



## An Investigation into the Impact of Fire on Lateral Stability and Strength of Thin Steel Plate Shear Walls

G. Pachideh<sup>1</sup>, M. Gholhaki<sup>1\*</sup>, Y. Noori<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

**ABSTRACT:** The SPSWs has been enthusiastically applied in some of the tall buildings across the world as a novel lateral load-bearing system and due to their proper stiffness, strength, ductility, and energy absorption, as well as remarkable reduction in buildings' weight compared to the concrete cases, they are deemed as an efficient alternative for the traditional load-resisting systems. Fire-related hazards and their impacts on the structural systems have been of major concern for practitioners, which is of utmost significance for special structures and tall buildings. Accordingly, in the case of thin steel plate shear walls, fire is most likely to leave detrimental effects on the lateral stability and strength of them due to their small values of thickness. To better understand the behavior of such systems in the event of a fire, this paper aims to investigate the impact of heat caused by a fire on the stability, elastic stiffness and yield strength of a 3-storey frame equipped with SPSW system. Based on the results derived by connected stress-heat analyses, thickening the wall results in a substantial reduction in the column's deformations. Moreover, an increase in thickness and yield strength of the steel plate plays an effective role in less reduction in yield strength and elastic stiffness of the system after fire events although, while the plate thickness is kept constant, the system's elastic stiffness does not vary as the yield strength raises. In addition, simple relations were achieved to estimate the post-fire elastic stiffness and yield strength of the SPSW system.

### Review History:

Received: 9/19/2018

Revised: 10/27/2018

Accepted: 10/28/2018

Available Online: 12/15/2018

### Keywords:

Steel Plate Shear Wall

Fire Condition, Stability

Elastic Stiffness

Yield Strength

### 1- Introduction

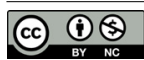
In 2012, Ruirui et al. [1] conducted a progressive collapse analysis on steel buildings subjected to fire loads. Based on their results, it can be inferred that in the case of unbraced frames with lower loading ratio and greater beam's cross-sectional area, higher failure temperature is required during which total collapse takes place. However, local damage in the elements more easily occurs when loading ratio raises and the beam's cross-section becomes smaller. It is of note that the application of the bracing system can remarkably prevent the occurrence of progressive collapse mechanisms in the structure. Larger lateral stiffness of the frame can cause smaller vertical deflections in the failed column in the restorable condition. However, it was found that the temperature in which total collapse occurs does not depend on the lateral stiffness.

In June of 2016, experimental investigations of the performance of a six-storey, cold-formed steel (CFS) framed building were conducted on the Large High-Performance Outdoor Shake Table (LHPOST) at the University of California, San Diego (UCSD). The building's lateral load resistance system consisted of cold-formed steel framing members sheathed by panels of sheet steel adhered to gypsum board. These and other light-weight construction material

lateral load resisting systems are widely used in seismic regions in the western United States, where they offer significant advantages in construction costs and speed. For information about the design and construction of these wall systems for seismic applications, interested readers are referred to the National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) document Seismic Design of Cold-Formed Steel Lateral Load-Resisting Systems - A Guide for Practicing Engineers [2]. The aim was to study the earthquake performance of this construction method for midrise structures (five to ten stories), as well as the earthquake-damaged building's response to fire. After the fire tests, additional earthquake shaking was conducted to study the response of the fire-damaged building to earthquake aftershocks. The aftershock test results were intended to help inform decisions about first responder access to a building in the case of fire following earthquake, as well as repair versus replace assessments. Details about the six-storey building tests are provided in [3].

