



The Effect of Fire on the Behavior of Perforated Short Steel Compression Members and Evaluation after Retrofitting

H. Makhdoumi Darmian¹, R. Rahgozar^{2*}, M. Mohammadizadeh¹, A. Saedi Daryan³, K. Narmashiri⁴

¹Department of Civil Engineering, Sirjan Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran.

²Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.

³Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

⁴Department of Civil Engineering, Zahedan Branch, Islamic Azad University, Zahedan, Iran.

Review History:

Received: Apr. 25, 2021

Revised: Nov. 14, 2021

Accepted: Nov. 19, 2021

Available Online: Dec. 09, 2021

Keywords:

Steel compression members

Perforation

Fire

Bearing Capacity

Retrofit

ABSTRACT: Steel is one of the most widely used materials in structures due to its high strength and speed of execution. One of the most important disadvantages of steel is corrosion damage and low fire resistance. When the temperature of the steel exceeds a certain value, its strength decreases to a great extent; therefore, in this paper, the performance of steel specimens with corrosion and at different temperatures has been investigated. Thus, the corrosion weakness is considered as perforation and specimens with different positions of the perforation in 6 states and the application of heat in 5 different states 20, 100, 250, 500, and 700 are examined and the load-displacement diagrams of each column under axial loading are presented. Then, in order to improve the behavior of the damaged specimens by the two mentioned factors, the perforation location has been reinforced and reinforced using a steel sheet and axial loading was done in two-temperature states of 20 and 700 °C. The results show that: with increasing temperature, the bearing capacity of specimens has decreased and this reduction has reached up to about 15% for control specimens and up to about 35% for perforated specimens, according to the type of perforation. Also, in steel members retrofitted with steel sheets, the bearing capacity has increased by about 5 to 15 percent (depending on the perforation).

1- Introduction

Steel structures are one of the most popular structures designed and constructed these days. Steel structures are extensively used worldwide due to their advantages, such as more construction speed and interior spaces than concrete structures [1]. Due to the weakness of structures in natural or fabricated disasters such as wind, earthquake, and fire, the need for rehabilitation and repair of structural members to achieve their initial performance is inevitable. One of the most critical weaknesses of structures, especially steel structures, is weakness in high temperatures and fire events [2].

Various experimental studies have been carried out on the behavior of steel columns at high temperatures. In 2010, Correia et al. [3] investigated the behavior of steel columns in fire. In this parametric study, steel columns under different loads, sections, and slender ratios were investigated, and the effect of these parameters on column performance under fire conditions was presented. In 2014, Byström et al. [4] investigated the temperature rise of a hollow circular column under local heat and compared the results with Eurocode 1991-1-2. In 2016, Fan et al. [5] directed an experimental study on the fire resistance of steel columns with square hollow section (SHS). In 2018, Fan et al. [6], in a study

similar to the one in 2016, tested the fire resistance of stainless steel columns with square hollow section (SHS), this time using constraints. The results showed that the bearing capacity of compressed steel columns with axial restraint and eccentricity under fire conditions went through two stages: pre-buckling and post-buckling. According to the studies concerning the performance of steel compression members at high temperatures, some limitations exist, including the post-fire performance of steel compression members, their reloading capability after the fire, retrofitting methods, perforations influence on the performance, the cross-section shape, etc. Consequently, in this research, perforated short steel compression members are studied by considering various perforations in the column in post-fire conditions. For this purpose, control steel compression members, perforated steel compression members with six different perforations are designed and manufactured. Then, the specimens are exposed to five temperature levels between 20 to 700 °C. After the cooling phase, the compressive test is implemented on them. Finally, the effect of factors such as the type of perforations, temperature level, and the retrofitting method on the performance of steel compression member is evaluated and compared.

*Corresponding author's email: rahgozar@uk.ac.ir





Fig. 1. Retrofitting of column specimens by steel plate

2- Experimental setup

In this research, steel compression members with dimensions of $32 \times 10 \times 10 \times 0.3$ cm (height of 32, cross-section dimensions of 10×10 , and thickness of 3 mm) are evaluated. 47 specimens with six different types of perforations besides control specimens and retrofitted specimens are exposed to temperatures of 20, 100, 250, 500, and 700 °C. In order to retrofit the perforated steel specimens, steel plates with the same specifications of the steel materials with a thickness of 3 mm and dimensions of 1 cm larger than the dimensions of perforation are used. The mentioned plates are welded on the perforations (Figure 1).

Also, in this experiment, an electric furnace with manual power adjustment was utilized to heat the specimens. Two thermocouples of type k on the specimen and the furnace recorded the specimen and the furnace temperatures, respectively. Specimens were heated from ambient temperature to the target temperature at a rate of 10 °C per

minute. Five target temperatures of 20, 100, 250, 500, and 700 °C were selected. As soon as the specimen was heated to the target temperature, the temperature was kept constant for 60 minutes to create stable heat conditions in specimens and ensure a uniform temperature distribution. The furnace was then switched off, and the cooling phase of the specimens began. The specimen temperature was naturally reduced at the rate of 10 to 20 °C per minute to reach room temperature. After completing this step, tensile strength tests were performed on the specimens at ambient temperature.

3- Results and Discussion

In the compression test of the specimens, the maximum value of the load (critical load) and the corresponding axial displacement are determined. In order to analyze the axial bearing capacity and ductility of the specimens, the axial force-displacement diagram of the specimens is employed. Table 1 presents the results in the form of force-displacement diagrams for control specimens and specimens with different types of perforations.

According to the results, the bearing capacity of all specimens is reduced by exposure to high temperatures. This reduction is 15% for control specimens at 700 °C and 35% for perforated specimens (specimen with vertical perforation at the bottom). In perforated specimens, weakness and perforation have reduced the bearing capacity and vertical loads bearing capability due to the reduction of cross-sectional area at the perforation location. In this regard, the lowest bearing capacity of specimens with a horizontal perforation is related to the perforation located at the middle of the column at 20 °C (28% decrease compared to the control specimen at 20 °C). Also, the lowest bearing capacity of column specimens with vertical perforations is related to the specimen with perforations at the bottom of the specimens and 700 °C temperature (32% decrease compared to the control specimen at 700 °C).

As described, perforated specimens are retrofitted with steel plates at the perforation location and then placed under

Table 1. Summary of the results at different temperatures

Specimen Description	Maximum vertical load P_{max} (kN)				
	20 °C	100 °C	250 °C	500 °C	700 °C
Control specimen	451.64	434.19	428.96	408.12	384.49
DHT	377.34	374.69	366.25	359.20	350.97
DHM	324.02	315.20	310.25	305.33	301.58
DHB	353.67	339.43	315.19	305.55	295.15
DVT	409.64	400.02	394.72	389.87	322.03
DVM	393.302	388.89	376.70	355.01	341.60
DVB	405.93	370.51	370.51	303.98	261.58

Table 2. The results of non-retrofitted and retrofitted specimens with plates

Sample description	Maximum Vertical Load, P_{max} , for samples at 20 degrees (kN)		Sample description	Maximum Vertical Load, P_{max} , for samples at 700 degrees (kN)	
	Non-retrofitted	Retrofitted with steel plates		Non-retrofitted	Retrofitted with steel plates
DHT	377.34	405.64	DHT	350.97	360.30
DHM	324.02	343.42	DHM	301.58	317.86
DHB	353.67	389.53	DHB	295.15	313.06
DVT	409.64	415.85	DVT	322.03	340.75
DVM	393.302	409.20	DVM	341.60	353.23
DVB	405.93	419.87	DVB	261.58	295.65

loading. Table 2 explicates the complete results of retrofitted and non-retrofitted specimens at 20 and 700 °C for perforated specimens (to cover perforations, improve performance and increase load-bearing capacity).

4- Conclusions

In this paper, the effect of fire and perforations on the capacity of steel compression members was investigated. For this purpose, 35 specimens, including control specimens and specimens with perforations (six types), were made and exposed to five temperature levels of 20, 100, 250, 500, and 700 °C. Then, the compressive test was performed on the specimens, and load-displacement diagrams were determined. The results indicated that weakness and perforation reduced the strength of the steel compression members. The highest reduction in load capacity of specimen at ambient temperature (20 °C) was related to the specimen with a horizontal middle perforation (28% reduction), while in specimens at the temperature of 700 °C was related to the specimen with bottom vertical perforation (32% reduction). Also, high temperature reduced the strength of steel compression members. A 15% decrease in bearing capacity of the control or control specimen was observed with the temperature increase up to 700 °C, and the maximum reduction in strength of the specimen occurred in specimens with vertical perforations (35% reduction). Finally, by retrofitting the perforated specimens, the post-fire bearing capacity was improved. Depending on the type of perforation, this performance improvement increased the bearing capacity up to 10% at room temperature and up to 13% at 700 °C using steel plates.

References

- [1] A. Saedi Daryan, H. Ketabdari, Mechanical properties of steel bolts with different diameters after exposure to high temperatures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10) (2019) 04019221.
- [2] H. Ketabdari, A.S. Daryan, N. Hassani, Predicting post-fire mechanical properties of grade 8.8 and 10.9 steel bolts, *Journal of Constructional Steel Research*, 162 (2019) 105735.
- [3] A. Correia, T. Pires, J. Rodrigues, Behaviour of steel columns subjected to fire, in: *Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*, 2010, pp. 879-890.
- [4] A. Byström, J. Sjöström, U. Wickström, D. Lange, M. Veljkovic, Large scale test on a steel column exposed to localized fire, *Journal of structural fire engineering*, (2014).
- [5] S. Fan, X. Ding, W. Sun, L. Zhang, M. Liu, Experimental investigation on fire resistance of stainless steel columns with square hollow section, *Thin-Walled Structures*, 98 (2016) 196-211.
- [6] S. Fan, M. Liu, W. Sun, Y. Guo, Y.L. Han, Experimental investigation of eccentrically compressed stainless steel columns with constraints in fire, *Fire Safety Journal*, 99 (2018) 49-62.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Makhdoui Darmian, R. Rahgozar, M. Mohammadizadeh, A. Saedi Daryan, K. Narmashiri, *The Effect of Fire on the Behavior of Perforated Short Steel Compression Members and Evaluation after Retrofitting*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(6) (2022) 485-488.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19938.7289](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19938.7289)





تأثیر آتش در رفتار اعضاء فشاری فولادی کوتاه معیوب و ارزیابی آن‌ها پس از مقاوم‌سازی

حامد مخدومی درمیان^۱، رضا رهگذر^{۲*}، محسن محمدی زاده^۳، امیر ساعدی داریان^۳، کامبیز نرماشیری^۴

۱- دانشکده فنی و مهندسی، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

۳- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴- دانشکده فنی و مهندسی، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۱۸

کلمات کلیدی:

عضو فشاری فولادی

سوراخ، آتش

ظرفیت باربری

مقاوم‌سازی

خلاصه: فولاد به دلیل استحکام بالا و سرعت در اجرا یکی از پرمصرف‌ترین مصالح در سازه‌ها می‌باشد. از مهم‌ترین معایب و ضعف‌های فولاد، آسیب ناشی از خوردگی و مقاومت کم در آتش‌سوزی‌ها می‌باشد. وقتی دمای فولاد از حدی بالاتر برود، مقاومت آن به طور چشمگیری کاهش می‌یابد؛ بنابراین، در این مقاله به بررسی عملکرد اعضاء فولادی فشاری قوطی شکل دارای حفره و در ماهای مختلف پرداخته شده است. بدین ترتیب که عیب نمونه‌ها به صورت حفره و سوراخ در نظر گرفته شده و اعضاء فشاری با جانمایی‌های مختلف سوراخ در ۶ حالت و اعمال حرارت در ۵ حالت مختلف ۲۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ مورد بررسی قرار گرفته و نمودارهای بار-جابجایی هر یک از نمونه‌ها تحت بارگذاری محوری ارائه شده است. در ادامه جهت بهبود رفتار این اعضاء آسیب دیده از دو عامل مذکور، محل سوراخ با استفاده از ورق فولادی تقویت و مقاوم‌سازی شده و در دو حالت دمایی ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بارگذاری محوری شده است. نتایج نشان می‌دهد که: با افزایش دما ظرفیت باربری اعضاء تقویت نشده، کاهش یافته و این میزان کاهش برای نمونه‌های بدون سوراخ تا حدود ۱۵ درصد و برای نمونه‌های دارای سوراخ بسته به نوع سوراخ تا حدود ۳۵ درصد رسیده است. همچنین در ستون‌های فولادی تقویت شده به وسیله ورق‌های فولادی، ظرفیت باربری در حدود ۵ الی ۱۵ درصد (بسته به نوع سوراخ) افزایش داشته است.

