصور است. حال با حذف مهاربندها و با داشتن ظرفیت پلاستیک جدید اعضا و با استفاده از تئوری تحلیل پلاستیک برای این قاب جدید، امکان یافتن مکانیزم

مواردی شاید غیرممکن باشد. بنابراین نیاز به روشی که با آن بتوان ترکیب مکانیزم ها را به صورت خودکار و همچنین با سرعت بالا انجام داد احساس می شود. به این منظور استفاده از هوش مصنوعی می تواند گزینه ی مناسبی باشد. الگوریتم های فراابتکاری بخشی از الگوریتم های حوزه ی هوش مصنوعی هستند که برای یافتن پاسخ بهینه به کار می روند. این الگوریتم ها انواع مختلفی دارند از جمله الگوریتم ژنتیک، مورچگان، خفاش، دلفین و غیره. در این بین از الگوریتم ژنتیک برای مقاصد مهندسی بیشتر استفاده شده است که استفاده از آن زمانی که تابعی قرار است بهینه و یا کمینه شود و زمانی که سیستم مورد نظر به صورتی است که توصیف آن به صورت آرایه هایی از اعداد صحیح ممکن باشد بسیار مناسب است [۱۷]. در مهندسی سازه هم، برای نخستین بار برای مقاصد طراحی [۳] و سپس برای مقاصد تحلیلی مورد استفاده قرار گرفته اند. کوهاما^۱ و همکاران [۴] مطالعاتی درباره ی تعیین ضرایب بار فروریزش قاب های صفحه ای توسط الگوریتم ژنتیک ارائه کرده اند. در این تحقیق، از اصول موجود در تئوری تحلیل پلاستیک قاب ها و روش ترکیب مکانیزم های پایه استفاده شده است. به دلیل استفاده از مکانیزم های گره ای به صورت مستقیم در حل مسئله، زمان حل بسیار بالاست. کاوه^۲ و همکاران، [۵-۷] و کاوه و جهانشاهی^۳ تحلیل پلاستیک حدی قاب ها را با استفاده از الگوریتم های ابتکاری و سیستم الگوریتم مورچگان مورد مطالعه قرار داده اند [۸-۱۱]. در حالی که کاوه و همکاران تحلیل های پلاستیک قاب های صفحه ای را با استفاده از بهینه یابی اجسام در حال برخورد و نسخه ی توسعه یافته ی آن انجام داده اند [۱۲ و ۱۳]. این محققین سعی بر این داشتند که از الگوریتم های جدیدتری به جهت بررسی کارایی آن ها و بهبود سرعت همگرایی استفاده نمایند. بعد از آن ها جهانشاهی و همکاران مطالعه ای مقایسه ای در تعیین بار فروریزش قاب های صفحه ای توسط الگوریتم های شبکه ی عصبی، ژنتیک و مورچگان ارائه کرده اند [۱۴]. نخستین کاربرد شبکه عصبی در حل مسئله ی تحلیل پلاستیک قاب ها در این تحقیق بوده است. گریسو^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۷ فروریزش لرزه ای قاب های خمشی را مورد مطالعه قرار دادند که برای شبیه سازی حالت لرزه ای روشی را ارائه

1 Kohama

2 Kaveh

3 Jahanshahi

4 Greco

5 Saedi

6 Palizi

مکانیزم های تیر و طبقه به عنوان مکانیزم های پایه هستند و از مکانیزم گره برای به هم بستن این مکانیزم های پایه استفاده می شود. این مکانیزم های پایه با کمک مکانیزم های گره با هم ترکیب شده و در هر مرحله ضریب بار فروریزش با استفاده از تئوری کار مجازی به دست می آید. حداقل ضریب بار به دست آمده به عنوان ضریب بار فروریزش بحرانی و مکانیزم متناظر با آن به عنوان مکانیزم فروریزش سازه بیان می شود. برای استفاده از تئوری تحلیل پلاستیک در سازه هایی که دارای مهاربند هستند، مکانیزم مهاربند هم باید به عنوان یکی از مکانیزم های پایه در نظر گرفته شود. اگر این مکانیزم به صورت مستقل در نظر گرفته شود، در اثر ترکیب مکانیزم مهاربندی با سایر مکانیزم های پایه هیچ گونه حذف مفصلی مطابق با تئوری تحلیل پلاستیک قاب ها صورت نمی گیرد که در اثر آن ضریب بار فروریزش را کاهش دهد و مکانیزم ترکیب شده هیچ گاه به عنوان یکی از مکانیزم های بحرانی نخواهد بود. این مسئله یکی از علل توقف محققین در استفاده از روش تحلیل پلاستیک برای تعیین مکانیزم خرابی قاب های مهاربندی بوده است.

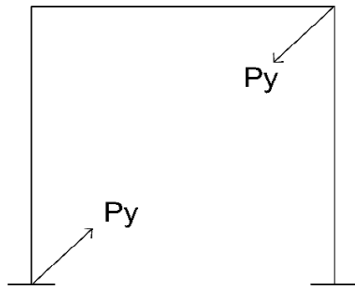
در این تحقیق برای حل این مساله به جای در نظر گرفتن مکانیزم مهاربند به صورت مستقل، ابتدا مهاربند را حذف کرده و سپس بجای آن نیروی حد تسلیم کششی معادل آن گذاشته می شود. این نیرو برای هر تک مکانیزم مهاربند باعث ایجاد نیروی محوری و نیروی برشی در سایر اعضای سازه ای شامل تیرها و ستون ها می شود. در اثر ایجاد نیروی محوری و نیروی برشی قابل توجه در تیرها و ستون ها از ظرفیت پلاستیک آن ها کاسته می شود [۱۷ و ۱۸]. با حذف هر مهاربند و اعمال نیروی حد تسلیم کششی آن مهاربند به جای آن ها به صورت جداگانه و محاسبه ی نیروی محوری و برشی ایجاد شده در سایر اعضا، در هر حالت می توان کاهش ظرفیت پلاستیک اعضا در اثر مکانیزم مهاربند مورد نظر را یافت. پس از حذف مهاربند و اعمال اثر آن، می توان تئوری تحلیل پلاستیک را مطابق روش های سنتی روی سازه های به دست آمده انجام داد. با اعمال نیروی مهاربندها به صورت جداگانه و یافتن کاهش ظرفیت پلاستیک اعضا، گویی چندین قاب جدید به دست می آید که باید تحلیل پلاستیک بر روی آن ها انجام شود. به عنوان مثال برای یک قاب دودهانه با دو طبقه که در هر طبقه یکی از دهانه ها مهاربند کششی دارد، بایستی تحلیل پلاستیک برای ۴ قاب انجام شود. حالت

فروریزش برای قاب فراهم خواهد بود. با حذف سایر مهاربندها هم عملیاتی مشابه عملیات فوق انجام می شود تا بحرانی ترین حالتی که ضریب بار فروریزش حداقل از آن حاصل می شود تعیین گردد. در تحقیق حاضر روش ابداعی جهت حذف مهاربند در مرحله مکانیزم شدن و معادل کردن عملکرد آن با قاب خمشی و در نظر گرفتن جمیع رفتارهای موثر موجود در قاب جدید ارائه شده است.

به این منظور در قاب مسئله ی مورد نظر به جای مهاربندها نیروی حد تسلیم کششی آن قرار داده می شود. در اثر هر کدام از این نیروهای مهاربندی، نیروی محوری و نیروی برشی هر عضو در اثر مکانیزم شدن هر مهاربند به صورت مجزا در ماتریس هایی ستونی در نرم افزار متلب ذخیره می شود. حال ظرفیت پلاستیک کاهش یافته ی اعضا قابل محاسبه است. به ازای حالات مختلف مکانیزم شدن مهاربندها، سازه های جدید تحلیل پلاستیک می شوند. با توجه به افزایش حجم محاسبات برای ترکیب مکانیزم های پایه ی قاب های بزرگتر، از الگوریتم بهینه یابی ژنتیک برای ترکیب این مکانیزم ها استفاده می شود تا به جای رسیدن به دقیق ترین جواب در یک مدت زمان بسیار زیاد، به جواب تقریبی و قابل قبول در مدت زمانی بسیار کوتاه دست یافت که در این گونه مسائل امری منطقی می باشد و این الگوریتم با هدف کمینه کردن ضریب بار، مکانیزم فروریزش بحرانی را ارائه می کند. در نهایت کد نوشته شده مکانیزم فروریزش قاب مورد نظر را به دست می دهد. برای صحت سنجی، پس از مدل سازی قاب اصلی در نرم افزار ایتبز ۲۰۱۵ و انجام تحلیل غیرخطی پوش اور استاندارد، نتایج با کد نوشته شده مقایسه شده اند. از جمله نورآوری های این تحقیق و ضرورت انجام آن، این است که تاکنون روشی که با آن بتوان به کمک تئوری تحلیل پلاستیک، ضریب بار و مکانیزم فروریزش قاب های دارای مهاربند را به دست آورد، ارائه شده استنشده است و عمده فعالیت محققین مربوط به بهینه یابی سازه های قاب خمشی با الگوریتم های مختلف بوده است. لذا در ابتدا تئوری تحلیل پلاستیک برای قاب های مهاربندی تعمیم داده شده و سپس این تئوری با کمک الگوریتم بهینه یابی ژنتیک در نرم افزار متلب برای سازه های بزرگتر مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- تئوری مسئله

در تئوری تحلیل پلاستیک سازه ها برای قاب های خمشی،



شکل ۱. اعمال نیروی حد تسلیم کششی
Fig. 1. Applying yield limit tensile force

و به عبارتی قاب های جدیدی را که برای تحلیل پلاستیک لازم است به دست دهد. برای اعمال تئوری تحلیل پلاستیک روی هر کدام از این قاب ها، پس از نوشتن کد مربوط به تئوری تحلیل پلاستیک، از الگوریتم ژنتیک برای ترکیب مکانیزم ها استفاده شده است. در اثر تحلیل این سازه ها مکانیزم متناظر با حداقل ضریب بار فروریزش به عنوان مکانیزم فروریزش سازه معرفی می شود.