In 2016, Matthew et al. [4] carried out investigations on the behavior of steel plate shear walls under interactive actions of seismic and fire loads. In doing so, several tests were conducted on 6 2.7×3.7 m shear wall specimens surrounded by cold-formed framing in a way that steel plates sheathed one side of the wall and, on the other side, was covered by gypsum panels. The results indicate the fire can vary the failure mode

\*Corresponding author's email: : mgholhaki@semnan.ac.ir



**Table 1. Mechanical Properties of Experimental Model's Components**

Members	Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Ultimate Strength (N/mm <sup>2</sup> )
Plate	180	300
Space Beams	310	446
Column and Top Beam	366	550

of the wall such that local buckling in the steel plate turns into global buckling and its lateral load-resisting capacity is reduced by 35%. Based on the viewpoint of residual lateral-load resisting capacity under multi-hazard events, it could be predictable to observe this behavior.

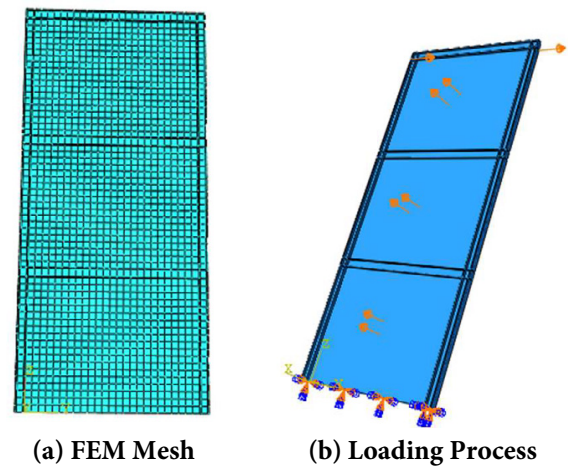
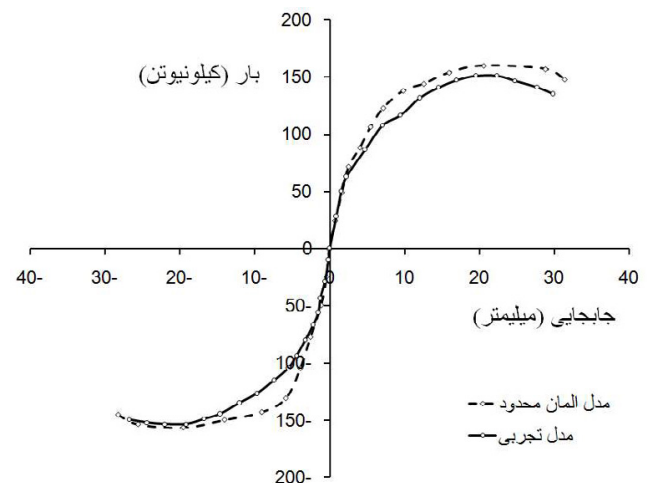
Thereby, concerning the recently conducted studies on the impact of fire loads on steel structures, especially steel plate shear walls, it can be said that very few studies have been performed in this respect to date. Consequently, this paper aims to study the behavior of steel plate shear walls subjected to fire and measure their vulnerability. Not surprisingly, in case of exposure to fire or thermal gradient rising the steel's temperature, might degrade the shear wall's strength meaning that in case the wall has been already subjected to fire loads and left unchanged or unrepaired, it is less likely to exhibit a proper performance under lateral induced loads such as earthquake. In this respect, it is of utmost significance to get insight over the interactive impact of fire and seismic loads on steel plate shear walls. Hence, the novelty of this study is attributed to exploration of a correlation between thermal gradient and amount of reduction in lateral strength or stiffness of thin walls with different thickness values (0.5, 2 and 4 mm) and yield strengths (180 and 240 MPa) which has been analyzed utilizing first-order mathematical relations.

## 2- Methodology

With respect to the impact of fire loads on the behavior of load-resisting systems, it is attempted to study the effect of fire on the stability and performance of thin steel plate shear walls. In this respect, a steel plate shear wall placed in a 3-story frame with rigid beam-column connections has been modeled using FEM-based software to analyze the fire effects on the wall thoroughly. To validate the modeling procedure conducted by ABAQUS Software [5], the experimental model studied by [6] was adopted whose materials' mechanical properties are presented in Table 1.