۱- مقدمه

استفاده از فولاد به عنوان مصالح ساختمانی از اوایل قرن ۲۰ آغاز شد و در حین جنگ دوم جهانی به صورت قابل توجهی گسترش یافت. پس از جنگ دوم جهانی تهیه فولاد امری به مراتب راحت‌تر از قبل شده بود که این امر سبب کاهش قیمت فولاد به صورت چشمگیری شد و این مسئله باعث شد بسیاری از طراحان از اسکلت فلزی برای ساخت ساختمان‌ها استفاده نمایند [۱]. سازه‌های فولادی علیرغم مزایایی از جمله سرعت ساخت، حجم بیشتر فضاهای داخلی نسبت به سازه‌های بتنی، در برابر حرارت و خوردگی آسیب‌پذیر می‌باشند [۲]؛ که لازم است پس از آسیب‌های ناشی از بلایای طبیعی و غیرطبیعی مثل باد، زلزله و آتش‌سوزی، بهسازی و ترمیم شده تا مجدداً به عملکرد اولیه برسد. فولاد به طور طبیعی با قرار گرفتن در معرض حرارت‌های بالا، مقاومت خود را از دست می‌دهد [۳]. نقص به دلیل خطاهای طراحی و یا عواملی نظیر افزایش بار، تغییر کاربری سازه، خطاهای اجرایی، تغییر آیین‌نامه‌ها و خوردگی ناشی از عوامل محیطی در سازه‌های فولادی

رخ می‌دهد. تحقیقات نشان داده است که نقص سبب کاهش ظرفیت باربری ستون‌های فولادی حتی تا حدود ۴۶ درصد ظرفیت باربری اولیه آن‌ها می‌شود [۴]. حرارت بالا و آتش نیز موجب وقوع آسیب‌های جدی به ساختمان می‌شود. تأثیرات حرارت زیاد به خصوص بر روی سازه فولادی از آن جهت خطرناک است که فولاد ساختمانی در اثر افزایش دما مقاومت و سختی خود را به تدریج از دست می‌دهد. روش‌های مختلفی برای حفظ مقاومت و پایداری سازه‌های فولادی در برابر حرارت وجود دارد؛ اما دانش بسیار کمی درباره رفتار حقیقی اعضاء فولادی با وضعیت تکیه‌گاهی و الگوهای حرارتی مختلف حاصل شده است. عدم فهم درست از رفتار واقعی سازه در حرارت و آتش منجر به یک طراحی غیراقتصادی و ناکارا می‌شود. در این بین یکی از مهم‌ترین اعضاء سازه‌های فولادی مقاومت ستون‌های فولادی در برابر آتش است. ستون‌ها از جمله اعضاء قائم باربر اصلی در سازه‌های فولادی هستند که بر اساس بارهای فشاری طراحی می‌شوند و در اثر عواملی همچون آتش‌سوزی مقاومتشان کاهش می‌یابد.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rahgozar@uk.ac.ir



در خصوص رفتار ستون‌های فولادی در حرارت بالا تحقیقاتی آزمایشگاهی مختلفی انجام شده است. در سال ۱۹۹۴، مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی توسط ساکومتو [۵] مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ستون‌های فولادی کمانش مجاز بار اعمال شده را حداکثر به مدت ۳ ساعت و تا رسیدن به دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد حفظ می‌کند، همچنین محافظت بهینه ستون‌ها در برابر آتش به مدت ۱ ساعت، ۲ ساعت و ۳ ساعت نیز به وسیله ضخامت پشم سنگ و پوشش‌های نفوذی تأمین گردید. در سال ۲۰۰۵ میلادی، یانگ و همکاران [۶] آزمایش‌هایی را بر روی مقاومت آتش ستون‌های کوتاه جعبه‌ای و I شکل در تایوان با هدف بررسی رفتار ستون‌ها تحت بار انجام دادند. کاهش مقاومت ستون‌های فولادی در دماهای مختلف و اثر نسبت عرض به ضخامت مقاطع بر روی مقاومت نهایی ستون‌ها در دمای بالا مورد ارزیابی واقع شد. بر مبنای این تحقیقات نتیجه‌گیری شد که بار نهایی ستون‌ها با افزایش نسبت‌های عرض به ضخامت و حرارت کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۰۹، ونگ و همکاران [۷] به بررسی رفتار ستون‌های فولادی محافظت شده در برابر آتش که بخشی از این محافظت آسیب دیده بود پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که طول آسیب پوشش ضد حریق، مقاومت زیادی در برابر حفاظت ستون‌های فولادی داشت و خرابی نمونه‌ها عمدتاً به دلیل کمانش و یا تسلیم قسمتی بود که پوشش ضد حریق آسیب دیده بود. در سال ۲۰۱۰، کوریا و همکاران [۸] به بررسی پارامتریک، ستون‌های فولادی تحت بارگذاری، مقاطع و نسبت‌های لاغری مختلف پرداختند و تأثیر هر یک از این پارامترها بر روی عملکرد ستون تحت شرایط آتش را ارائه نمودند. اثرات مهار محوری نیز به دمای گسیختگی به نسبت بار و نسبت سختی مهار محوری بستگی داشت. در سال ۲۰۱۴، بیستروم و همکاران [۹] به بررسی نحوه افزایش دمای ستون دایره‌ای توخالی فولادی تحت افزایش حرارتی محلی پرداختند و نتایج آن را با Eurocode ۱۹۹۱-۱-۲ مورد مقایسه قرار دادند. در سال ۲۰۱۶، فن و همکاران [۱۰] مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی توخالی با مقطع مربع شکل (قوطی شکل) را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. در این آزمایش که از مقاطع قوطی شکل با فولاد S30408 استفاده شده بود، تأثیر پارامترهای مختلف مانند نسبت بار n ، خروج از مرکزیت و ابعاد مقطع بر عملکرد مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولاد مورد بررسی قرار گرفته بود. نتایج این تحقیق نشان دادند که نسبت بار و خروج از مرکزیت پارامترهای کلیدی را در تعیین دمای بحرانی و نحوه عملکرد مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی بدون مهار محوری می‌باشند. در سال ۲۰۱۸، فن

و همکاران [۱۱] طی تحقیقی همانند تحقیق سال ۲۰۱۶، مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی توخالی با مقطع مربع شکل (قوطی شکل) را این بار با در نظر گرفتن قید مورد آزمایش قرار دادند. نتایج این آزمایش‌ها نشان دادند که روند ظرفیت باربری ستون‌های فولادی فشرده دارای مهار محوری و خروج از مرکزیت در شرایط آتش‌سوزی دو مرحله را طی می‌کند: مرحله پیش کمانش و مرحله پس کمانش. برای گسترش نمونه از حالت کمانش به حالت گسیختگی نهایی مدت زمانی سپری می‌شود و ظرفیت باربری مرحله پس کمانش می‌تواند به طور مؤثر عملکرد مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی مقید را بهبود بخشد. در سال ۲۰۲۱، ژینگ و همکاران [۱۲] به بررسی آزمایشگاهی ستون‌های I شکل در شرایط آتش‌سوزی پرداختند. در این تحقیق ۸ ستون با اعمال بار محوری با نسبت‌های مختلف ظرفیت ستون به ستون و افزایش دما، عملکرد این ستون‌ها مورد ارزیابی قرار داده بودند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل Kucukler نسبت به مبنای طراحی حریق ستون‌ها در برابر آتش در EN 1993-1-2 قابلیت اطمینان بیشتری دارد.

از طرفی دیگر، روش‌های مختلفی برای تقویت ستون‌های فولادی دارای نقص از جمله کاربرد صفحات فولادی و کامپوزیت‌های FRP وجود دارد؛ کریمیان و همکاران در سال ۲۰۱۷ رفتار سازه‌ای و تأثیر CFRP بر تقویت ستون‌های کوتاه فولادی مقطع دایره‌ای توخالی (CHS) با نقص افقی و عمودی را بررسی کردند [۱۳] در سال ۲۰۱۸ شهرکی و همکاران [۱۴] اثرات CFRP و همچنین صفحات فولادی را برای مقاوم‌سازی ستون‌های SHS دارای نقص را مورد مطالعه قرار دادند. در این مقاله، ظرفیت بار محوری، مودهای خرابی، تأثیر لاغری و رفتار ستون‌های فولادی مذکور بر اساس یک مطالعه پارامتری دقیق مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که CFRP در بهبود ظرفیت نیروی محوری بهتر از صفحات فولادی تقویتی عمل کرده است. در تحقیقی دیگر نیز (سال ۲۰۱۹) شهرکی و همکاران [۱۵] اثرات CFRP برای تقویت ستون‌های فولادی دارای نقص با مقطع مربعی توخالی (SHS) تحت بارهای فشاری محوری را بررسی کردند. آن‌ها در این تحقیق، بدین منظور ۱۰ نمونه ستون را در آزمایشگاه و به صورت نرم‌افزاری مورد مطالعه قرار دادند؛ نتایج نشان داد CFRP نه تنها در کاهش تنش‌ها در محل نقص، جلوگیری یا به تأخیر انداختن کمانش موضعی تأثیر دارد، بلکه سبب افزایش ظرفیت باربری و بهبود رفتار ستون‌ها نیز می‌گردد. در سال ۲۰۲۰ شعبانی و همکاران [۱۶] تأثیر موقعیت نقص‌های قائم در رفتار ستون‌های فولادی SHS و همچنین

نتایج نشان داد که پس از تقویت ورق‌های CFRP ستون‌های فولادی دایره‌ای (CST)) افزایش باربری بیشتری نسبت به ستون‌های مربعی فولادی (SST) به دست آوردند. در سال ۲۰۲۰ بنگر و همکاران نقش دور پیچ CFRP در رفتار چسبندگی میلگردهای فولادی بتن مسلح در معرض حرارت بالا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که استفاده از CFRP نه تنها مقاومت چسبندگی آرماتورها به بتن را که در معرض حرارت بالا قرار می‌گیرد را افزایش می‌دهد، بلکه همچنین مد گسیختگی از گسیختگی ترد به گسیختگی نرم تغییر پیدا می‌کند [۲۲].

هیچ‌کدام از این مطالعات، تأثیر هم‌زمان نقص و حرارت بر روی اعضاء فولادی و متعاقباً جبران این ضعف‌ها و کاهش مقاومت صورت گرفته را با روش‌های مقاوم‌سازی مورد مطالعه قرار نداده‌اند. همچنین تحقیقات انجام شده در زمینه عملکرد ستون‌های فولادی در دماهای بالا دارای محدودیت‌هایی نظیر عملکرد پس از آتش ستون‌ها، قابلیت بارگذاری مجدد بر روی آن‌ها پس از آتش، راهکارهای مقاوم‌سازی، ایجاد نقص در عملکرد ستون‌ها، نوع مقطع ستون‌ها و ... می‌باشند؛ بنابراین در این تحقیق به بررسی اعضاء فشاری فولادی قوطی شکل و مقاوم‌سازی آن‌ها با در نظر گرفتن نقص‌های مختلف به صورت سوراخ در شرایط پس از حرارت پرداخته می‌شود. بدین منظور اعضاء فشاری بدون نقص و دارای ۶ حالت سوراخ مختلف به همراه نمونه‌های مقاوم‌سازی شده توسط ورق‌های فولادی (در مجموع ۴۷ ستون) طراحی و ساخته می‌شوند. در ادامه اعضاء فولادی در ۵ تراز دمایی بین ۲۰ الی ۷۰۰ درجه قرار گرفته و پس از سرد شدن تست فشاری بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد. در نهایت نیز تأثیر مواردی همچون جانمایی و نوع سوراخ، تراز دمایی و نحوه مقاوم‌سازی در عملکرد ستون‌های فولادی مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرند.

۲- مشخصات مصالح و نمونه‌های مورد بررسی

۲-۱- مشخصات فولاد

با استفاده از آزمایش آزمون کششی ورق فولادی، مشخصات فولاد مورد استفاده در اعضاء فشاری و ورق‌های تقویتی به دست آمده است. شکل نمونه‌های فولادی آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. جهت صحت سنجی و حصول اطمینان نتایج، از سه نمونه جهت آزمون کششی فولاد، مطابق شکل ۱ استفاده شد؛ شکل ۲ نمونه‌ها را در زمان آزمایش کششی نشان می‌دهد و در شکل ۳ نیز منحنی تنش-کرنش به دست آمده از تست کشش ارائه می‌شود.

تقویت ستون‌های مذکور با الیاف CFRP را مورد بررسی قرار دادند، نتایج تحقیق آن‌ها دال بر این بود که نقص (بالاًخص نقص قائم پایین ستون- در میانه مقطع عرضی) سبب کاهش محسوس در ظرفیت باربری ستون‌ها، همچنین کماتش محلی و پارگی جانبی محل نقص می‌شود؛ که با استفاده از دور پیچ FRP، این موارد تا حد زیادی بهبود پیدا می‌کنند. در سال ۲۰۲۱ یوسفی و همکاران ستون‌های فولادی دایره‌ای توخالی (CHS) دارای خوردگی که با FRP تقویت شدند را مورد بررسی قرار دادند، نتایج حاکی از افزایش ظرفیت باربری و انعطاف‌پذیری نمونه‌های تقویت شده و همچنین تأخیر در کماتش موضع خورده شده، کنترل گسیختگی و کاهش تنش در محل خوردگی بود [۱۷].