در ادامه به منظور روشن نمودن روش ابداعی، نحوه ی تاثیر نیروی محوری و نیروی برشی بر ظرفیت پلاستیک اعضای سازه، نحوه ی تعریف مکانیزم های پایه ارائه شده است. در انتها نحوه ی اعمال الگوریتم ژنتیک در روش ابداعی تحلیل پلاستیک بیان شده است تا نحوه بهینه سازی این روند جهت سهولت و افزایش سرعت استخراج نتایج معین شود.

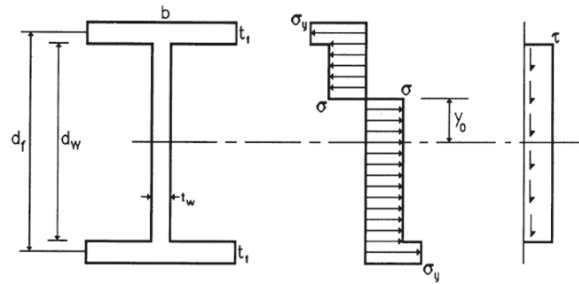
۲-۱- تاثیر نیروی محوری و برشی

مکانیزم شدن مهاربندها در قاب های دارای مهاربند یکی از مکانیزم های پایه محسوب می شود. برای در نظر گرفتن این مکانیزم ، پس از حذف مهاربند، نیروی معادل حد تسلیم کششی مهاربندها در دوسوی آن قرار داده می شود در شکل ۱ نحوه اعمال این نیرو نشان داده شده است.

در اثر این نیرو، در سایر اعضای قاب (تیر و ستون ها) نیروی محوری و نیروی برشی ایجاد خواهد شد. وجود نیروی محوری و برشی باعث تغییر در مشخصات مقطع عضو یا به عبارتی دیگر تغییر در ظرفیت پلاستیک آن خواهد شد. در تحقیقات متعددی که در خصوص تاثیر نیروی محوری و برشی بر ظرفیت پلاستیک مقاطع انجام شده است روابطی برای کاهش ظرفیت پلاستیک یک عضو در اثر نیروی محوری و همچنین نیروی برشی به صورت مجزا ارائه

اول زمانی است که هیچ کدام از دو مهاربند جاری نشده اند. حالت دوم و سوم برای مکانیزم شدن تنها به ترتیب مهاربندهای طبقه اول و دوم است و حالت چهارم هم مربوط به مکانیزم شدن همزمان هر دو مهاربند می باشد. در هر حالت نیروهای محوری و برشی متفاوتی در اعضا ایجاد خواهد شد، بنابراین کاهش ظرفیت پلاستیک در اعضا، برای هر حالت بیان شده، با یکدیگر متفاوت خواهد بود. برای هر سازه ای که تحلیل پلاستیک انجام می شود، یک ضریب بار حداقل به دست خواهد آمد که بیانگر مکانیزم بحرانی در آن سازه می باشد. حال مکانیزم متناظر با کوچکترین ضریب بار به دست آمده از تمام سازه های مورد مطالعه بیانگر مکانیزم فروریزش سازه خواهد بود. این فرآیند با توجه به کاهش مدام ظرفیت پلاستیک اعضا ناشی از نیروهای برشی و محوری وارده ، فرآیند پیچیده و دشواری می باشد. در تحقیق حاضر روش ابداعی جهت انجام این تغییرات ارائه شده است. در ادامه باید توجه نمود حتی با داشتن روند مذکور برای قاب های بزرگ با تعداد طبقات و تعداد دهانه های زیادتر انجام این محاسبات و مقایسه نتایج کاری بسیار زمان بر و خسته کننده و تا حدودی غیرممکن است و همچنین با توجه به این که این مسئله به مانند یک مسئله ی بهینه یابی است، می توان از الگوریتم های بهینه یابی برای ترکیب مکانیزم های ابتدایی استفاده کرد. به این منظور بعد از تعیین روند مرتبط با تحلیل پلاستیک قاب های مهاربندی در ادامه از الگوریتم ژنتیک برای ترکیب مکانیزم های اولیه هر سازه با هم استفاده می شود.

برای اجرایی کردن تئوری ارائه شده از نرم افزار متلب استفاده شده است. به این منظور کدی نوشته شده است که قادر باشد روند ابداعی را گام به گام انجام داده و نهایتاً ضریب بار حداقل و مکانیزم فروریزش متناظر با آن را در مدت زمانی بسیار کوتاه به دست دهد. برای این منظور در ابتدا قاب بدون مهاربند مدل می شود، سپس به جای مهاربندها نیروی معادل حد تسلیم کششی آن ها (که برابر با تنش تسلیم کششی فولاد مهاربند ضرب در مساحت سطح مقطع آن می باشد) در هر طبقه قرار داده می شود. نیروهای محوری و برشی ایجاد شده در اعضای سازه در اثر اعمال نیروی مهاربندها محاسبه شده و با اعمال یکسری تغییرات روی آنها در نرم افزار متلب، آنها را به فرم دلخواه برای کدنویسی در بیاورد. سپس این کد ظرفیت پلاستیک جدید اعضا را برای حالات مختلف مکانیزم شدن مهاربندها می یابد



شکل ۲. توزیع تنش در مقطع

Fig. 2. Stress distribution in section

دو مکانیزم فروریزش اولیه در نظر گرفته می شود که شامل مکانیزم تیر و طبقه می باشند. مکانیزم گره ای هم نقش به هم بستن مکانیزم های تیر و طبقه را دارند و عامل حداقل شدن ضریب بار می باشند. این مکانیزم ها در شکل ۳-ب، ۳-ج و ۳-د برای یک قاب یک طبقه و یک دهانه نشان داده شده اند.

با توجه به آن که در روند ارائه شده مکانیزم مهاربندی به یک قاب خمشی معادل تبدیل خواهد شد نتیجتاً برای یک قاب با تعداد b مهاربند، به اندازه $y = \sum_{i=1}^{i=b} (b-i) * i$ قاب برای تحلیل پلاستیک ایجاد خواهد شد.

با عنایت به تعداد مکانیزم های پایه برای هر قاب خمشی که در شکل ۳ نشان داده شد برای هر قاب به دست آمده که دارای m دهانه و n طبقه باشد، تعداد $m * n$ مکانیزم تیر و n مکانیزم طبقه وجود دارد. بنابراین تعداد مکانیزم های پایه برابر $n(m+1)$ خواهد بود. این معادلات به همراه مکانیزم های گره ای معادلات اولیه برای یافتن جواب نهایی را فراهم می آورند.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود برای مکانیزم های گره و طبقه، مقدار دوران ها یکسان است ولی جهت دوران آن ها ممکن است متفاوت باشد. در مکانیزم تیر، دوران دو انتها با هم برابر و با علامت یکسان است ولی دوران مفصل میانی دو برابر و در جهت مخالف با دوران انتهایی المان است. کار داخلی برای مکانیزم گره برابر صفر است و نتیجتاً مکانیزم گره مستقیماً در معادلات نقشی ندارد. ولیکن با وجود این که مکانیزم گره به تنهایی تشکیل معادله ی کار را نمی دهد در مکانیزم های ترکیبی، این مکانیزم عامل رسیدن به مقدار حداقل λ است. چرا که دوران گره ها در مکانیزم های ترکیبی موجب حذف مفصل می شود که بواسطه آن در معادلات ترکیبی ضریب بار کاهش می یابد.