Due to the occurrence of multiple buckling and entrance of the plate into the post-buckling zone, computer analyses on the thin steel plate shear walls are accompanied with numerous challenges, and analysis of the large displacements can considerably affect the results.

Numerical convergence is barely achieved in the case of thin plates due to multiple buckling in various zones, as mentioned earlier. Thus, it is required to consider small mesh sizes for the plat. Accordingly, after conducting a sensitivity analysis, a mesh size of 50 mm was employed to perform the analyses. On the other hand, the Shell S4R element was applied for the modeling process owing to a wide range of stress variations.

**Fig. 1. Meshing and Loading Procedure****Fig. 2. Comparison between Numerical and Experimental Results**

Moreover, both types of nonlinearity, including material and geometric nonlinearities, were taken into account during the analyses. For the sake of simplicity, the bilinear plasticity model with kinematic hardening and Von-Mises yield criterion were utilized. Besides, the slope of the hardened part of the stress-strain curve was taken as 5% of the elastic area.

It is worthwhile that in the FEM Software if the initial unevenness in the centroid of the plates is not considered, the plate will not buckle under in-plane loads and as a result, stiffness and yield strength of the wall will be overestimated. Consequently, after conducting the sensitivity analysis about the initial distortion, lastly, 3 mm distortion was applied to the center of plates.

Finite element mesh, as well as the loading process of steel plate shear wall in ABAQUS Software, are shown in Fig. 1.

To calibrate the numerical model, the nonlinear static analysis was performed by applying incremental displacement to the 3rd story's beam. A comparison between the curve derived by FEM and experimental analyses are demonstrated in Fig. 2.

**Table 2. Equations for Yield Strength at different Temperatures**

	$F_y = 180 \text{ MPa}$	$F_y = 240 \text{ MPa}$
t= 0.5 mm	$P_T = -210T + 155000$	$P_T = -235T + 18000$
t= 2 mm	$P_T = -900T + 530000$	$P_T = -210T + 670000$
t= 4 mm	$P_T = -1150T + 860000$	$P_T = -1250T + 96000$

**Table 3. Equations for Elastic Stiffness (KN/mm) at different Temperatures (°C)**

	t=0.5 mm	t = 2 mm	t = 4 mm
$F_y=180, 240 \text{ MPa}$	$K = -75T + 57500$	$K = -190T + 150000$	$K = -270T + 220000$

### 3. Results and Discussion

In order to evaluate the post-fire lateral stiffness and strength of the steel plate shear wall, the connected stress-heat analysis was carried out.

In this analysis, the wall is first under gravity loads subjected to various temperatures caused by fire and at the end of each thermal load, a lateral load is applied at the level of 3rd story to measure the strength. This means that yield strength and elastic stiffness can be computed after each fire-induced damage level.

To study the impact of plate thickness and yield strength, different values have been considered for them. Accordingly, thickness values of 0.7, 2 and 4 mm together with yield strengths of 180 and 240 MPa have been chosen for the modeling process and yield strength of the system was calculated under different temperatures. As the temperature rises and propagates in the structural members, each member encounters a reduction in its strength and as a result, the total lateral strength of the system is degraded.

Subsequently, increase in plate thickness and yield strength, enhanced the lateral capacity of the system in a way that for the plates with thickness of 4, 2 and 0.7 mm, raise in yield strength from 180 to 240 MPa, led to an increase respectively equal to 24, 46 and 36%. In temperatures ranging from 200 to 3000c, the value of sudden loss in yield strength is considerable which is attributed to heat distribution in all elements. For instance, in the plate with the yield strength of 240 MPa and thickness of 0.7, 2 and 4 mm, the value of loss within a 1000c thermal interval is equal to 30, 23 and 32%, respectively. Equations related to each one of the regressed lines for determination of yield strength ( $P_y$ ) in each model are given in Table 2.

Moreover, equations concerning the elastic stiffness (k) of

the steel plate shear wall are presented in Table 3 for different values of plate thickness.