در خصوص تأثیر حرارت و متعاقباً مقاوم‌سازی اعضاء فولادی و بتنی مطالعات محدودی در دسترس می‌باشد؛ تائو و هان در سال ۲۰۰۷ [۱۸] به ترمیم تیر ستون‌های فولادی دارای هسته بتنی که در معرض آتش بودند، با استفاده از دور پیچ‌های CFRP پرداختند. آن‌ها نمونه‌های دایره‌ای و مربعی با شرایط مذکور را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که دور پیچ CFRP سبب افزایش ظرفیت باربری تیر ستون‌های مذکور (CFST) می‌گردد، در حالی که ترمیم با این مواد تأثیری روی سختی این نمونه‌ها نداشت. در سال ۲۰۱۷ تأثیر استفاده از پوشش ورق‌های FRP در ستون‌های بتن‌آرمه آسیب دیده، توسط آل نیمری و قائم [۱۹] مورد ارزیابی قرار گرفت. آن‌ها در این تحقیق، تأثیر مدت زمان حرارت اعمالی، سختی و ضخامت ورق‌های دور پیچ FRP را بررسی کردند. ۸ عدد از نمونه‌های حرارت دیده با ورق‌های FRP الیاف کربن و شیشه یک جهته به صورت دورپیچ مقاوم‌سازی شدند. نتایج نشان داد که دور پیچ کامل با ورق‌های FRP ظرفیت باربری محوری و سختی را در ستون‌های آسیب دیده افزایش می‌دهد. در سال ۲۰۱۸ در تحقیقی توسط چن و همکاران [۲۰] تأثیر الیاف CFRP در رفتار ستون‌های فولادی حرارت دیده مورد ارزیابی قرار گرفت؛ آن‌ها به بررسی رفتار فشاری ستون‌های کوتاه فولادی قوطی شکل پر شده با بتن (CFST) که با الیاف CFRP تقویت شدند، پرداختند، ستون‌های مذکور قبل تقویت، تحت تأثیر درجات حرارت بالا (۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه) قرار گرفتند، نتایج به دست آمده حاکی از تأثیر مثبت دور پیچ FRP در مقاومت و سختی ستون‌های فولادی بود و افزایش تعداد لایه‌های FRP سبب بهبود بیشتر این دو پارامتر گردید. هی و چن [۲۱] در سال ۲۰۲۰ میلادی تأثیر درجه حرارت بالا و لایه‌های ورقه‌های CFRP (یک، دو، سه، چهار) را بر رفتار ستون‌های لوله‌ای فولادی مورد بررسی قرار دادند،



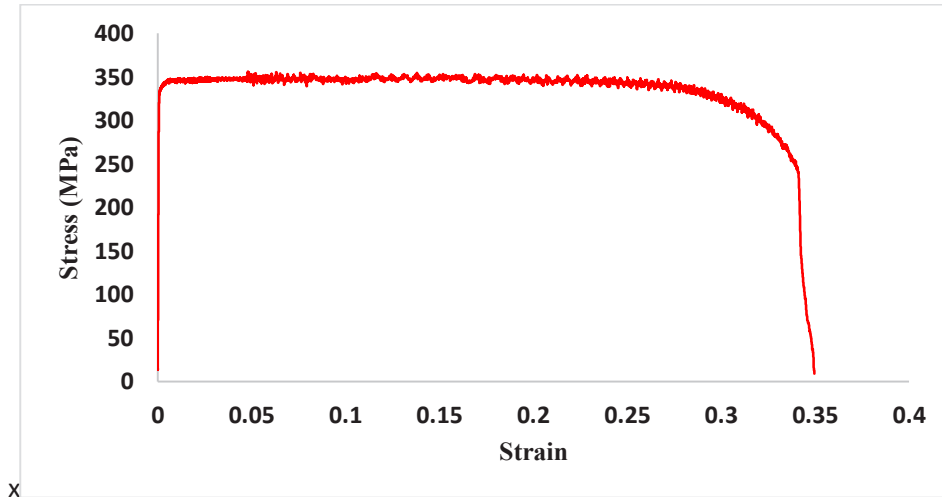
شکل ۱. تصاویر نمونه‌های آزمون کششی با نمایش طول آن‌ها

Fig. 1. Tensile test of the specimens with their length

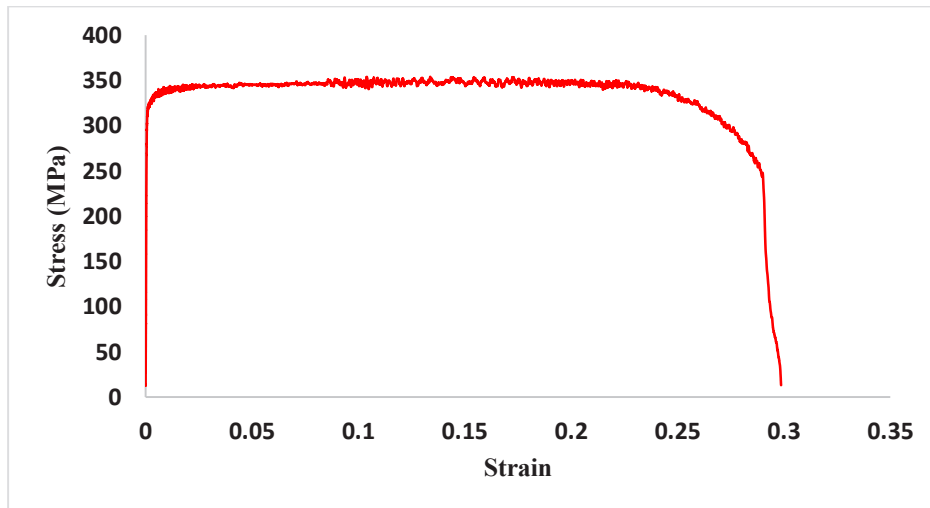


شکل ۲. تصاویر آزمایش کششی نمونه‌ها همراه با اکستنسومتر

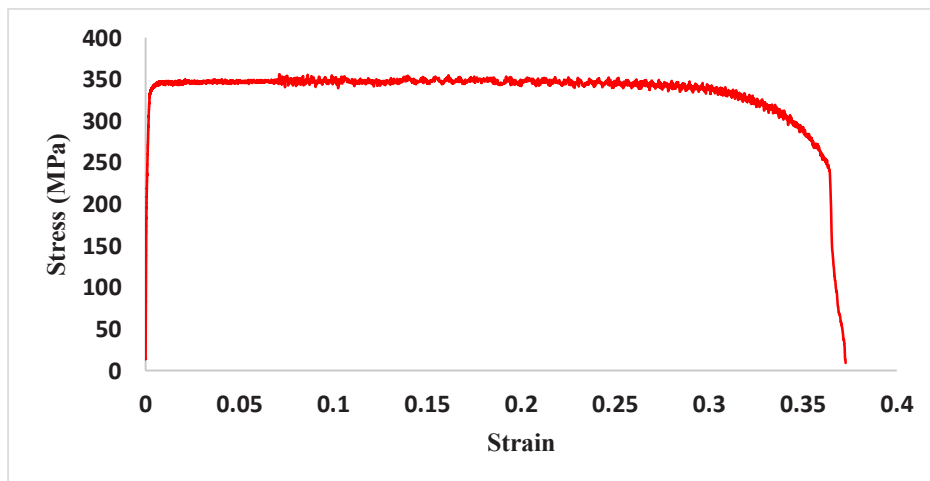
Fig. 2. Tensile test of the specimens with extensometer



الف) نمونه اول تست کشش



ب) نمونه دوم تست کشش



ج) نمونه سوم تست کشش

شکل ۳. منحنی تنش-کرنش ورق‌های فولادی

Fig. 3. Stress- Strain diagrams of tensile test specimens

جدول ۱. نتایج آزمون کششی

Table 1. Tensile test results of specimens

شماره نمونه	مشخصات نمونه	ضخامت ورق (mm)	عرض (mm)	سطح مقطع ورق (cm ²)	حد جاری شدن (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	درصد ازدیاد طول نسبی	محل گسیختگی
۱	ورق	۳	۱۲/۸۶	۰/۴۰۴	۳۴۴	۳۵۶	۳۶	داخل علامت طول استاندارد
۲	ورق	۳	۱۳	۰/۴۰۸	۳۳۱	۳۵۰	۳۰	داخل علامت طول استاندارد
۳	ورق	۳	۱۲/۸۶	۰/۳۹۵	۳۳۳	۳۵۲	۳۶	داخل علامت طول استاندارد

خلاصه نتایج به دست آمده از آزمایش کششی نمونه‌ها به شرح جدول ۱ است.

تنش تسلیم، مقاومت نهایی و کرنش نهایی فولاد مورد استفاده در ستون‌ها، میانگین نتایج به دست آمده به ترتیب $f_y = 335 \text{ MPa}$ ، $f_u = 353 \text{ MPa}$ و $\epsilon_u = 34\%$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین مدول الاستیسیته $E = 270 \text{ GPa}$ به دست آمد.

نمونه‌ها، ابعاد سوراخ‌ها، محل جانمایی در شکل ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. سوراخ‌ها فوق در کارخانه توسط دستگاه‌های برش CNC ایجاد می‌شوند. تصاویر نمونه‌های سوراخ دار در شکل ۶ نشان داده شده است.

۲-۳- معرفی و نام‌گذاری نمونه‌های فولادی

به طور کلی نمونه‌ها در ۵ حالت حرارتی ۲۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تقسیم‌بندی می‌شوند که با توجه به:

- نوع و جانمایی سوراخ

- تقویت و یا عدم تقویت اعضاء فشاری با ورق‌های فولادی برای نام‌گذاری نمونه‌ها از کلمات و حروف مخفف زیر استفاده می‌شود.

Control: نمونه کنترل (بدون سوراخ) D(Defect): سوراخ H(Horizontal): افقی V(Vertical): عمودی

T(Top): بالا M(Middle): وسط B(Bot): پایین

در نتیجه انواع سوراخ‌ها با توجه به نوع سوراخ و محل سوراخ شامل موارد زیر است:

DHT: سوراخ افقی بالای نمونه DHM: سوراخ افقی وسط

نمونه DHB: سوراخ افقی پایین نمونه

DVT: سوراخ قائم بالای نمونه DVM: سوراخ قائم وسط

نمونه DVB: سوراخ قائم پایین نمونه

برای نمونه‌های تقویتی با ورق نیز از پسوند PL در انتهای نام‌گذاری نمونه‌ها استفاده می‌گردد که در شکل ۷ تصاویر بخشی از آن‌ها مشخص است.

۲-۲- مشخصات نمونه‌ها

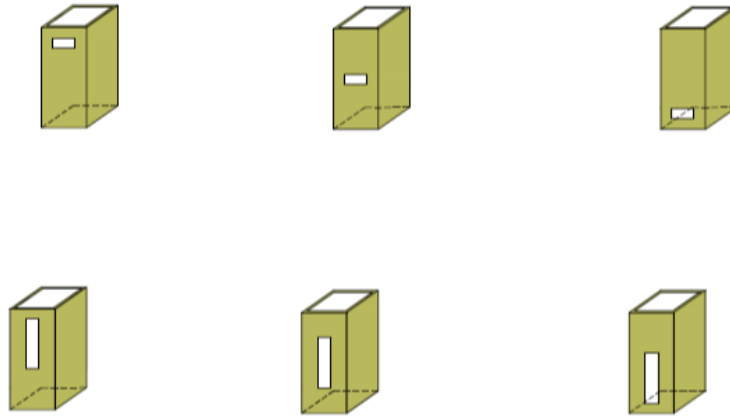
در این تحقیق اعضاء فولادی قوطی شکل تو خالی به ابعاد $10 \times 10 \times 0.3 \text{ cm}$ (ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر، ابعاد مقطع ۱۰ سانتی‌متری و ضخامت ۳ میلی‌متر) در ۵ حالت حرارتی مختلف (۲۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد که بالاتر از دمای شکست فولاد است و تأثیر بیشتری در مقاومت فولاد دارد) به صورت تقویت نشده به شرح ذیل تحت بارگذاری و آزمایش قرار می‌گیرند.

۲-۲-۱- نمونه‌های سالم و بدون سوراخ به تعداد ۵ عدد

۲-۲-۲- نمونه‌های دارای سوراخ (ابعاد سوراخ افقی: $30 \times 50 \text{ mm}$ ،

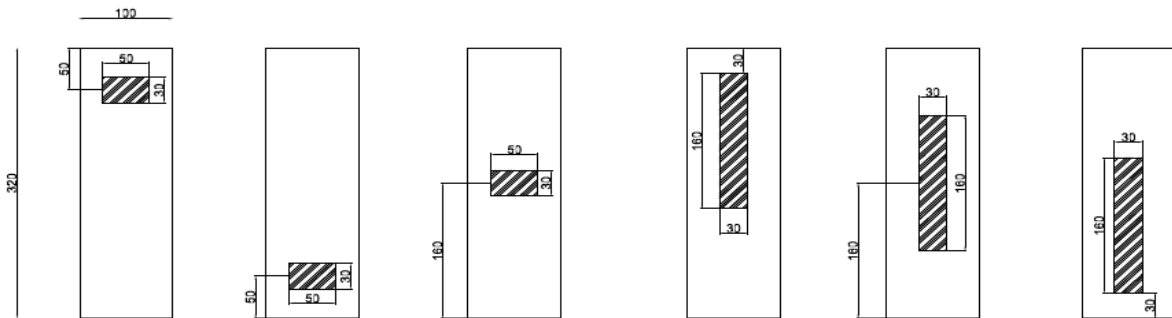
ابعاد سوراخ عمودی: $30 \times 160 \text{ mm}$) و بدون تقویت به تعداد ۳۰ عدد

سپس به منظور ارزیابی روش‌های مقاوم‌سازی ستون‌ها، در دو حالت حرارتی ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های تقویت شده به وسیله و ورق فولادی محل سوراخ تعداد ۱۲ نمونه مورد بررسی و آزمایش می‌شوند.



شکل ۴. نمونه‌های قوطی دارای سوراخ

Fig. 4. specimens with defects



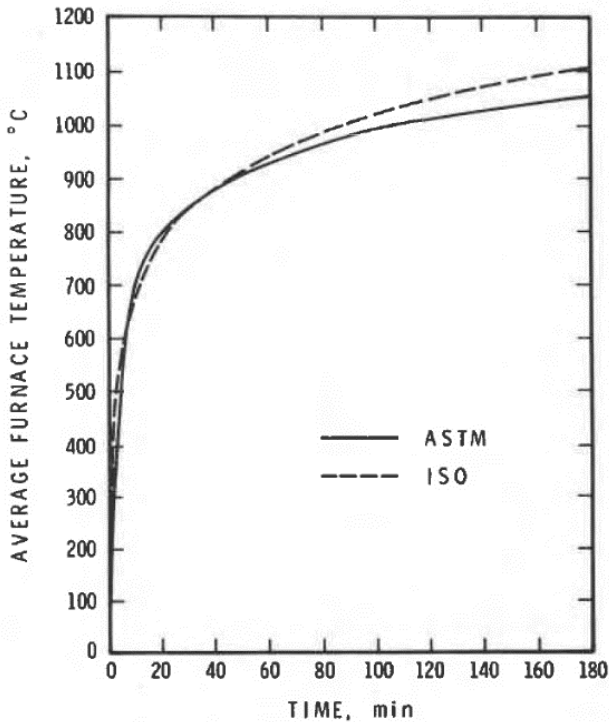
شکل ۵. ابعاد نمونه‌ها، سوراخ‌ها و محل قرارگیری

5. Specimen's dimension, defects, and their location



شکل ۶. تصاویر نمونه‌های سالم و سوراخ دار پس از برش

Fig. 6. Defectless and defective specimens after cut



شکل ۸. مقایسه منحنی آتش ASTM با ISO834 [۲۴]

Fig. 8. Comparison of ASTM fire curve with ISO834



شکل ۷. نمونه‌های فولادی آماده شده برای آزمایش

Fig. 7. Specimens prepared for experimental work

نمونه‌ها و در شکل ۱۰ منحنی گرمایش، سرمایش واقعی اعمالی (بر اساس دماهای ثبت شده در زمان‌های مختلف) به نمونه‌ها نشان داده شده است. در شکل ۱۱ تصاویر کوره و نمونه‌ها بعد اعمال حرارت نشان داده شده است. پس از اتمام این مرحله، آزمون‌های مقاومت کششی روی نمونه‌ها در دمای محیط انجام شده است.