شده است [۱۷ و ۱۸]. در حالتی که هم نیروی محوری و هم نیروی برشی قابل توجهی حضور دارند از رابطه ای اندرکنشی برای مقاطع مختلف استفاده می شود. رابطه ی ۱ برای مقاطع I شکل با فرض توزیع تنش به صورت شکل ۲ ارائه شده است.

$$M_{pc} = \sigma_y b t_f d_f + \sigma t_w \left(\frac{d_w^2}{4} - y_0^2 \right) \quad (1)$$

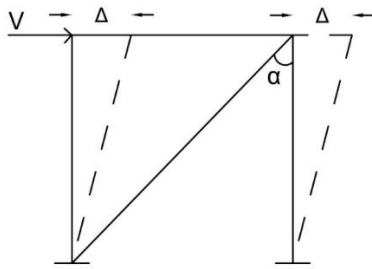
در رابطه ۱، M_{pc} ظرفیت خمشی پلاستیک کاهش یافته، σ_y تنش تسلیم و σ تنش نرمال در جان است و برحسب نیروی برشی (V) با استفاده از $\tau = \frac{V}{t_w d_w}$ و استفاده از رابطه ی ون میزس^۱ قابل بیان است. y_0 هم می تواند به نیروی محوری P با رابطه ی $P = 2t_w y_0 \sigma$ مرتبط شود. y_0 هم می تواند به نیروی محوری P با رابطه ی $P = 2t_w y_0 \sigma$ مرتبط شود.

$$\sigma^2 + 3\tau^2 \leq \sigma_y^2 \quad (2)$$

۲-۲- تعریف مکانیزم های اولیه

به منظور آن که شرایطی مشابه شرایط واقعی در خصوص بارگذاری قاب ها لحاظ شده باشد بار متمرکز در وسط هر دهانه اعمال شده که مشابه بار ثقلی می باشد و در تراز هر طبقه نیز بار دیگری اعمال شده که نمایانگر بارگذاری جانبی (باد یا زلزله) می باشد. با توجه به اعمال بارگذاری ثقلی و جانبی مفاصل پلاستیک در حالت کلی می توانند در نقاط بحرانی تشکیل شوند که این نقاط شامل نقاط گره ای و وسط تیرها می باشند در شکل ۳-الف این نقاط بحرانی نشان داده شده اند. مطابق روش نیل و سایموندز^۲ [۱۹ و ۲۰]، برای قاب های خمشی

1 Von Mises
2 Neal and Symonds



شکل ۴. شکل مربوط به رابطه ۳

Fig. 4. Figure corresponding to the Equation 3

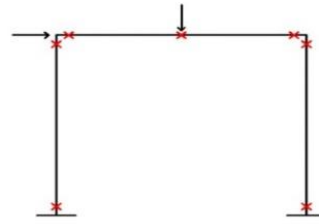
باشد. اگر چه این مکانیزم خاص به ندرت اتفاق می افتد ولیکن در این تحقیق به منظور جامعیت روش ابداعی تلاش شده این حالت نیز پوشش داده شود. جهت پوشش دهی این حالت خاص رابطه ی کار برای جاری شدن مکانیزم مهاربند به صورت تنها نوشته شده و ضریب بار فروریزش تک مکانیزم مهاربندی از رابطه ی ۳ حاصل شده است. در این رابطه A سطح مقطع مهاربند، F_y تنش تسلیم فولاد و λ هم ضریب بار است.

$$\lambda V \cdot \Delta = (A \cdot F_y \cdot \sin \alpha) \cdot \Delta \quad (3)$$

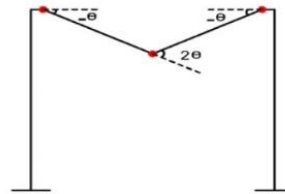
در روش ارائه شده توسط واتوود [۲۱] که روش معمول تحلیل حدی می باشد برای تولید مکانیزم های مستقل مکانیزم های گره ای نیز محاسبه می شوند این مساله موجب افزایش حجم محاسبات می شود. لذا به همین منظور در این تحقیق با توجه به شرایط مکانیزم های گره ای، آنها بدون انجام محاسبات و به صورت خودکار اعمال شده اند. این مساله موجب کاهش قابل ملاحظه حجم عملیات در این بخش شده است. در ادامه باید ماتریس سازگاری C تشکیل شود. هر گره ی مقید نشده دارای درجات آزادی انتقالی افقی و عمودی است. ماتریس سازگاری بر اساس تغییر طول اعضا در مختصات محلی نوشته می شود و سپس با سوار کردن آن ها روی هم ماتریس سازگاری در مختصات گلوبال شکل می گیرد.

$$Cd = e \quad (4)$$

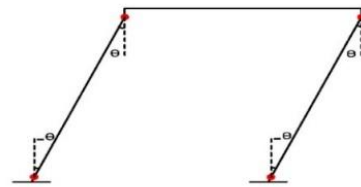
همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است. d برداری شامل جابه جایی مولفه های گره های مقید شده است و e تغییر



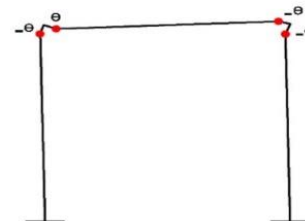
الف: نقاط بحرانی



ب: مکانیزم تیر



ج: مکانیزم طبقه



د: مکانیزم گره

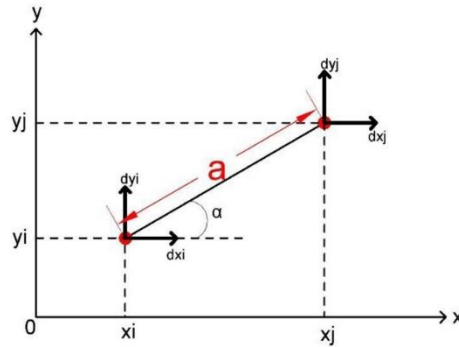
شکل ۳. نحوه چیدمان مفاصل پلاستیک در قاب یک طبقه یک دهانه

Fig. 3. Plastic hinge arrangement in a one-story one-span frame

مکانیزم های مستقل باید با هم ترکیب شده و مکانیزم های ترکیبی را ارائه دهند. در بین کلیه مکانیزم ها (شامل مکانیزم های پایه و ترکیبی) مکانیزم متناظر با حداقل ضریب بار فروریزش، مکانیزم بحرانی مورد نظر خواهد بود.

این عملیات برای همه ی قاب های به دست آمده انجام شده و مقدار λ حداقل بین تمامی آن ها انتخاب می شود. مکانیزم متناظر با آن ضریب بار حداقل، بیانگر مکانیزم فروریزش قاب مورد نظر خواهد بود.

روش ارائه شده کلیه مکانیزم های محتمل برای یک قاب با چندین طبقه و چندین دهانه را در نظر می گیرد جز یک حالت، و آن حالت مرتبط با زمانی است که تک مکانیزم مهاربندی بحرانی



شکل ۵. جزئیات یک عضو در فضای کلی

Fig. 5. Details of an element in global coordinates

۳-۲- تعیین بارهای فروریزش و ترکیب مکانیزم های پایه

بار فروریزش در یک مکانیزم مشخص با استفاده از رابطه ی ۹ به دست می آید. جابجایی ها و دوران های مکانیزم ها به صورت مجازی در نظر گرفته می شود و رابطه ی کار مجازی داخلی و خارجی نوشته می شود.

$$\lambda_c = \frac{\text{internal virtual work}}{\text{external virtual work}} \quad (9)$$

کار مجازی خارجی با ضرب نیروهای اعمال شده به گره ها P در جابجایی متناظر آن گره برای هر مکانیزم مشخص به دست می آید.

$$\text{external virtual work} = P^T d \quad (10)$$

کار مجازی داخلی هم با ضرب دوران ها در محل مفصل پلاستیک (r) در لنگر پلاستیک اعضایی که در آن ها مفصل تشکیل شده است برای هر مکانیزم به دست می آید.

$$\text{internal virtual work} = M_p^T |r| \quad (11)$$

به دلیل این که لنگر پلاستیک همواره دوران مفصل را تحمل می کند، مقدار دوران ها همواره مثبت در نظر گرفته می شوند.

در طی شکل گیری معادلات فوق از مکانیزم های گره ای صرف نظر شده است. عاملی که باعث می شود ضریب بار کاهش یابد همین مکانیزم های گره ای هستند و گرنه ترکیب دو مکانیزم پایه که از هم

طول هر عضو در درجات آزادی تعریف شده می باشد. با استفاده از شکل ۵ می توان تغییر طول هر المان را به صورت رابطه ۵ به دست آورد.

$$e = (d_{xj} - d_{xi}) \cos \alpha + (d_{yj} - d_{yi}) \sin \alpha \quad (5)$$

با نوشتن تغییر طول هر عضو در مختصات کلی، ماتریس سازگاری C به دست می آید. به توجه به فرض تحلیل پلاستیک مبنی بر این که المان ها تغییر طول نمی دهند، معادله ی ۶ باید حل شود.

$$Cd = 0 \quad (6)$$

برای حل معادله ی ۶، گام اول اعمال حذف گوسین روی ماتریس C است [۲۲].