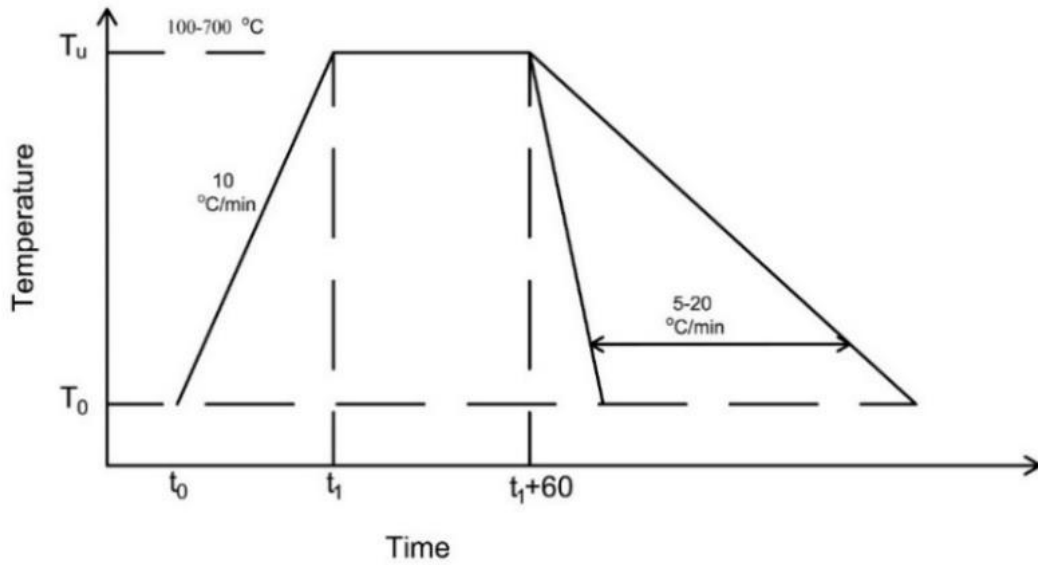
۴- مقاوم‌سازی نمونه‌ها

به منظور مقاوم‌سازی اعضاء فشاری فولادی دارای سوراخ، از ورق‌های فولادی با ضخامت ۳ میلی‌متر و ابعاد ۱ سانتی‌متر بزرگ‌تر از ابعاد سوراخ استفاده شده است. مشخصات مکانیکی این ورق‌ها، همانند مشخصات ذکر شده جهت فولاد نمونه‌ها (ذکر شده در جدول ۱) می‌باشد. همچنین ورق‌های ذکر شده بر روی مکان سوراخ‌ها جوش داده می‌شوند. صفحه فولادی جوش داده شده در شکل ۱۲ نشان داده شده است (نمونه‌هایی با سوراخ افقی و عمودی در وسط). همچنین، برای اتصال جوش، از جوش گوشه استفاده شده است.

۳- پروسه اعمال حرارت بر روی اعضاء فشاری فولادی

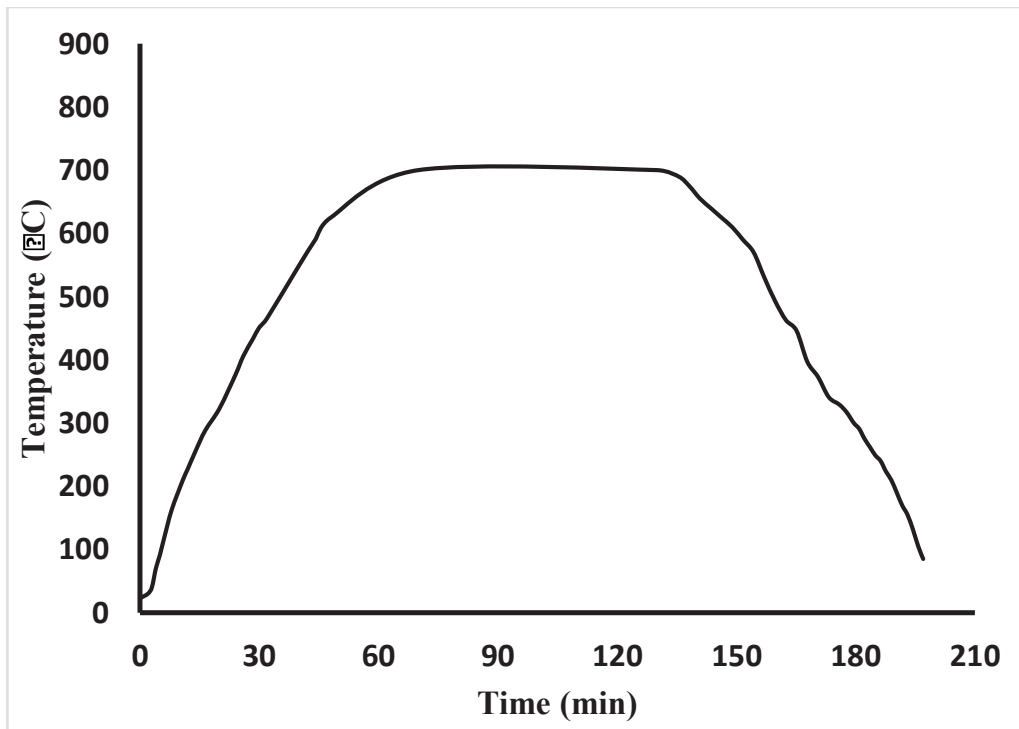
منحنی زمان-دما که در استاندارد ISO834 ارائه شده و به منحنی آتش استاندارد شناخته می‌شود [۲۳] را می‌توان جهت اعمال حرارت به کار برد که به رژیم حرارتی منحنی آتش ASTM نزدیک می‌باشد؛ که در شکل ۸ مشخص می‌باشد.

در این آزمایش از یک کوره الکتریکی، با تنظیم دستی قدرت برای حرارت‌دهی نمونه‌ها استفاده شده است. دو ترموکوپل نوع K روی نمونه و کوره، دمای نمونه و کوره را ثبت می‌کردند. نمونه‌ها از دمای محیط به دماهای هدف با سرعت ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه حرارت داده می‌شوند. ۵ حالت دمای هدف ۲۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد. به محض حرارت‌دهی نمونه تا دمای هدف، دما به مدت ۶۰ دقیقه ثابت نگه داشته شده است تا شرایط پایداری حرارت در نمونه‌ها ایجاد شود و از توزیع یکنواخت دما در نمونه‌ها اطمینان حاصل شود. سپس کوره خاموش شده و فاز خنک‌شدگی نمونه‌ها شروع می‌شود. نمونه‌ها، به طور طبیعی و با نرخ حدود ۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه کاهش پیدا کرده تا به دمای اتاق برسد. در شکل ۹ منحنی در نظر گرفته شده برای اعمال حرارت به



شکل ۹. نمودار پیش‌بینی پروسه افزایش حرارت و فاز خنک‌شدگی نمونه‌ها

Fig. 9. Temperature increase procedure and cooling phase



شکل ۱۰. نمودار دما-زمان (گرمایش-سرمايش) اعمالی به نمونه‌ها

Fig.10. Time-Temperature (heating-cooling) diagram applied to the specimens



شکل ۱۱. تصاویر کوره و نمونه‌ها بعد اعمال حرارت

Fig. 11. Heating process in electric furnace



شکل ۱۳. نمونه‌ای از بارگذاری نمونه‌ها

Fig. 13. Example of loading samples

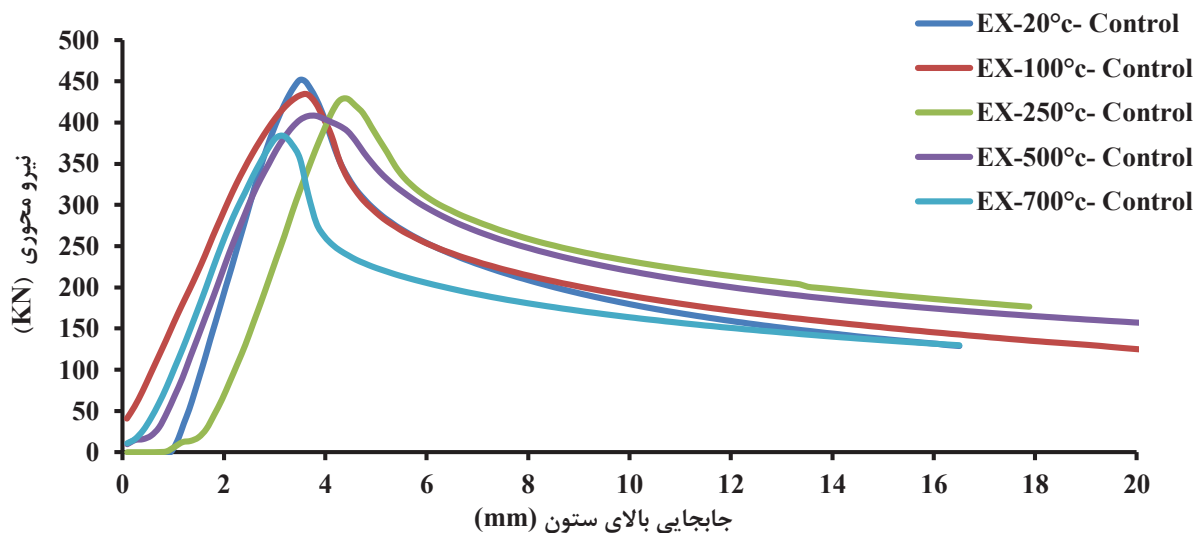


شکل ۱۲. نحوه مقاوم‌سازی نمونه‌ها به وسیله ورق‌های فولادی

Fig. 12. Retrofitting of specimens by steel plate

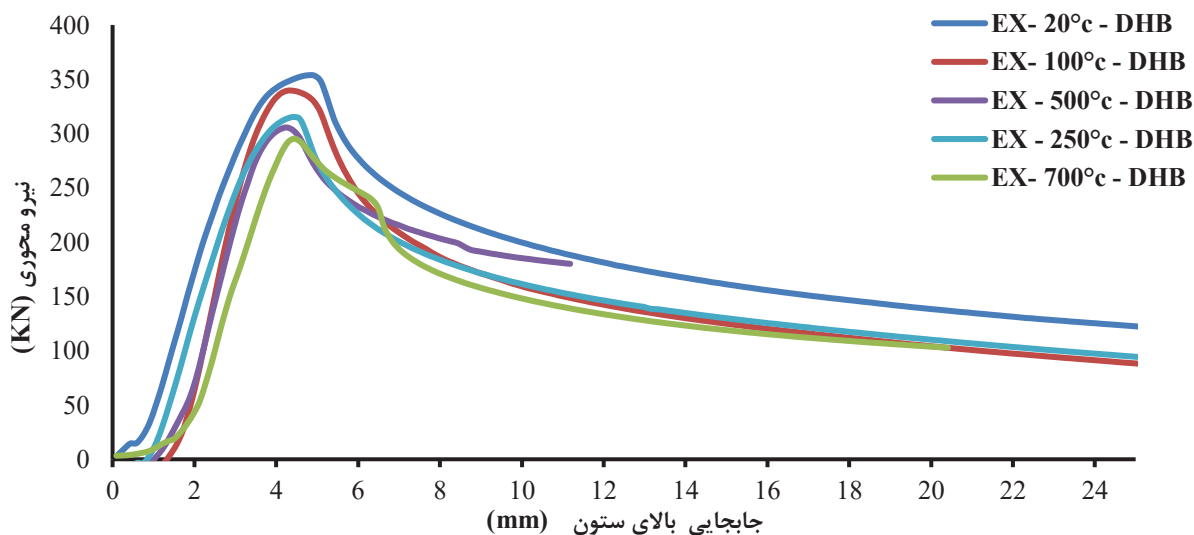
همچنین جهت ثبت تغییر مکان افقی (عمود بر راستای عضو) از سه عدد LVDT (ترانسفورماتورهای تفاضلی متغیر جهت اندازه‌گیری جابجایی خطی) در بالا، وسط و پایین نمونه که عمود بر راستای عضو کار گذاشته شده، استفاده شده است. در شکل ۱۳ نمونه‌ای از بارگذاری ستون‌ها نشان داده شده است.

۵- پروسه انجام آزمایش فشاری نمونه‌ها در آزمایشگاه به منظور بررسی و تحلیل ستون‌های فولادی بدون سوراخ، دارای سوراخ بدون تقویت و دارای سوراخ با تقویت، نمونه‌ها توسط جک توسط ۱۰۰ تنی تحت آزمایش فشاری قرار گرفته و در هر لحظه نیرو و تغییر مکان قائم متناظر توسط دستگاه به صورت خودکار ثبت شده است



شکل ۱۴. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های کنترل (سالم)

Fig. 14. Load-displacement diagrams of control specimens



شکل ۱۵. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های سوراخ دار با سوراخ افقی پایین نمونه

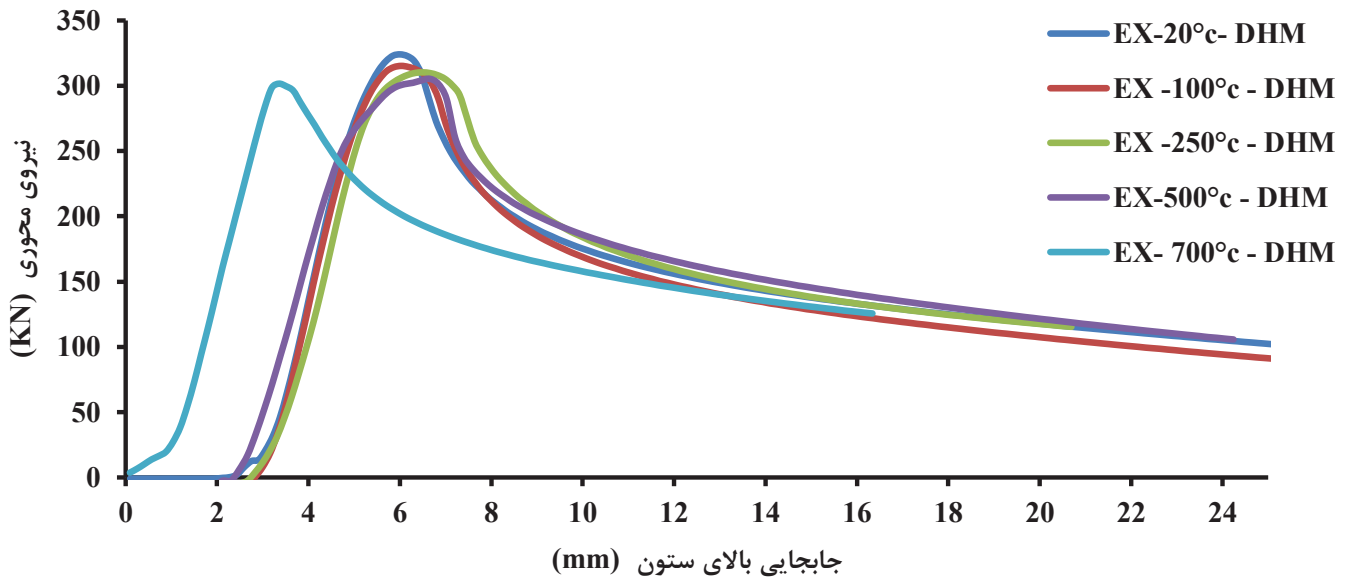
Fig. 15. Load-displacement diagrams of DHB

۶-۱- نتایج به دست آمده از نمونه‌های تقویت نشده

نمونه‌های تقویت نشده در پنج حالت حرارت به صورت سالم و یا سوراخ دار با شش حالت سوراخ تحت آزمایش قرار می‌گیرند. در شکل‌های ۱۴ تا ۲۰ نتایج حاصل به صورت نمودارهای نیرو- تغییر مکان برای نمونه‌های سالم ((بدون سوراخ)) و انواع حالت سوراخ ارائه شده است. در جدول ۲ نیز نتایج ماکزیمم نیروی قابل تحمل ارائه شده است.

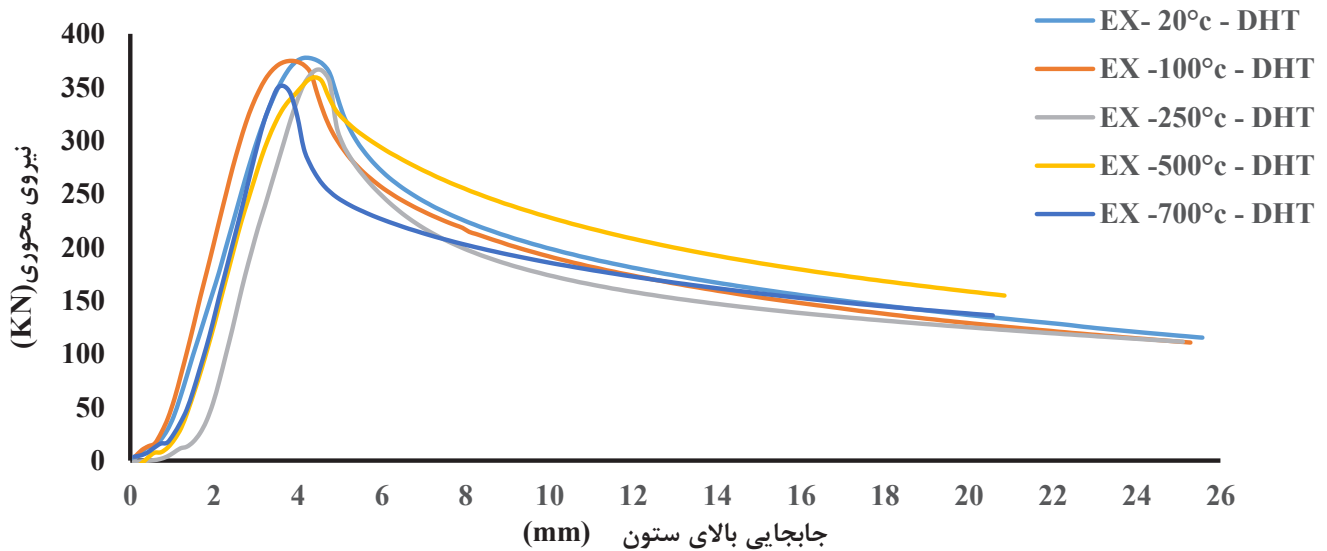
۶- نتایج به دست آمده از آزمایش فشاری نمونه‌ها

در آزمایش فشاری نمونه‌ها، مقدار حداکثر بار (بار بحرانی) و تغییر مکان قائم متناظر با این بار به دست می‌آید. جهت تحلیل، بررسی ظرفیت باربری و شکل‌پذیری نمونه‌ها، نمودار نیرو- تغییر مکان قائم نمونه‌ها استفاده می‌شود؛ که از روی این نمودارها بار حداکثری و تغییر مکان متناظر با آن به دست آمده است.



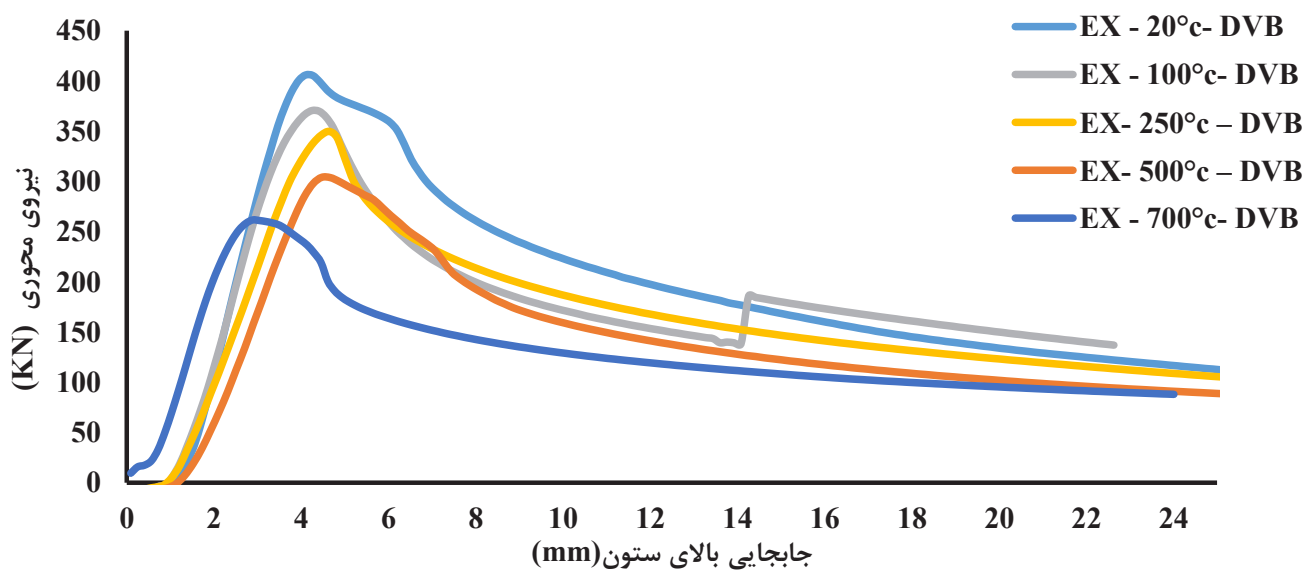
شکل ۱۶. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های سوراخ دار با سوراخ افقی وسط نمونه

Fig. 16. Load-displacement diagrams of DHM



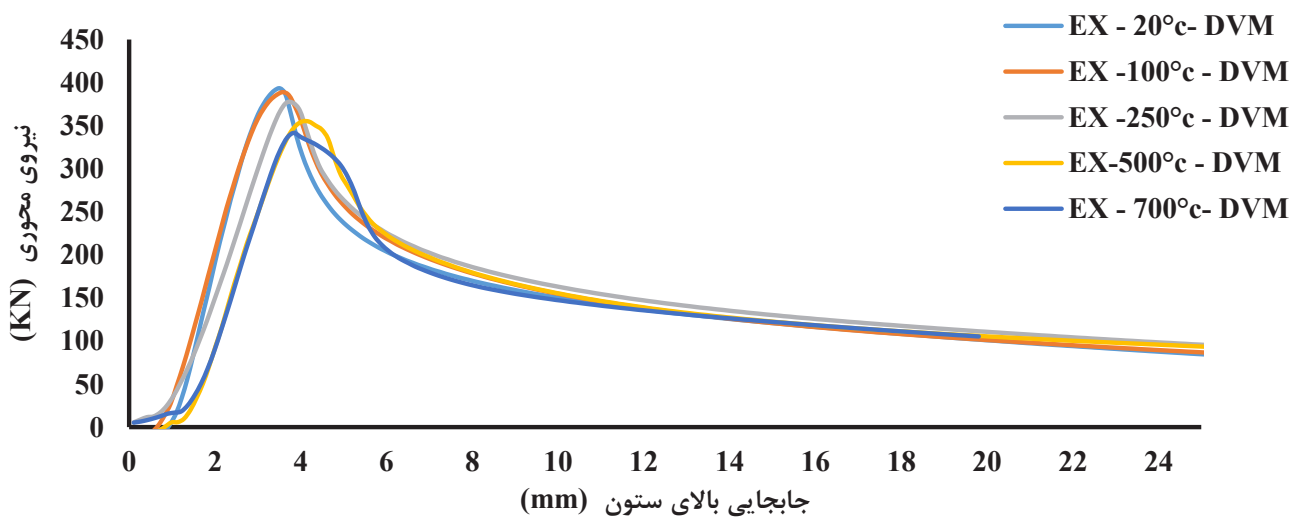
شکل ۱۷. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های سوراخ دار با سوراخ افقی بالای نمونه

Fig. 17. Load-displacement diagrams of DHT



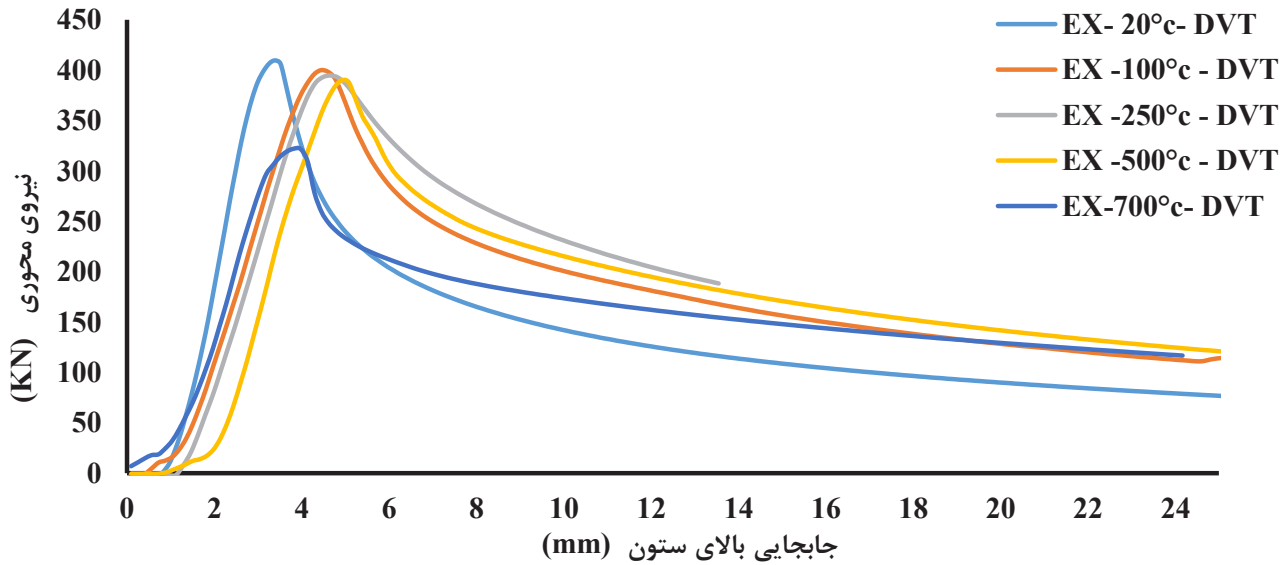
شکل ۱۸. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های سوراخ دار با سوراخ قائم پایین نمونه

Fig. 18. Load-displacement diagrams of DVB



شکل ۱۹. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های سوراخ دار با سوراخ قائم وسط نمونه

Fig. 19. Load-displacement diagrams of DVM



شکل ۲۰. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های سوراخ دار با سوراخ قائم بالای نمونه

Fig. 20. Load-displacement diagrams of DVT

دو حالت دمایی ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است. در جدول ۳ نیز، خلاصه نتایج کامل نمونه‌های مذکور در دو حالت با حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد آمده است.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در هر دو حالت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، تقویت با ورق فولادی در محل سوراخ سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌شود؛ به صورتی که بیشترین افزایش در نمونه‌های ۲۰ درجه سانتی‌گراد، مربوط به نمونه با سوراخ افقی پایین نمونه (۱۰ درصد افزایش) و در نمونه‌های ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، مربوط به نمونه با سوراخ قائم پایین ستون (۱۳ درصد افزایش) است. همچنین در شکل ۲۷، نحوه گسیختگی نمونه‌های تقویت شده و تقویت نشده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد با نمونه کنترل ارائه شده‌اند.