پس از اعمال حذف گوسین، با کمی بینش می توان جابه جایی های مستقل و وابسته را از هم جدا کرد و ستون های متناظر با جابه جایی های مستقل را به صورت ماتریس همانی یا همان I نوشت:

$$[I|C_d] \begin{Bmatrix} d^i \\ d^d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

بنابراین d^i یا همان جابه جایی های مستقل را می توان بر حسب d^d یا همان جابه جایی های وابسته نوشت:

$$d^i = -C^d d^d \quad (8)$$

مکانیزم	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
کروموزوم	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰

شکل ۶. نمونه کروموزوم مربوط به مکانیزم‌های خرابی

Fig. 6. A chromosome of a collapse mechanism

دهانه‌های سازه، تعداد مکانیزم‌های پایه نیز افزایش می‌یابد و ترکیب آن‌ها با یکدیگر امری بسیار خسته‌کننده و زمان‌بر خواهد بود. به این منظور، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی به دلیل عملکرد مطلوب و سهولت اجرا پیشنهاد می‌گردد. الگوریتم ژنتیک جزو اولین الگوریتم‌هایی است که برای بهینه‌یابی ارائه شده‌است و بیشترین کاربرد را در میان رشته‌های مهندسی داشته‌است.

در الگوریتم ژنتیک، ژن‌های با برانزندی بهتر احتمال بالاتری برای زنده ماندن و جفت شدن با سایر بازماندگان برای بازسازی نسل‌های جدید دارند. نمونه‌های تولید شده از نسلی به نسل دیگر این مشخصه را دارند که جنبه‌های مثبت والدین خود را به ارث می‌برند و اعضای ضعیف‌تر را حذف می‌کنند. از این الگوریتم‌ها برای انتخاب مکانیزم‌های ابتدایی مناسب در روند ترکیب مکانیزم‌ها استفاده می‌شود.

کروموزوم‌ها رشته‌هایی از بیت‌های باینری هستند که تعداد بیت‌ها برابر با تعداد مکانیزم‌های مستقل در نظر گرفته می‌شود. عدد یک برای هر بیت بیانگر این است که مکانیزم متناظر آن در ترکیب مکانیزم‌ها شرکت دارد و عدد صفر به معنی عدم شرکت آن است (شکل ۶).

تقاطع^۱، همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود عملیاتی است که در آن دو رشته قطع می‌شوند و رشته‌های جدیدی را تولید می‌کنند. یک محل قطع با احتمال P_c یکنواخت بین اولین بیت و آخرین بیت‌های رشته‌ها باید انتخاب شود.

جهش^۲ تغییر رندم در یک بیت که به صورت رندم انتخاب شده‌است، از صفر به یک و برعکس می‌باشد. برای شروع جست‌وجو برای حداقل ضریب بار، یک نسل اولیه به صورت اتفاقی تولید می‌شود و عملیات ژنتیک روی آن انجام می‌شود. برانزنده‌ترین‌ها به نسل جدید کپی می‌شوند و همین روند بارها تکرار می‌شود تا یک تخمین مناسب و منطقی به‌دست آید. معیار برانزنده‌ترین حاصل ارزیابی یک

مستقل هستند، ضریب باری بین ضریب بار دو مکانیزم به‌دست می‌دهد. مکانیزم‌های گره‌ای را می‌توان به صورت خودکار اعمال نمود. به این منظور موقعیت مفاصل در هنگام محاسبه‌ی کار داخلی باید تعیین شود. در صورتی که دوران گره‌ای بتواند کار داخلی را کاهش دهد، در ترکیب مکانیزم‌های مورد نظر قرار می‌گیرد. به نوبت هر کدام از مکانیزم‌های گره‌ای در نظر گرفته می‌شوند و حالتی که در آن حداقل کار داخلی را به‌دست می‌دهد جواب مورد نظر خواهد بود.

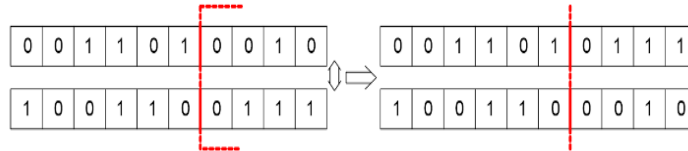
با افزایش تعداد دهانه‌ها و تعداد طبقات سازه، تعداد حالات ترکیب مکانیزم‌ها با هم افزایش می‌یابد. به همین جهت ترکیب کردن این مکانیزم‌های پایه با هم به منظور یافتن مکانیزم فروریزش صحیح امری بسیار خسته‌کننده و وقت‌گیر خواهد بود. قابی که دارای n مکانیزم مستقل است، به تعداد $(2^n - n - 1)$ ترکیب ممکن از مکانیزم‌های مستقل آن وجود دارد که البته همه‌ی آن‌ها جزو مکانیزم‌های فروریختگی منطقی به حساب نمی‌آیند. همانطور که در پاراگراف قبلی گفته شد، ترکیبی قابل قبول است که مکانیزم‌های گره‌ای باعث حذف مفصل و در نتیجه کاهش ضریب بار شود.

مطابق روش نیل و سایموندز [۱۹ و ۲۰] بررسی مکانیزم‌های فروریزش ممکن با شروع از یک مکانیزم پایه و سپس ترکیب آن با سایر مکانیزم‌ها انجام می‌شود تا بتوان در اثر ترکیب آن‌ها ضریب بار را کاهش داد. وقتی که مکانیزم دیگری وجود نداشت که بتواند ضریب بار را کاهش دهد، همین روند برای یک مکانیزم دیگر تا زمانی که همه‌ی حالات ممکن بررسی شوند ادامه می‌یابد. حداقل ضریب بار به‌دست آمده همان ضریب بار بحرانی خواهد بود. با توجه به شرایط ذکر شده مسئله را می‌توان به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌یابی مطرح کرد و برای حل آن از الگوریتم‌های بهینه‌یابی استفاده نمود. چرا که معمولاً ترجیح بر این است که تقریب خوبی از مسئله در زمان کوتاه به دست آورد تا این‌که جواب دقیق را در مدت زمانی زیاد یافت.

۲-۴- ترکیب مکانیزم‌های پایه با استفاده از الگوریتم ژنتیک

روی قاب‌هایی که در هر مرحله با حذف هر مهاربند به دست می‌آیند، باید تحلیل پلاستیک صورت گیرد. در بخش قبل توضیحاتی درباره‌ی تئوری تحلیل پلاستیک و نحوه‌ی رسیدن به مکانیزم‌های پایه ارائه شد. حال مطابق تئوری تحلیل پلاستیک، این مکانیزم‌های پایه باید با یکدیگر ترکیب شوند. با افزایش تعداد طبقات و تعداد

1 crossover
2 mutation



شکل ۷. نحوه ی اعمال تقاطع
Fig. 7. A crossover process



شکل ۸. گام بندی مراحل تئوری ارائه شده
Fig. 8. Steps of the proposed theory

تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش اور استاندارد در نرم افزار ایتبز ۲۰۱۵ به دست آمده اند. در نهایت مکانیزم های خرابی آن ها با مکانیزم های خرابی به دست آمده از کد نوشته شده در نرم افزار متلب مقایسه شده اند. نتایج برخی از آنها در بخش ۳ ارائه شده است. حال پیش از بررسی مثال ها و صحت سنجی روش ارائه شده، فلوجارتی از کل روند انجام شده به صورت شکل ۸ آورده می شود.

تابع بخصوص به نام تابع برازندگی^۱ است.

به منظور صحت سنجی روش ابداعی، تعداد قابل توجهی از قاب های مهاربندی بعد از آن که توسط کد نوشته شده در نرم افزار متلب بر اساس روش ابداعی تحلیل شده و مکانیزم آنها تعیین شده است در نرم افزار ایتبز ۲۰۱۵ نیز مدل سازی شده اند. مکانیزم خرابی آن ها با

1 Fitness function

تیر $8 \times 42 \text{ * } TUBO60$ است. مقادیر ظرفیت پلاستیک اعضا روی قاب مشخص شده اند. نیروها بر حسب kN ، لنگرها بر حسب $kN.m$ و مساحت ها بر حسب cm^2 است. ابعاد دهانه ها و ارتفاع طبقات هم بر حسب متر (m) می باشد.

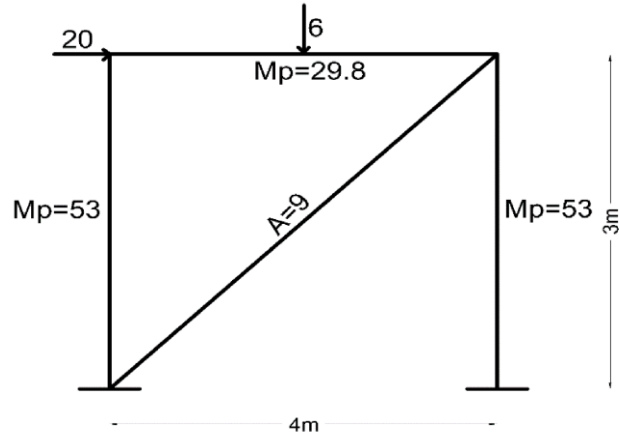
این قاب دارای ۳ مکانیزم پایه می باشد که شامل مکانیزم تیر، مکانیزم طبقه و مکانیزم مهاربندی است. مکانیزم های تیر و طبقه مشابه با حالت قاب خمشی است. در اینجا مکانیزم مهاربند به آن ها اضافه شده است. برای در نظر گرفتن مکانیزم مهاربند، جاری شدن مقطع مهاربندی که معادل همان نیروی حد تسلیم کششی (AF_y) مقطع مهاربندی است بر قاب اعمال می شود. در اثر جای گذاری مهاربند با نیروهای معادل حد تسلیم کششی آن، نیروی محوری و نیروی برشی در اعضای دیگر ایجاد خواهد شد که در اینجا ممکن است این نیرو برخلاف حالت قاب خمشی قابل صرف نظر کردن نباشد و باعث کاهش ظرفیت پلاستیک برخی اعضا مطابق رابطه ی ۱ شود. در واقع مکانیزم های تیر و طبقه مشابه حالت خمشی در نظر گرفته می شوند و برای مکانیزم مهاربندی از نیروی حد تسلیم کششی آن استفاده می شود (شکل ۱۰).

با قرار دادن نیروی حد تسلیم مهاربند (P_y) به جای مهاربند و به دست آوردن نیروی محوری و برشی ایجاد شده در تیر و ستون ها و با استفاده از رابطه ی ۱، ظرفیت پلاستیک کاهش یافته ی اعضا به دست خواهد آمد که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. M_{pc} ظرفیت پلاستیک کاهش یافته ی اعضا می باشد.

حال برای ترکیب سه مکانیزم تیر، طبقه و مهاربند با یکدیگر، حالات مختلف را باید در نظر بگیریم. ترکیبات زیر قابل بیان است:

۱. مکانیزم تیر و طبقه
۲. مکانیزم مهاربند و تیر
۳. مکانیزم مهاربند و طبقه
۴. مکانیزم تیر، طبقه و مهاربند

با توجه به کوچک بودن این سازه به لحاظ تعداد دهانه و تعداد طبقه، حالات ممکن برای مکانیزم ها محدود و بسیار کم است. بنابراین در این مثال، کد نوشته شده، بدون نیاز به الگوریتم بهینه یابی، قادر است تا مکانیزم دقیق فروریزش را با بررسی تمام این حالات به دست آورد. اینها همه ی حالات ممکن ترکیب مکانیزم ها با یکدیگر است که در شکل ۱۲ آورده شده است. ضریب بار هر کدام نیز در زیر آن



شکل ۹. قاب نمونه یک
Fig. 9. Frame of example one

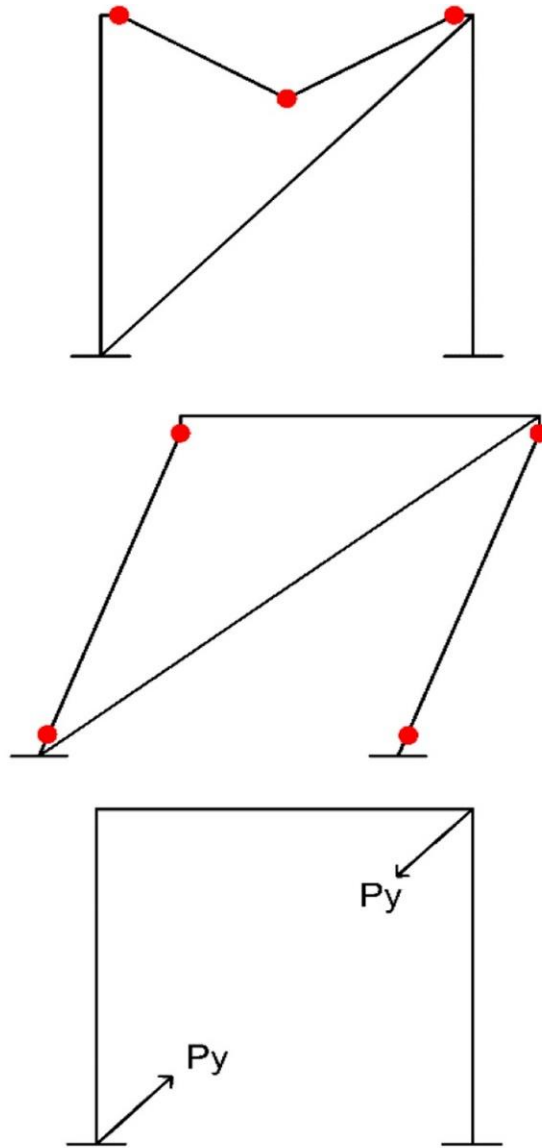
۳- صحت سنجی روش ابداعی و کد ارائه شده در متلب

به منظور صحت سنجی نمونه های مورد بررسی، هر قاب ابتدا در نرم افزار ایتبز ۲۰۱۵ مدل می شود و بارگذاری ثقلی و جانبی مطابق شکل ها بر روی هر قاب قرار می گیرند. سپس از تحلیل استاتیکی غیر خطی پوش اور برای تعیین مود فروریزش نهایی استفاده می شود. به اینبه این منظور در نقاط بحرانی تشکیل مفصل که شرح آن در بخش ۲ آورده شد، مفاصل بالقوه پلاستیک از نوع لنگر خمشی در نرم افزار تعریف می شوند و در اثر افزایش بارگذاری روی هر قاب، سازه تا زمان فروریزش تحلیل می شود. سپس مود فروریزش در لحظه ای که سازه فرو می ریزد از روی نرم افزار تصویربرداری می شود و با نتایج حاصل از تحلیل پلاستیک با کمک روش ابداعی مقایسه می شود.

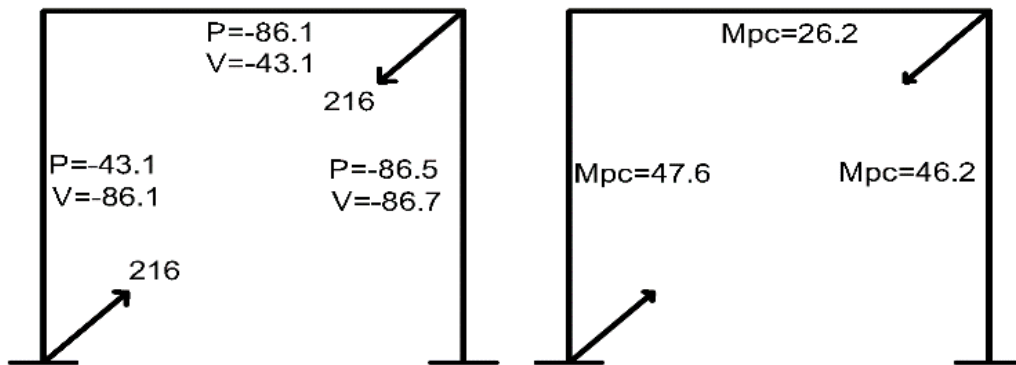
ضمن این که در صورت وجود مهاربند فشاری در قاب ها، با توجه به جهت بارگذاری جانبی و همچنین عطف به این نکته که ظرفیت فشاری مهاربندها کمتر از ظرفیت کششی آن هاست، هنگام مکانیزم شدن مهاربند کششی، مهاربند فشاری پیش از آن جاری شده است (کمانش نموده است)، لذا اثری که این مهاربند فشاری دارد صرفا در نیروهایی است که به سایر اعضا (تیرها و ستون ها) وارد می شود و باعث تغییر در ظرفیت لنگر پلاستیک اعضای قاب ها هنگام به دست آوردن قاب های جدید خواهد شد.

۳-۱- نمونه یک : قاب یک دهانه و یک طبقه

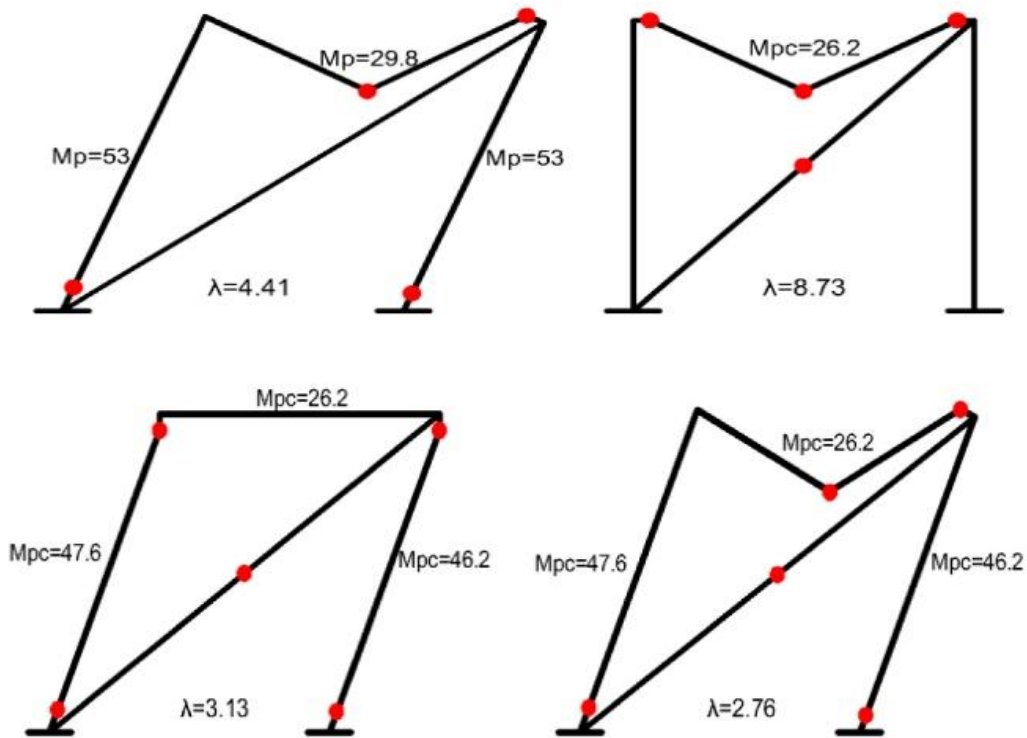
در قاب مهاربندی شکل ۹ اتصالات تیر و ستون گیردار هستند، مقطع تیر $IPE160$ و مقطع ستون ها $IPE200$ است. مهاربند هم