با توجه به بررسی نمونه‌ها، نحوه گسیختگی آن‌ها به شرح ذیل می‌باشد:

❖ حالت خرابی برای نمونه‌های کنترلی تسلیم و به دنبال آن کماتش موضعی متقارن می‌باشد به نحوی که دو ضلع مخالف به سمت داخل کماتش می‌کنند و دو ضلع دیگر به سمت بیرون کماتش می‌کنند. (شکل ۲۸-الف)

❖ در نمونه‌ها دارای سوراخ، در برخی نمونه‌ها با توجه به ضعیف شدن قسمتی از مقطع، کماتش موضعی اغلب در محل سوراخ به وجود آمده است و موجب گسیختگی نمونه شده است (شکل ۲۸-ب) و در برخی دیگر نحوه خرابی همانند نمونه کنترلی بوده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۴ الی ۲۰ و جدول ۳، ظرفیت باربری کلیه نمونه‌ها با قرارگیری در دماهای بالا کاهش می‌یابد که این کاهش برای نمونه بدون سوراخ برای دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۱۵ درصد و برای نمونه‌ها دارای سوراخ تا ۳۵ درصد (نمونه دارای سوراخ قائم پایین نمونه) بوده است. در مقایسه ستون‌های دارای سوراخ یا به عبارتی کاهش سطح مقطع عرضی در محل سوراخ، سبب کاهش ظرفیت باربری و تحمل بارهای قائم شده است که کمترین ظرفیت باربری نمونه‌های با سوراخ افقی، مربوط به نمونه‌هایی با سوراخ افقی وسط نمونه، در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود. (کاهش ۲۸ درصدی نسبت به نمونه کنترل در ۲۰ درجه سانتی‌گراد). همچنین کمترین ظرفیت باربری نمونه‌های با نمونه قائم، مربوط به نمونه با سوراخ قائم پایین ستون، در ۷۰۰ است. (کاهش ۳۲ درصدی نسبت به نمونه کنترل در ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد).

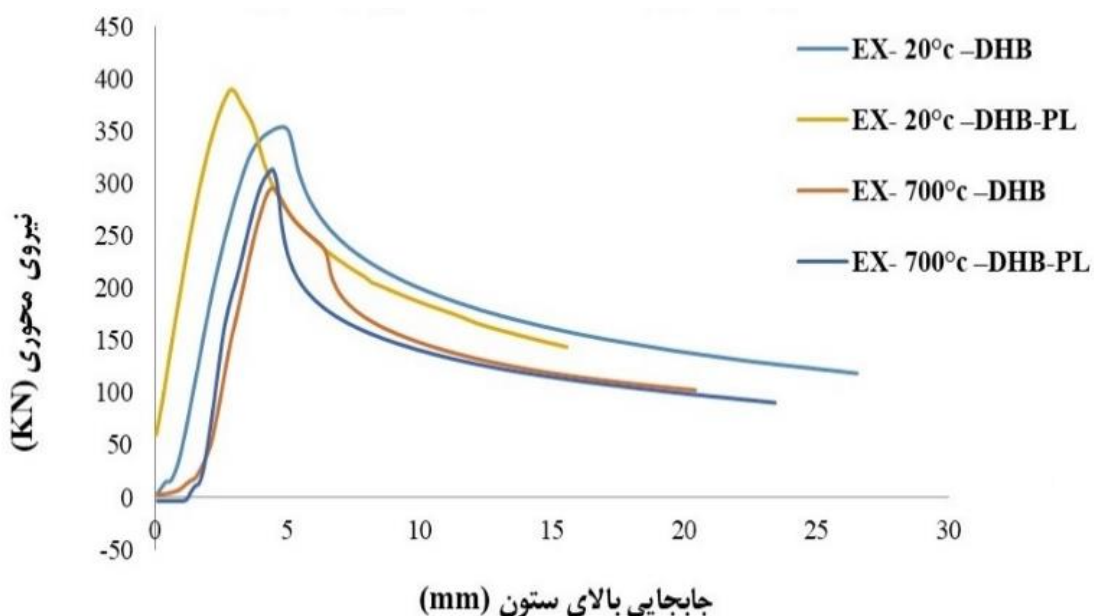
۶-۲- نتایج به دست آمده از نمونه‌های تقویت شده ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و مقایسه نتایج

همان‌طور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، نمونه‌های دارای سوراخ با ورق فولادی در محل سوراخ تقویت می‌شوند و سپس تحت بارگذاری قرار می‌گیرند. در شکل‌های ۲۱ الی ۲۶ نمودارهای نیرو- تغییر مکان نمونه‌های تقویت شده با ورق فولادی و نمونه‌های بدون تقویت در

جدول ۲. نتایج نمونه‌های تقویت نشده در دماهای حرارتی مختلف

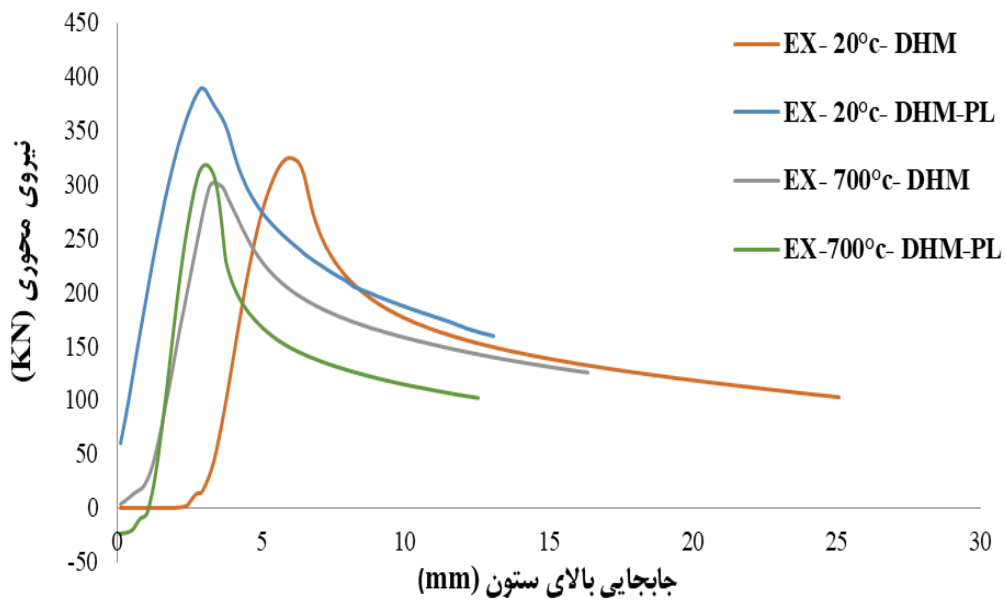
Table 2. Summary of the results at different temperatures

حداکثر بار قائم $P_{max}(kN)$					شرح نمونه
700 °C	500 °C	250 °C	100 °C	20 °C	
۳۸۳/۴۹	۴۰۸/۱۲	۴۲۸/۹۶	۴۳۴/۱۹	۴۵۱/۶۴	نمونه کنترلی (بدون سوراخ) - Control
۳۵۰/۹۷	۳۵۹/۲۰	۳۶۶/۲۵	۳۷۴/۶۹	۳۷۷/۳۴	نمونه دارای سوراخ افقی بالای نمونه (DHT)
۳۰۱/۵۸	۳۰۵/۳۳	۳۱۰/۲۵	۳۱۵/۲۰	۳۲۴/۰۲	نمونه دارای سوراخ افقی وسط نمونه (DHM)
۲۵۹/۱۹	۳۰۵/۵۵	۳۱۵/۱۹	۳۳۹/۴۳	۳۵۳/۶۷	نمونه دارای سوراخ افقی پایین نمونه (DHB)
۳۲۲/۰۳	۳۸۹/۸۷	۳۹۴/۷۲	۴۰۰/۰۲	۴۰۹/۶۴	نمونه دارای سوراخ قائم بالای نمونه (DVT)
۳۴۱/۶۰	۳۵۵/۰۱	۳۷۶/۷۰	۳۸۸/۸۹	۳۹۳/۳۳۰	نمونه دارای سوراخ قائم وسط نمونه (DVM)
۲۶۱/۵۸	۳۰۳/۹۸	۳۴۹/۶۹	۳۷۰/۵۱	۴۰۵/۹۳	نمونه دارای سوراخ قائم پایین نمونه DVB



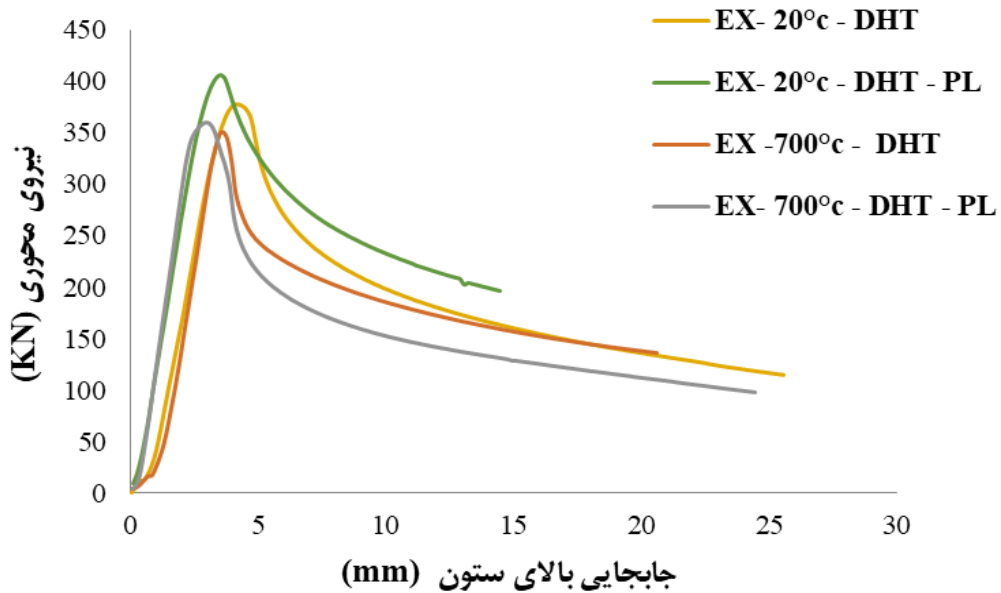
شکل ۲۱. نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌های تقویتی با ورق فولادی و بدون تقویت با سوراخ افقی پایین نمونه در ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

Fig. 21. Load-displacement diagram of retrofitted specimens with steel plates and non-retrofitted specimens with horizontal perforation at the bottom at 20 and 700 °C



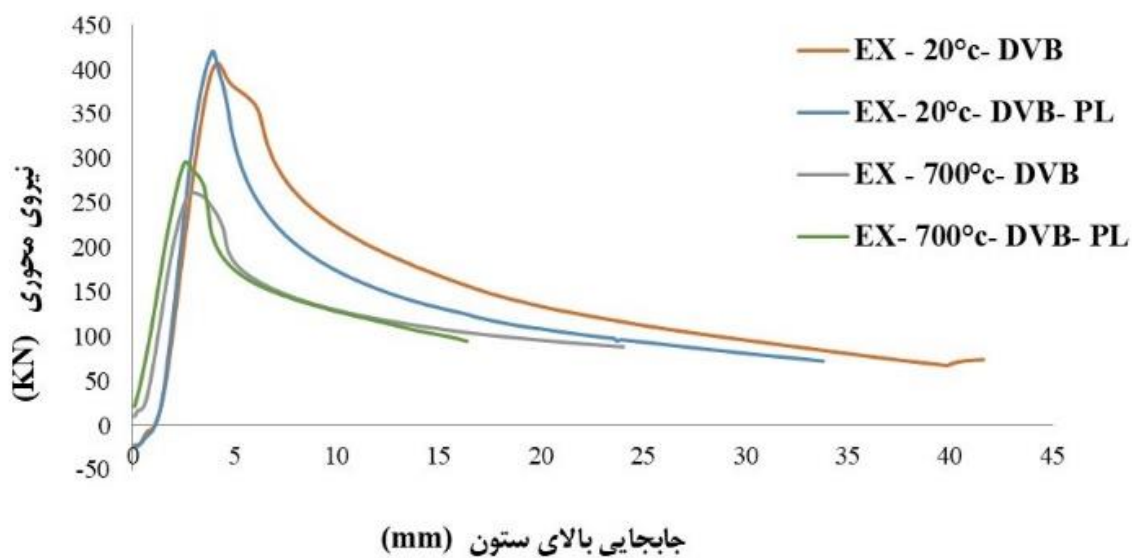
شکل ۲۲. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های تقویتی با ورق فولادی و بدون تقویت با سوراخ افقی وسط نمونه در ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

Fig. 22. Load-displacement diagram of retrofitted specimens with steel plates and non-retrofitted specimens with horizontal perforation at the middle at 20 and 700 °C



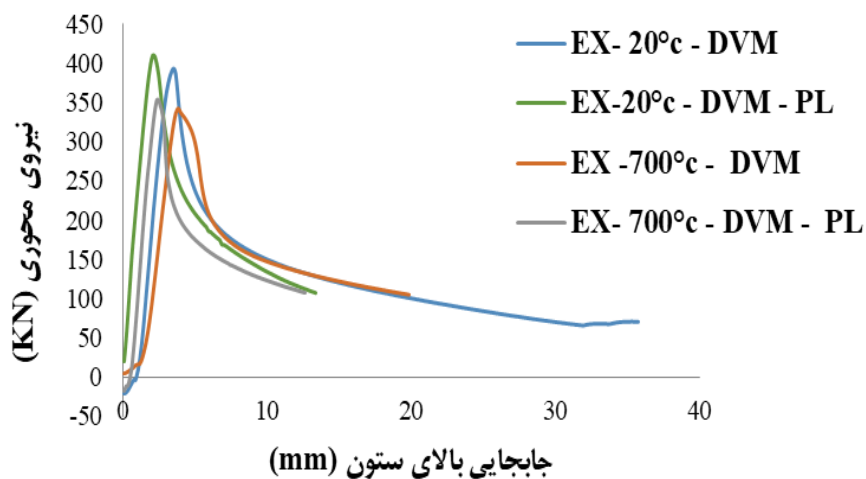
شکل ۲۳. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های تقویتی با ورق فولادی و بدون تقویت با سوراخ افقی بالا نمونه در ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

Fig. 23. Load-displacement diagram of retrofitted specimens with steel plates and non-retrofitted specimens with horizontal perforation at the top at 20 and 700 °C



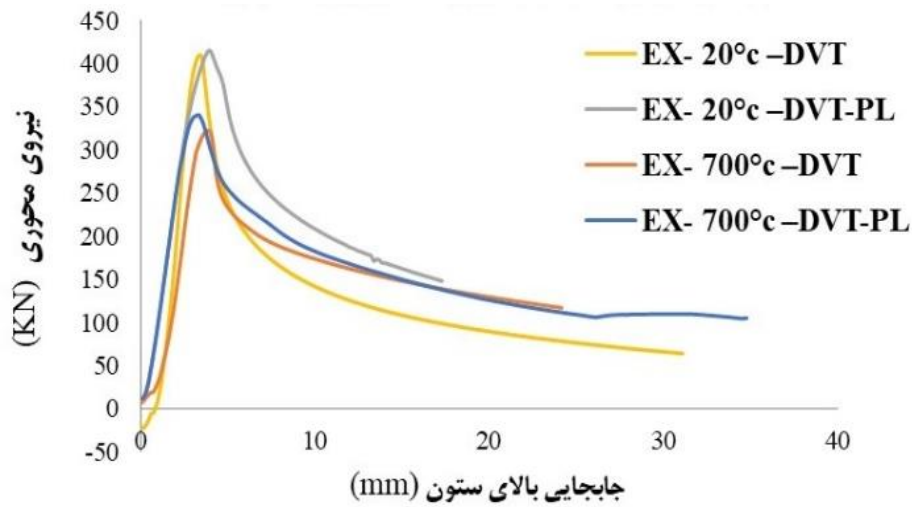
شکل ۲۴. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های تقویتی با ورق فولادی و بدون تقویت با سوراخ قائم پایین نمونه در ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

Fig. 24. Load-displacement diagram of retrofitted specimens with steel plates and non-retrofitted specimens with vertical perforation at the bottom at 20 and 700 °C



شکل ۲۵. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های تقویتی با ورق فولادی و بدون تقویت با سوراخ قائم وسط نمونه در ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

Fig. 25. Load-displacement diagram of retrofitted specimens with steel plates and non-retrofitted specimens with vertical perforation at the middle at 20 and 700 °C



شکل ۲۶. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های تقویتی با ورق فولادی و بدون تقویت با سوراخ قائم وسط نمونه در ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

Fig. 26. Load-displacement diagram of retrofitted specimens with steel plates and non-retrofitted specimens with vertical perforation at the top at 20 and 700 °C

جدول ۳. نتایج نمونه‌های تقویت شده با ورق و تقویت نشده در دو حالت حرارتی ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

Table 3. The results of non-retrofitted and retrofitted specimens with plates at 20 and 700 °C

P _{max} (kN) حداکثر بار قائم		شرح نمونه	P _{max} (kN) حداکثر بار قائم		شرح نمونه
برای نمونه‌های ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد			برای نمونه‌های ۲۰ درجه سانتی‌گراد		
تقویت شده	تقویت نشده		تقویت شده	تقویت نشده	
۳۶۰/۳۰	۳۵۰/۹۷	DHT	۴۰۵/۶۴	۳۷۷/۳۴	DHT
۳۱۷/۸۶	۳۰۱/۵۸	DHM	۳۴۳/۴۲	۳۲۴/۰۲	DHM
۳۱۳/۰۶	۲۵۹/۱۹	DHB	۳۸۹/۵۳	۳۵۳/۶۷	DHB
۳۴۰/۷۴	۳۲۲/۰۳	DVT	۴۱۵/۸۵	۴۰۹/۶۴	DVT
۳۵۳/۲۳	۳۴۱/۶۰	DVM	۴۰۹/۲۰	۳۹۳/۳۰	DVM
۲۹۵/۶۵	۲۶۱/۵۸	DVB	۴۱۹/۸۷	۴۰۵/۹۳	DVB



Control Specimen



DHB



DHB-PL



DVB



DVB-PL



DHM



DHM-PL



DVM



DVM-PL



DHT



DHT-PL



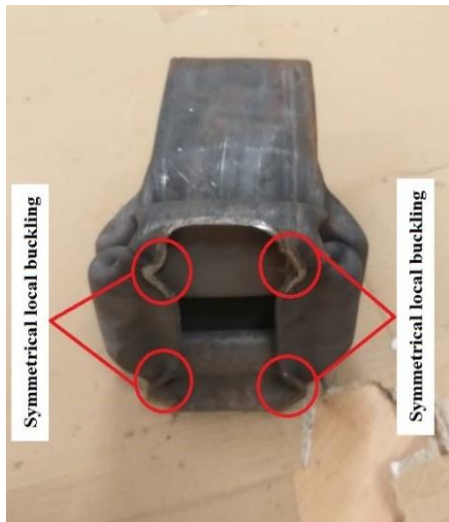
DVT



DVT-PL

شکل ۲۷. مقایسه نحوه گسیختگی نمونه‌های ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بدون تقویت و با تقویت ورق فولادی

Fig. 27. Comparison of failure mode at 700 °C



الف) کمانش موضعی متقارن



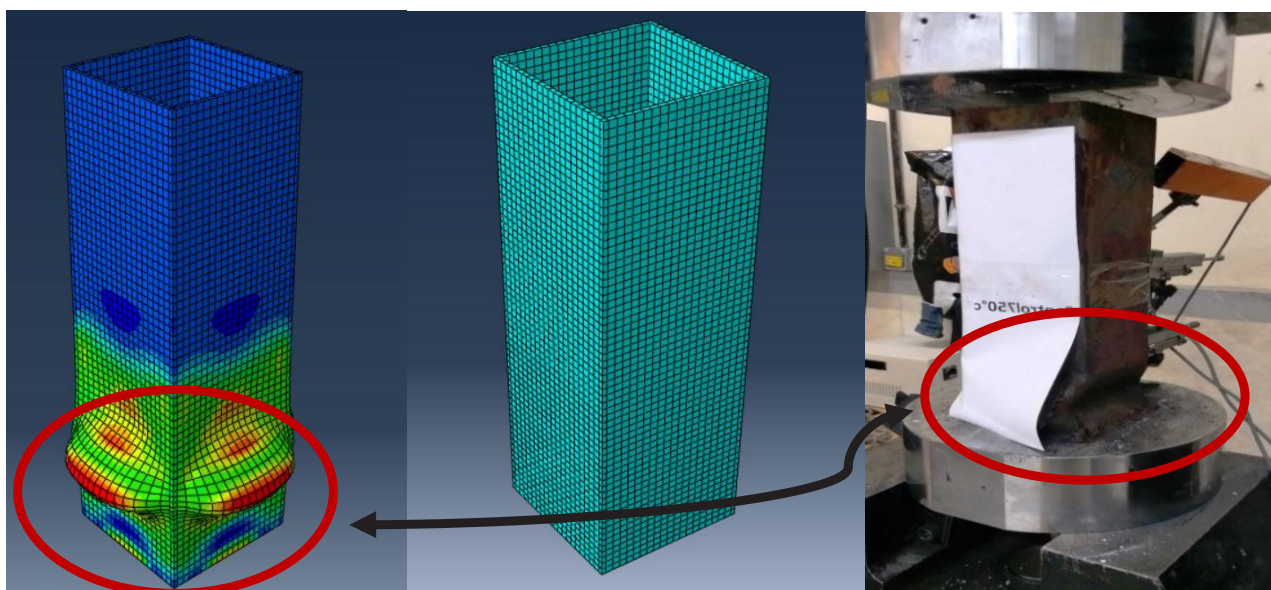
ب) کمانش موضعی در محل سوراخ



ج) کمانش موضعی متقارن به دور از محل مقاوم‌سازی شده

شکل ۲۸. مودهای خرابی

Fig. 28. Failure mode of specimens



شکل ۲۹. مدل سازی نمونه کنترلی در نرم افزار ABAQUS، حالت تغییر شکل نرم افزاری و آزمایشگاهی

Fig. 29. Modeling of control specimen in ABAQUS software, numerical and experimental deformation mode

(DHM-PL) خواص مصالح، فرآیند بارگذاری و کلیه مشخصات هندسی و مکانیکی مدل های عددی مطابق با فرآیند مورد استفاده در آزمایش ها می باشد. در این مدل سازی از المان مکعبی سه درجه آزادی، هشت گره ای با گرادیان حرارتی (C3D8T) استفاده شده است. نمونه ای از مدل سازی صورت گرفته، مطابقت کمانش های آزمایشگاهی و نرم افزاری صورت گرفته در شکل ۲۹ (نمونه کنترلی)، شکل ۳۰ (نمونه با سوراخ قائم پایین نمونه) و در شکل ۳۱ (نمونه با سوراخ افقی وسط نمونه) مشاهده می گردد.

مدل سازی و کمانش حاصله در اثر بارگذاری نرم افزاری تطابق بسیاری با نمونه های تجربی و آزمایشگاهی را نشان می دهد.

در شکل ۳۲، نمونه ای از نمودارهای بار-جابجایی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به نتایج عددی، مدل اجزای محدود دارای دقت و همگرایی مناسبی با داده های آزمایشگاهی به ویژه در تعیین ظرفیت باربری نمونه های فشاری فولادی می باشد.

❖ در نمونه های تقویت شده به وسیله ورق های فولاد نیز همانند نمونه های کنترلی تسلیم به همراه کمانش موضعی رخ داده است (شکل ۲۸-ج).

۷- مدل سازی المان محدود

به منظور گسترش نتایج آزمایشگاهی، ۳ نمونه دارای سوراخ در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد با استفاده از نرم افزار ABAQUS مورد مدل سازی و صحت سنجی قرار گرفته اند؛ که این نمونه ها به شرح ذیل می باشند:

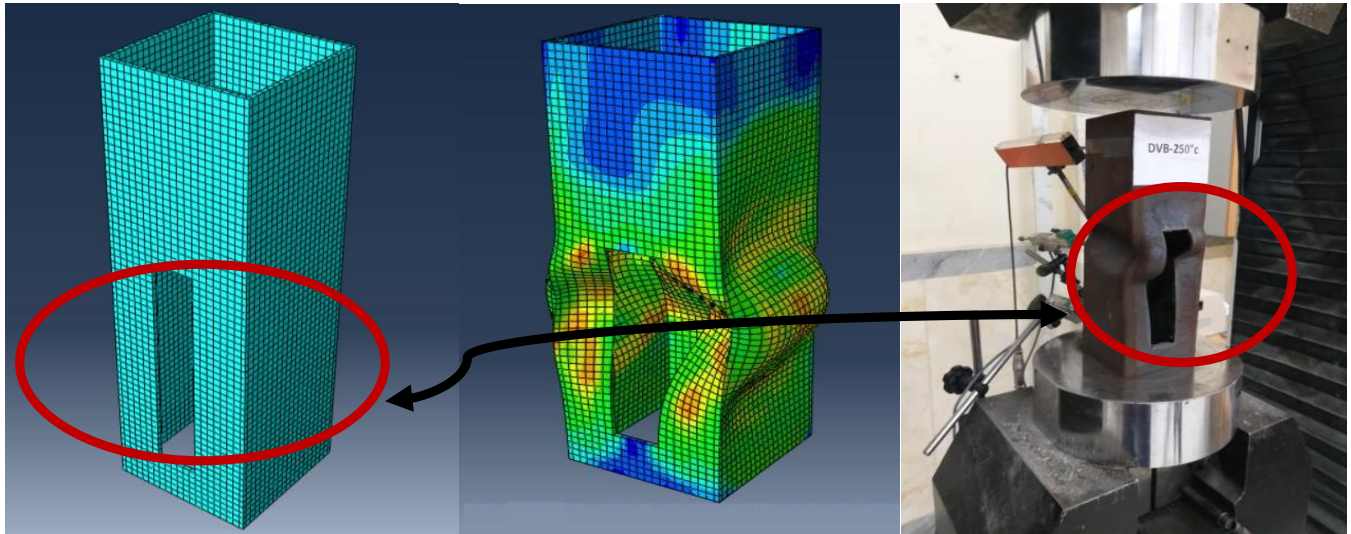
۱- نمونه بدون سوراخ (Control)

۲- نمونه با سوراخ قائم پایین نمونه (DVB)

۳- نمونه با سوراخ افقی وسط نمونه (DHM)