شکل ۱۰. مکانیزم های پایه نمونه یک
 Fig. 10. Elementary mechanisms of example one



شکل ۱۱. نیروهای ایجاد شده در اعضا و ظرفیت پلاستیک جدید آن ها
 Fig. 11. Forces in members and their new plastic capacity



شکل ۱۲. حالات محتمل مکانیزم های فروریزش در قاب نمونه یک
 Fig. 12. Possible collapse mechanisms in the frame of example one

مساحت مقاطع در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این مثال هم نیروها بر حسب kN ، لنگرها بر حسب $kN.m$ و مساحت ها بر حسب cm^2 است. ابعاد دهانه ها و ارتفاع طبقات هم بر حسب متر (m) می باشد.

مطابق روند بیان شده در مثال ۱، در این مثال هم پس از حذف مهاربندها، ابتدا نیروی حد تسلیم جاری شدن مربوط به مهاربند طبقه ی دوم جای گذاری می شود و سپس نیروهای محوری و برشی ایجاد شده در سایر اعضا به دست می آیند. سپس به جای مهاربند دوم نیروی حد تسلیم کششی آن قرار داده می شود و نیروهای محوری و برشی اعضا به دست می آیند. این نیروها به صورت خودکار توسط کد نوشته شده، در ماتریس هایی ستونی ذخیره می گردند. حال با داشتن نیروهای محوری و برشی، ظرفیت پلاستیک کاهش یافته ی هر عضو به ازای جاری شدن هر مهاربند به دست خواهد آمد. به این ترتیب چهار سازه ی قاب خمشی وجود خواهد داشت که باید تحلیل پلاستیک روی آن ها انجام گیرد و ضریب بار بحرانی آن ها با استفاده از روش ترکیب مکانیزم های پایه به دست آید. مکانیزم فروریزش متناظر با حداقل ضریب بار فروریزش در بین این چهار

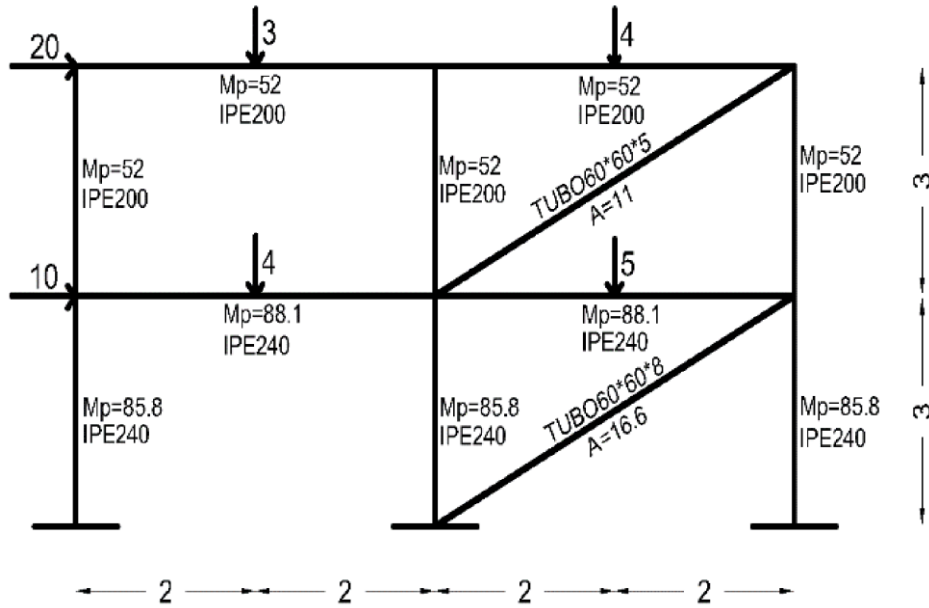
نوشته شده است.

همانطور که مشاهده می شود، با کمک تئوری تحلیل پلاستیک و با ترکیب مکانیزم های اولیه با یکدیگر تمام حالات ممکن مورد بررسی قرار گرفت و مکانیزم فروریختگی بحرانی در این مثال مکانیزم با کمترین ضریب بار ($\lambda = 2.74$) است. نتایج حاصل از تحلیل غیر خطی پوش اور استاندارد همین قاب در نرم افزار ایتبز ۲۰۱۵ دقیقا مشابه نتایج به دست آمده از روش ابداعی را نتیجه داد.

به دلیل کم بودن تعداد مکانیزم های ممکن در این سازه، این مثال به صورت دستی نیز با تئوری بیان شده قابل تحلیل است. حال با بزرگ تر شدن سازه و با افزایش تعداد مکانیزم های پایه، روش بیان شده، عملا کارایی خود را از دست خواهد داد. لکن با استفاده از الگوریتم بهینه یابی ژنتیک، می توان پاسخ مناسب را در کوتاه ترین زمان ممکن به دست آورد. دو مثال بعدی کاربرد این الگوریتم را در تئوری بیان شده نشان خواهند داد.

۲-۳- نمونه دو: قاب دو طبقه دو دهانه

هندسه ی قاب و مقاطع اعضا به همراه ظرفیت پلاستیک و



شکل ۱۳. نمونه دوم

Fig. 13. Frame of example two

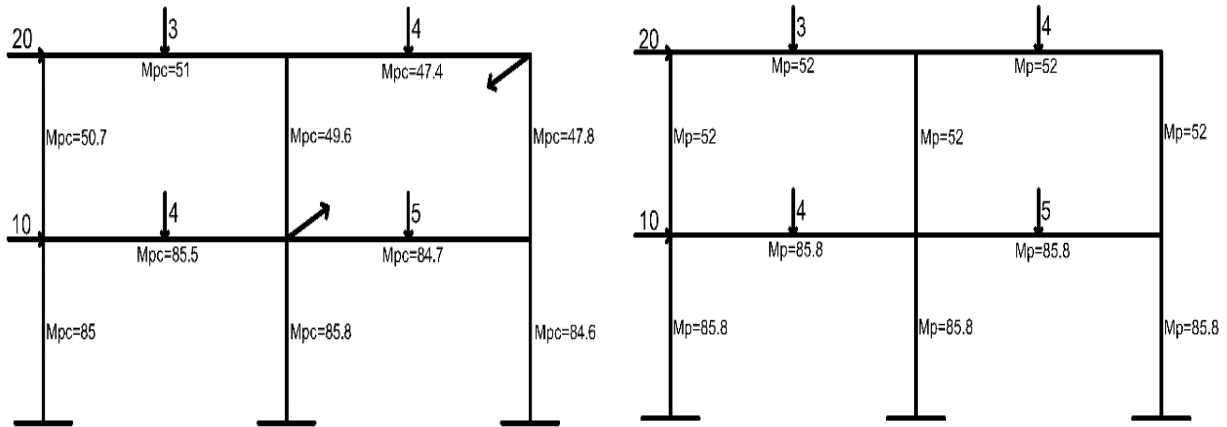
سازه نیز در نرم افزار ایتبز ۲۰۱۵ تحلیل شده و همانطور که انتظار می رفت در اینجا نیز روش ابداعی و بهینه سازی انجام شده توسط الگوریتم ژنتیک مکانیزم خرابی را به درستی تعیین نموده است.

۳-۳- نمونه سه: قاب پنج طبقه یک دهانه

قاب مهاربندی مطابق شکل ۱۷ مورد مطالعه قرار گرفته است. مقاطع آن هم روی شکل نشان داده شده است. در این مثال هم نیروها بر حسب kN ، لنگرها بر حسب $kN.m$ و مساحت ها بر حسب cm^2 است. ابعاد دهانه ها و ارتفاع طبقات هم بر حسب متر (m) می باشد. با به کار بردن تئوری بیان شده در این تحقیق و اجرای کد مربوط به آن، مکانیزم خرابی مطابق شکل ۱۸-الف به دست آمد. مکانیزم متناظر با این ضریب بار که از کد نوشته شده به دست آمد، تطابق قابل قبولی با پاسخ مدل ایتبز ۲۰۱۵ داشت که توسط تحلیل پوش اور استاندارد انجام شده بود. مود فروریزش حاصل از تحلیل پوش اور در نرم افزار ایتبز در شکل ۱۸-ب آورده شده است. تنها تفاوتی جزئی در محل تشکیل مفصل در ستون طبقه چهارم مشاهده شد که در سازه ی مدل شده در ایتبز، این دو مفصل در تیر طبقه ی پنجم تشکیل شده بود. این خطای جزئی در نحوه ی نشان دادن مفاصل در برخی گره ها در سازه های قاب خمشی نیز به خصوص با

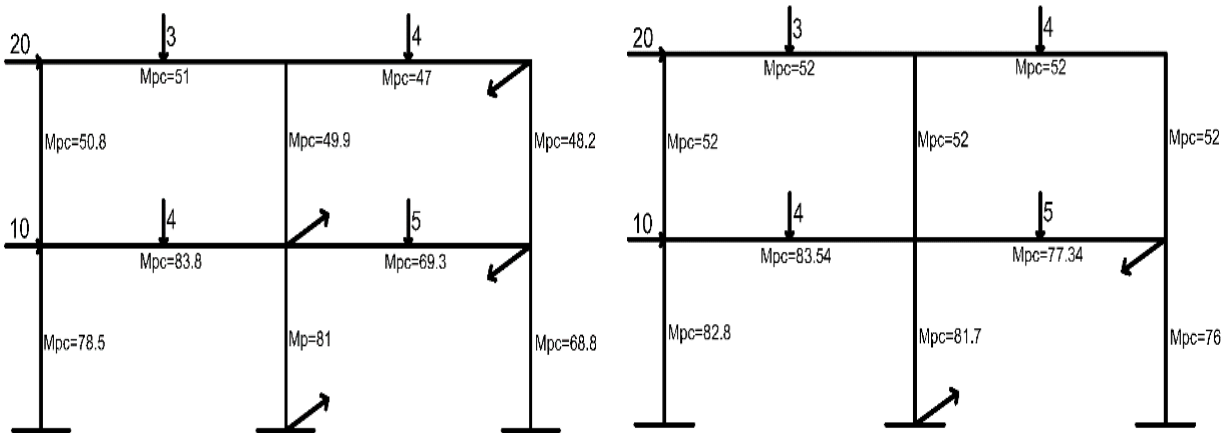
سازه بیانگر مکانیزم فروریزش سازه ی اصلی خواهد بود. این ۴ سازه در واقع بیانگر حالات زیر هستند (شکل ۱۴):

- قاب بدون جاری شدن هیچکدام از مهاربندها
 - قاب تنها با جاری شدن مهاربند طبقه ی دوم
 - قاب تنها با جاری شدن مهاربند طبقه ی اول
 - قاب با جاری شدن هر دو مهاربند طبقه ی اول و دوم
- اعضای هر کدام از قاب های فوق با توجه به وجود و یا عدم وجود مهاربندها و با توجه به نیروی محوری ایجاد شده در آن ها می توانند ظرفیت پلاستیک متفاوتی داشته باشند. در این مرحله نیز کد نوشته شده، قادر است برای هر کدام از قاب های فوق مکانیزم های فروریزش اولیه را مطابق بخش ۲-۲ محاسبه نموده و آن ها را با کمک الگوریتم ژنتیک مطابق بخش ۲-۴ با هدف حداقل کردن ضریب بار ترکیب نماید و در نهایت مکانیزم فروریزش بحرانی را به دست دهد. الگوریتم ژنتیک پس از ۶ تکرار به ضریب بار حداقل $4/56$ همگرا شد که نمودار همگرایی آن در شکل ۱۵ آورده شده است. در این نمودار محور X تعداد تکرار و محور Y ضریب بار بحرانی (حداقل) را در هر تکرار با بررسی سازه های به دست آمده جهت تحلیل پلاستیک، نشان می دهد. مکانیزم متناظر با این ضریب بار حداقل بیانگر مکانیزم فروریزش بحرانی سازه است که در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این



ب: قاب با مکانیزم مهاربند طبقه دوم

الف: قاب بدون مکانیزم مهاربندی

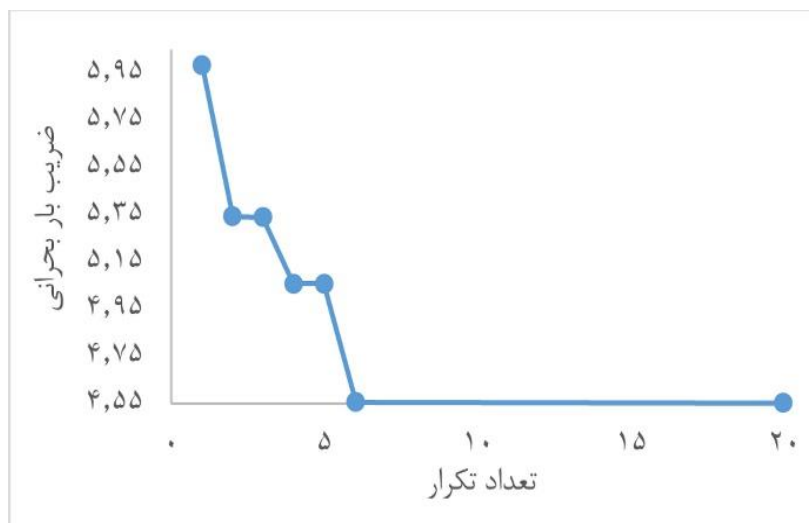


د: قاب با مکانیزم مهاربند طبقه اول و دوم

ج: قاب با مکانیزم مهاربند طبقه اول

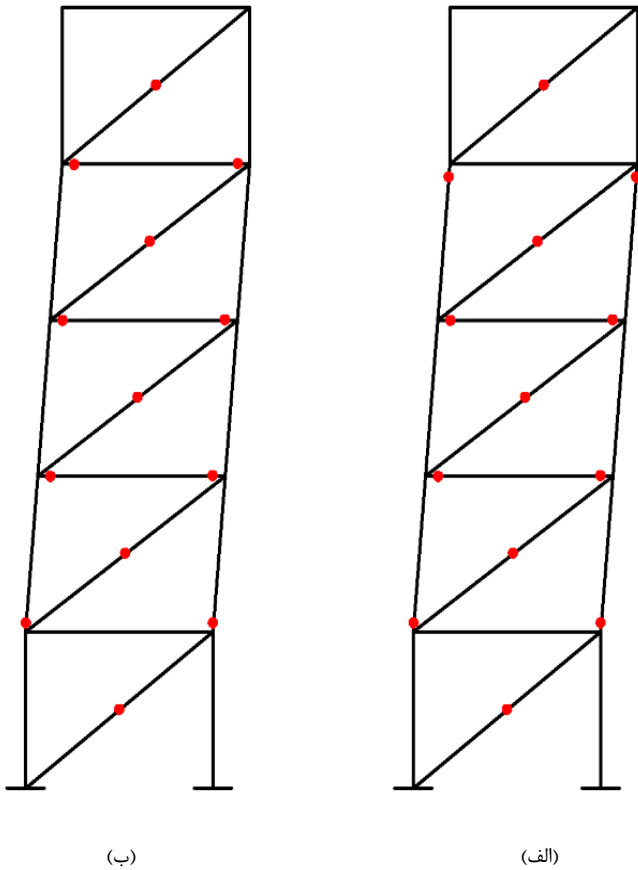
شکل ۱۴. قاب های مورد مطالعه در نمونه دوم

Fig. 14. Examined frames in second example



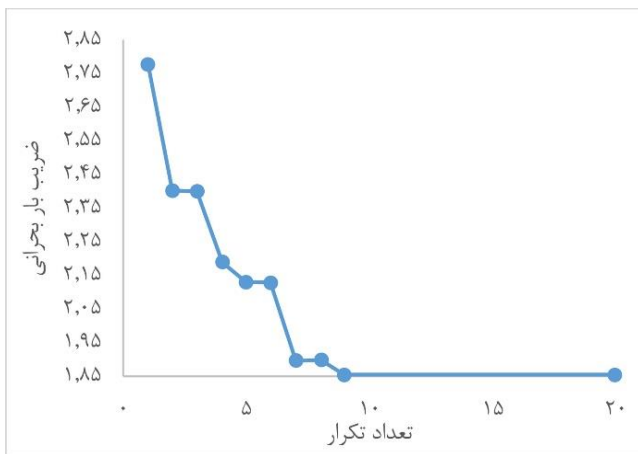
شکل ۱۵. نمودار همگرایی نمونه دوم در الگوریتم ژنتیک

Fig. 15. Convergence diagram of second example in the Genetic algorithm



شکل ۱۸ الف) مکانیزم خرابی کد نوشته شده ب) مکانیزم خرابی تحلیل پوش اور در ایتبز ۲۰۱۵