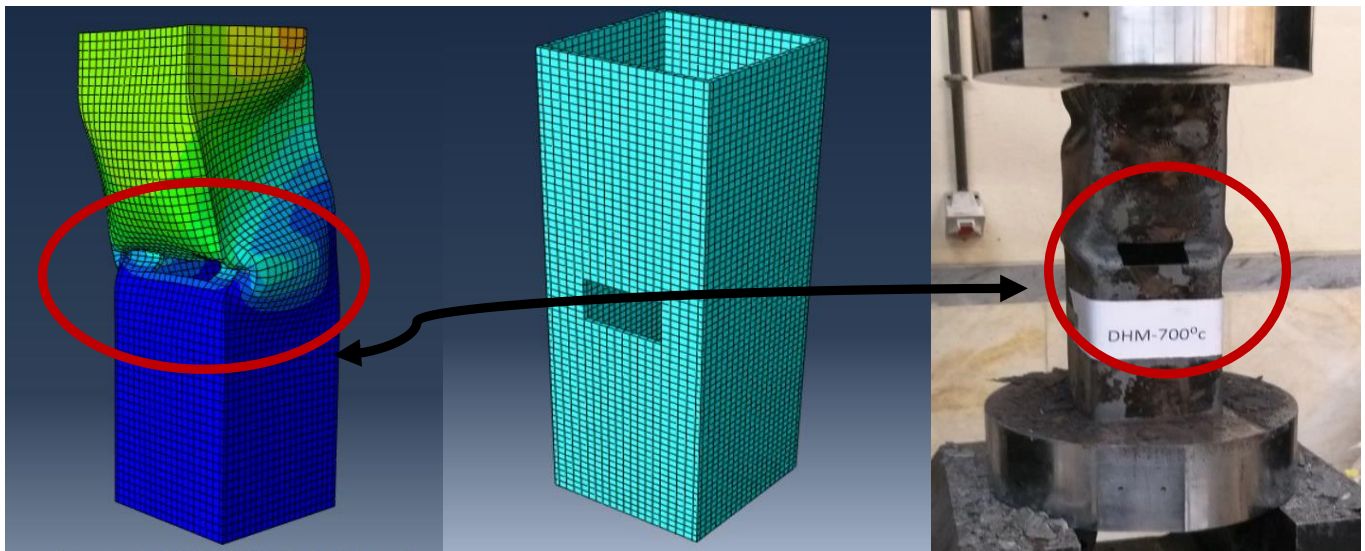
و همچنین جهت بررسی نمونه های مقاوم سازی شده یک نمونه مدل سازی و صحت سنجی می شود:

۴- نمونه با سوراخ افقی وسط نمونه مقاوم سازی شده با ورق فولادی



شکل ۳۰. مدل‌سازی نمونه با سوراخ قائم پایین نمونه در نرم‌افزار ABAQUS، حالت تغییر شکل نرم‌افزاری و آزمایشگاهی

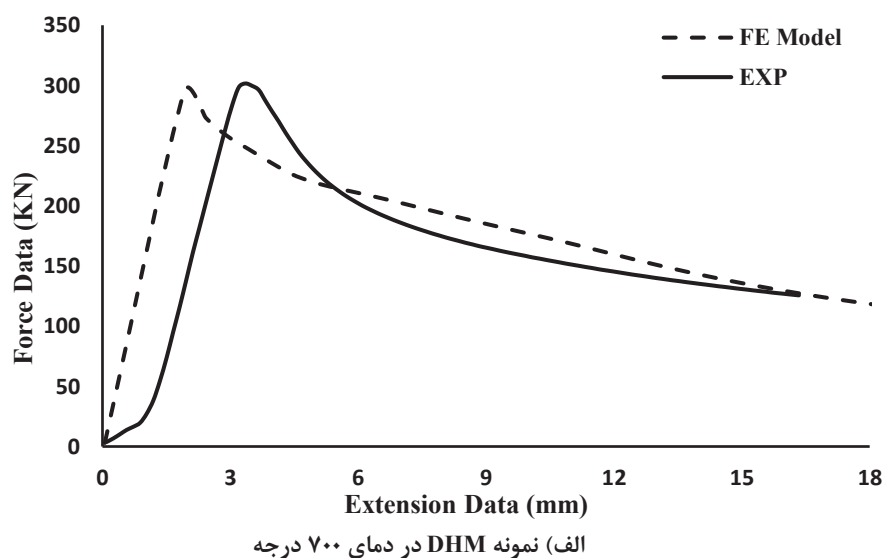
Fig. 30. Modeling of DVB in ABAQUS software, numerical and experimental deformation mode



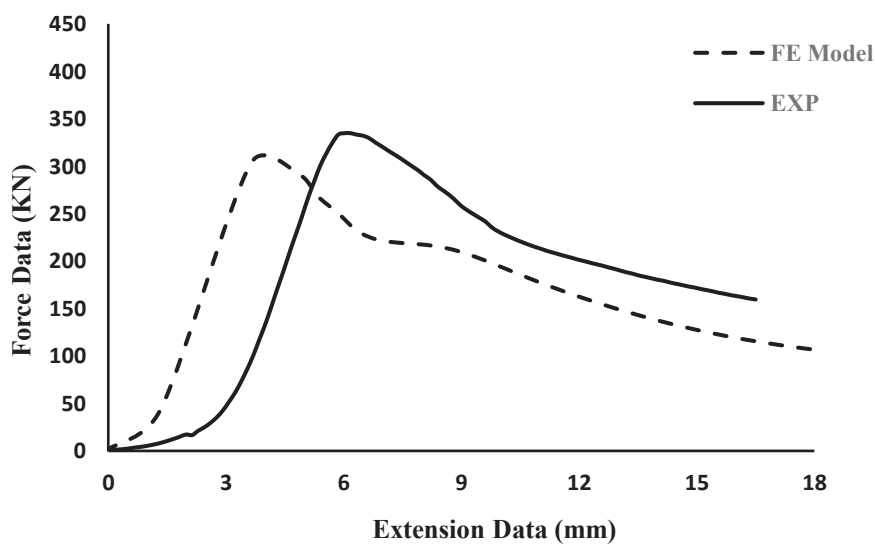
شکل ۳۱. مدل‌سازی نمونه با سوراخ افقی وسط نمونه در نرم‌افزار ABAQUS، حالت تغییر شکل نرم‌افزاری و آزمایشگاهی

Fig. 31. Modeling of DHM in ABAQUS software, numerical and experimental deformation mode

	EXP- 700°C - DHM	FE Model- 700°C - DHM	Error (%)
$P_{max}(KN)$	301.58	297.26	1.3



	EXP- 700°C – DHM-PL	FE Model- 700°C – DHM-PL	Error (%)
$P_{max}(KN)$	329.1	303.86	7.9



شکل ۳۲. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی در مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی

Fig. 32. Comparison of Load-Displacement diagrams in numerical model with Experimental results

۸- بحث و نتیجه گیری

منابع

- [1] A. Saedi Daryan, H. Ketabdari, Mechanical properties of steel bolts with different diameters after exposure to high temperatures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10) (2019) 04019221.
- [2] H. Ketabdari, A.S. Daryan, N. Hassani, Predicting post-fire mechanical properties of grade 8.8 and 10.9 steel bolts, *Journal of Constructional Steel Research*, 162 (2019) 105735.
- [3] A.S. Daryan, M. Yahyai, Behaviour of welded top-seat angle connections exposed to fire, *Fire safety journal*, 44(4) (2009) 603-611.
- [4] I. Badih Damghani, K. Narmashiri, Strengthening of Deficient Mortar Filled Steel Columns using CFRP, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(2) (2020) 513-528.
- [5] Y. Sakumoto, T. Yamaguchi, T. Okada, M. Yoshida, S. Tasaka, H. Saito, Fire resistance of fire-resistant steel columns, *Journal of Structural Engineering*, 120(4) (1994) 1103-1121.
- [6] K.-C. Yang, S.-J. Chen, C.-C. Lin, H.-H. Lee, Experimental study on local buckling of fire-resisting steel columns under fire load, *Journal of constructional steel research*, 61(4) (2005) 553-565.
- [7] W.-Y. Wang, G.-Q. Li, Behavior of steel columns in a fire with partial damage to fire protection, *Journal of constructional steel research*, 65(6) (2009) 1392-1400.
- [8] A. Correia, T. Pires, J. Rodrigues, Behaviour of steel columns subjected to fire, in: *Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*, 2010, pp. 879-890.
- [9] A. Byström, J. Sjöström, U. Wickström, D. Lange, M. Veljkovic, Large scale test on a steel column exposed to localized fire, *Journal of structural fire engineering*, (2014).
- [10] S. Fan, X. Ding, W. Sun, L. Zhang, M. Liu, Experimental investigation on fire resistance of stainless steel columns

در این مقاله به بررسی اثر حرارت و سوراخ بر روی ظرفیت نمونه‌های فولادی پرداخته شده است در ابتدا ۳۵ ستون شامل نمونه‌های کنترل و نمونه‌های دارای سوراخ (۶ نوع سوراخ) ساخته شده و در ۵ حالت دمایی ۲۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفته‌اند از انجام آزمون فشار بر روی نمونه‌ها نمودارهای بار-جابجایی حاصل گردیده است. جهت مقاوم‌سازی سوراخ‌ها با استفاده از ورق‌های فولادی تعداد ۱۲ ستون دیگر در دو حالت دمایی ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش مشابه قرار گرفته است که خلاصه نتایج ۴۷ آزمایش انجام شده به شرح ذیل است:

(۱) ضعف و سوراخ به صورت سوراخ باعث کاهش مقاومت اعضاء فشاری نمونه‌ها می‌گردد که بیشترین درصد کاهش ظرفیت باربری در نمونه‌های با دمای محیط (۲۰ درجه سانتی‌گراد) مربوط به نمونه با سوراخ افقی میانه ستون (۲۸ درصد) و در نمونه‌های تحت دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مربوط به نمونه با سوراخ قائم پایین نمونه‌ها (کاهش ۳۲ درصدی) است.

(۲) حرارت و افزایش دما سبب کاهش مقاومت نمونه‌های فشاری فولادی می‌شود، به طوری که با افزایش دما تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش ۱۵ درصدی ظرفیت باربری در نمونه کنترل یا بدون سوراخ مشاهده شده است و حداکثر این کاهش مقاومت در نمونه با سوراخ قائم پایین نمونه رخ می‌دهد. (۳۵ درصد کاهش مقاومت)

(۳) با مقاوم‌سازی ستون‌های دارای سوراخ، ظرفیت باربری پس از حرارت نمونه‌ها بهبود یافته است که این بهبود عملکرد برای نمونه با سوراخ افقی پایین ستون حدود ۱۰ درصد و برای نمونه با سوراخ قائم پایین ستون حدود ۱۳ درصد افزایش ظرفیت باربری داشته است.

(۴) با توجه به نحوه گسیختگی ستون‌ها مشاهده گردید که در برخی نمونه‌ها همانند نمونه‌های دارای سوراخ قائم، مکان گسیختگی ستون‌ها پس از مقاوم‌سازی از منطقه دارای سوراخ دور شده که نشان از تأثیر مقاوم‌سازی بر روی نمونه‌ها دارد.

(۵) به منظور گسترش نتایج در تحقیقات آینده، مدل المان محدودی نمونه دارای سوراخ و نمونه مقاوم‌سازی شده مورد مدل‌سازی و صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج مدل المان محدودی از دقت قابل قبولی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برخوردار بوده است.

- compressive loads using CFRP, *Journal of Constructional Steel Research*, 178 (2021) 106496.
- [18] Z. Tao, L.-H. Han, Behaviour of fire-exposed concrete-filled steel tubular beam columns repaired with CFRP wraps, *Thin-walled structures*, 45(1) (2007) 63-76.
- [19] H.S. Al-Nimry, A.M. Ghanem, FRP confinement of heat-damaged circular RC columns, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(1) (2017) 115-133.
- [20] Y. Chen, K. Wang, K. He, J. Wei, J. Wan, Compressive behavior of CFRP-confined post heated square CFST stub columns, *Thin-Walled Structures*, 127 (2018) 434-445.
- [21] K. He, Y. Chen, Experimental investigation of fire-exposed steel tubular stub columns wrapped with CFRP sheets, *Composite Structures*, 253 (2020) 112807.
- [22] H.A. Bengar, M. Hosseinpour, M. Celikag, Influence of CFRP confinement on bond behavior of steel deformed bar embedded in concrete exposed to high temperature, in: *Structures*, Elsevier, 2020, pp. 240-252.
- [23] I.O.f. Standardization, ISO 834-1- Fire-resistance Tests Elements of Building Construction -- Part 1: General requirements, Geneva, Switzerland, (1999).
- [24] T. Harmathy, M. Sultan, J. MacLaurin, Comparison of severity of exposure in ASTM E 119 and ISO 834 fire resistance tests, *Journal of Testing and Evaluation*, 15(6) (1987) 371-375.
- with square hollow section, *Thin-Walled Structures*, 98 (2016) 196-211.
- [11] S. Fan, M. Liu, W. Sun, Y. Guo, Y.L. Han, Experimental investigation of eccentrically compressed stainless steel columns with constraints in fire, *Fire Safety Journal*, 99 (2018) 49-62.
- [12] Z. Xing, O. Zhao, M. Kucukler, L. Gardner, Testing of stainless steel I-section columns in fire, *Engineering Structures*, 227 (2021) 111320.
- [13] M. Karimian, K. Narmashiri, M. Shahraki, O. Yousefi, Structural behaviors of deficient steel CHS short columns strengthened using CFRP, *Journal of Constructional Steel Research*, 138 (2017) 555-564.
- [14] M. Shahraki, M.R. Sohrabi, G.R. Azizyan, K. Narmashiri, Experimental and numerical investigation of strengthened deficient steel SHS columns under axial compressive loads, *Structural Engineering and Mechanics*, 67(2) (2018) 207-217.
- [15] M. Shahraki, M.R. Sohrabi, G. Azizyan, K. Narmashiri, Strengthening of deficient steel SHS columns under axial compressive loads using CFRP, *Steel and Composite Structures*, 30(1) (2019) 69-79.
- [16] A. Shabani Ammari, K. Narmashiri, Effects of Vertical Deficiency Location on the Structural Behavior of Steel SHS Short Columns, *AUT Journal of Civil Engineering*, 4(4) (2020) 1-1.
- [17] O. Yousefi, K. Narmashiri, A.A. Hedayat, A. Karbakhsh, Strengthening of corroded steel CHS columns under axial

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Makhdoumi Darmian, R. Rahgozar, M. Mohammadizadeh, A. Saedi Daryan, K. Narmashiri, *The Effect of Fire on the Behavior of Perforated Short Steel Compression Members and Evaluation after Retrofitting*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(6) (2022) 2415-2440.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19938.7289](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19938.7289)