Fig. 18. Collapse mechanism a) from the code, b) from the pushover analysis

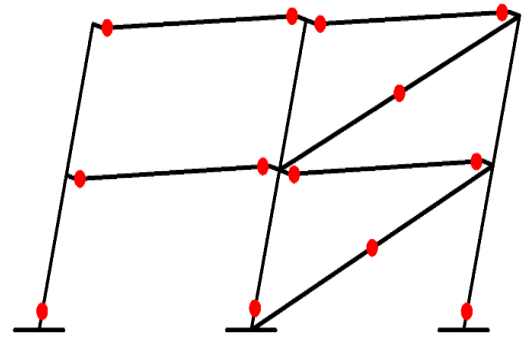


شکل ۱۹. نمودار همگرایی نمونه سوم در الگوریتم ژنتیک

Fig. 19. Convergence diagram of third example in the Genetic algorithm

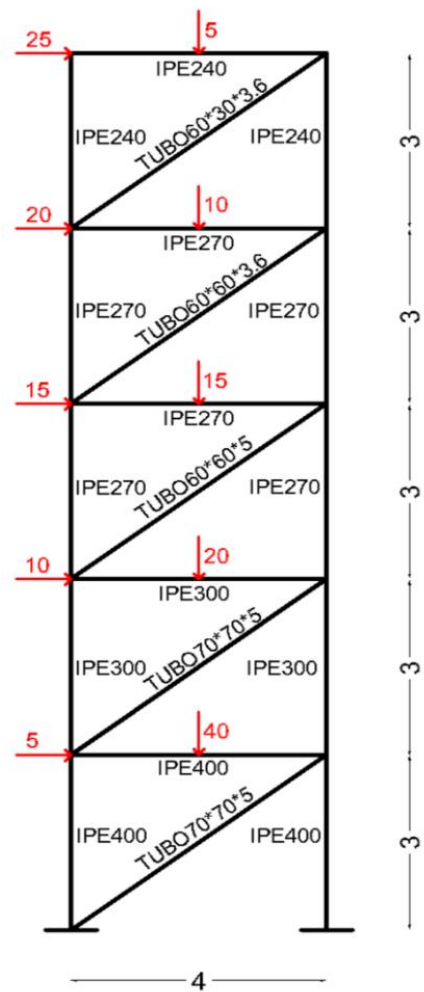
۴- نتیجه گیری

در این تحقیق روند جدیدی برای ارزیابی مودهای خرابی



شکل ۱۶. مکانیزم فروریزش قاب نمونه دوم

Fig. 16. Collapse mechanism of example two



شکل ۱۷. نمونه سوم

Fig. 17. Frame of example three

افزایش تعداد طبقات سازه قابل مشاهده بود. الگوریتم ژنتیک پس از ۹ تکرار به ضریب بار حداقل ۱/۸۵ همگرا شد که نمودار همگرایی آن در شکل ۱۹ آورده شده است.

- 146(1) (2020) 04019168.
- [2] S. Palizi, A.S. Daryan, Critical Temperature Evaluation of Moment Frames by Means of Plastic Analysis Theory and Genetic Algorithm, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, (2021) 1-14.
- [3] S. Rajeev, C. Krishnamoorthy, Discrete optimization of structures using genetic algorithms, Journal of structural engineering, 118(5) (1992) 1233-1250.
- [4] Y. Kohama, T. Takada, N. Kozawa, A. Miyamura, Collapse analysis of rigid frame by genetic algorithm, WIT Transactions on The Built Environment, 31 (1970).
- [5] A. Kaveh, K. Khanlari, Collapse load factor for rigid-plastic analysis of frames using a genetic algorithm, in: 7th International Conference on the Application of Artificial Intelligence to Civil and Structural Engineering, AICivil-Comp, 2003, pp. 2003.
- [6] A. Kaveh, K. Khanlari, Collapse load factor of planar frames using a modified genetic algorithm, Communications in numerical methods in engineering, 20(12) (2004) 911-925.
- [7] A. Kaveh, M. Jahanshahi, Plastic analysis of planar frames using kinematic method and genetic algorithm (2004).
- [8] B. Topping, G. Montero, R. Montenegro, Plastic Design of Frames Using Heuristic Algorithms (2006).
- [9] A. Kaveh, M. Jahanshahi, Plastic limit analysis of frames using ant colony systems, Computers & Structures, 86(11-12) (2008) 1152-1163.
- [10] A. Kaveh, M. Jahanshahi, Z.M. KHAN, Plastic analysis of frames using genetic and ant colony algorithms (2008).
- [11] M. Jahanshahi, M. Pouraghajan, Enhanced ACS algorithms for plastic analysis of planar frames, Computational Methods in Civil Engineering, 4(1) (2013) 65-82.
- [12] A. Kaveh, M. Ilchi Ghazaan, Computer codes for colliding bodies optimization and its enhanced version, Iran University of Science & Technology, 4(3) (2014) 321-339.
- [13] Kaveh, M. Ghafari, Plastic analysis of planar frames using CBO and ECBO algorithms, Iran University of Science &

قاب های صفحه ای دارای مهاربند ارائه شده است. این روش بر اساس حذف مهاربند و اعمال اثر حذف آن بر قاب و با تولید مکانیزم های پایه و ترکیب آن ها با یکدیگر برای نخستین بار برای قاب های دارای مهاربند ارائه شده است. کد نوشته شده برای این رویکرد، قادر است که به صورت خودکار مکانیزم فروریزش بحرانی را با استفاده از ابزار های بهینه یابی با دقت بسیار مناسب محاسبه کند. کارایی این روش با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش آور استاندارد مقایسه شد و مکانیزم فروریزش آن تطابق قابل قبولی با نتایج کد نوشته شده داشت. در عین حال تلاش محاسباتی، دقت و سرعت روند ابداعی، میزان همگرایی و ترکیب آن با الگوریتم ژنتیک بسیار بالا رضایت بخش است.

مثال دوم در بعد از شش تکرار به ضریب بار ۴٫۵۶ همگرا شد. این در حالی است که تعداد قاب هایی که در این مثال با توجه به وجود دو مهاربند مورد بررسی قرار گرفتند، چهار قاب بود. در مثال سوم تعداد قاب ها با افزایش تعداد مهاربندها به پنج، افزایش یافت و تعداد ۲۸ قاب برای تحلیل پلاستیک آماده شدند که پس از نه تکرار به ضریب بار فروریزش بحرانی ۱٫۸۵ همگرا شد. در مثال اول و دوم، مود فروریزش به دست آمده از تحلیل پوش آور عینا همان مود تحلیل پلاستیک بود. لکن با افزایش تعداد قاب ها در مثال سوم تنها در دو نقطه از تشکیل مفاصل تفاوت بین تحلیل پوش آور و تحلیل پلاستیک مشاهده شد که البته این موضوع در قاب های خمشی نیز به دلیل تفاوت هایی که در دو تحلیل وجود دارد مشاهده شده بود و به نوعی قابل صرف نظر کردن است.

اگرچه در این تحقیق روش فوق فقط برای مقاطع I شکل توسعه داده شده است ولیکن این روش برای هر قاب دلخواهی با هر نوعی از مقاطع و بارگذاری قابل توسعه می باشد. تنها تفاوت در نحوه ی اعمال لنگر پلاستیک کاهش یافته است که بالتبع برای هر مقطع خاص می توان رابطه ی مورد نظر را یافت و از آن به جای رابطه ی ۱ استفاده نمود.

مراجع

- [1] A. Saedi Daryan, S. Palizi, New plastic analysis procedure for collapse prediction of braced frames by means of genetic algorithm, Journal of Structural Engineering,

- [18] M.B. Wong, Plastic analysis and design of steel structures, Butterworth-Heinemann, 2011.
- [19] B.G. Neal, P.S. Symonds, THE RAPID CALCULATION OF THE PLASTIC COLLAPSE LOAD FOR A FRAMED STRUCTURE, Proceedings of the institution of civil engineers, 1(2) (1952) 58-71.
- [20] B. Neal, P. Symonds, THE CALCULATION OF COLLAPSE LOADS FOR FRAMED STRUCTURES. (INCLUDES APPENDIX), Journal of the Institution of Civil Engineers, 35(1) (1950) 21-40.
- [21] V.B. Watwood, Mechanism generation for limit analysis of frames, Journal of the Structural Division, 105(1) (1979) 1-15.
- [22] G. Strang, Linear Algebra and Its Applications, (1988), Hartcourt Brace Jovanovich College Publishers (1988).
- Technology, 5(4) (2015) 479-492.
- [14] M. Jahanshahi, E. Maleki, A. Ghiami, On the efficiency of artificial neural networks for plastic analysis of planar frames in comparison with genetic algorithms and ant colony systems, Neural Computing and Applications, 28(11) (2017) 3209-3227.
- [15] A. Greco, F. Cannizzaro, A. Pluchino, Seismic collapse prediction of frame structures by means of genetic algorithms, Engineering Structures, 143 (2017) 152-168.
- [16] A.S. Daryan, S. Palizi, N. Farhoudi, Optimization of plastic analysis of moment frames using modified dolphin echolocation algorithm, Advances in Structural Engineering, 22(11) (2019) 2504-2516.
- [17] W.-F. Chen, I. Sohal, Plastic design and second-order analysis of steel frames, Springer, 2013.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Saedi Daryan, S. Palizi, Developing the plastic analysis theory for braced frames and its optimization using genetic algorithm to predict the collapse of steel braced frames, Amirkabir J. Civil Eng., 53(2) (2021) 421-438.

DOI: [10.22060/cej.2018.15001.5819](https://doi.org/10.22060/cej.2018.15001.5819)