### 4. Conclusions

To analyze the stability and determine the elastic stiffness as well as the yield strength of thin steel plate shear walls, a numerical study using connected stress-heat analysis and relations proposed by credible references, Was conducted in two cases of fire with gravity loads and fire acting interactively with lateral loads. The most notable results are as follows:

With respect to direct connection of plate to the perimeter beams and columns, rising the temperature has considerably affected the deformations induced in beam and column and on the contrary to the typical systems in which a gap as an expansion joint between beam and column is recommended, this system is incapable of placing the gap and by means of providing a proper thermal coating on the members, particularly plates and columns, detrimental effects of heat on stability as well as stiffness and strength degradation should be lessened and hindered, subsequently.

Post-fire Elastic stiffness and reduced yield strength of the structures equipped with steel plate shear walls can be evaluated using simplified relations.

### References

- [1] Ruirui, S., Zhaohui, H., Ian, B., Progressive collapse analysis of steel structures under fire conditions, *Engineering Structures*, 34 (2012) 400–413.
- [2] R. L., Madsen, T. A., Castle, B. W., Schafer, *Seismic Design of Cold-Formed Steel Lateral Load-Resisting Systems: A Guide for Practicing Engineers*, Gaithersburg, MD, (2016), <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.GCR.16-917-38>.
- [3] X., Wang, T. C., Hutchinson, G., Hegemier, S., Gunisetty, P., Kamath, B., Meacham, *Earthquake and fire performance of a mid-rise cold-formed steel-framed building – test program and test results: rapid release (preliminary) report (SSRP-2016/07)*, San Diego, CA, (2016).
- [4] Matthew, S., Hoehler, Christopher, M., Smith Tara. Hutchinson, Xiang Wang, Brian J. Meacham, Praveen Kamath., *Behavior of steel-sheathed shear walls subjected to seismic and fire loads*, *Fire Safety Journal*, (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.021>.
- [5] *Abaqus Standard User's manual*, Version (6.10.1), Karlsson and Sorensen, (2012).
- [6] M., Gholhaki, *Study of Behavior of Thin Steel Plate Shear Walls and Effect of Beam to Column Connections*, Ph.D. Thesis, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, (2007).

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Gh. Pachideh, M. Gholhaki, Y. Noori, *An Investigation into the Impact of Fire on Lateral Stability and Strength of Thin Steel Plate Shear Walls*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(4) (2020)

DOI: 10.22060/ceej.2018.15003.5809







## بررسی اثر آتش بر پایداری و مقاومت جانبی دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک

قاسم پاچیده<sup>۱</sup>، مجید قلهکی<sup>۱\*</sup>، یونس نوری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

<sup>۲</sup>- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۶-۲۸

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۰۵

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۸-۰۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۲۴

### کلمات کلیدی:

دیوار برشی فولادی

آتش سوزی

پایداری

سختی

مقاومت تسلیم.

**خلاصه:** دیوار برشی فولادی به‌عنوان یک سیستم باربر جانبی در برخی سازه‌های بلندمرتبه جهان مورد استفاده قرار گرفته و به‌دلیل سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و جذب انرژی مناسب و هم‌چنین کاهش وزن اسکلت می‌تواند در آینده جایگزین برخی از سیستم‌های باربر مرسوم شود. از طرفی نیز در دهه اخیر خطرات و اثر آتش سوزی بر سیستم سازه‌ای ساختمان‌ها مورد توجه واقع شده که این مساله در سازه‌های بلندمرتبه و خاص دارای اهمیت ویژه‌ای است. در سیستم دیوار برشی فولادی با ورق نازک توجه به ضخامت کم ورق‌های دیوارها، اثرات آتش بر پایداری و کاهش مقاومت جانبی آن‌ها می‌تواند قابل توجه باشد. بر این اساس در این مقاله اثر حرارت ناشی از آتش سوزی بر پایداری، سختی الاستیک و مقاومت تسلیم یک دیوار برشی فولادی سه طبقه مورد مطالعه قرار گرفته‌است. نتایج تحلیل‌های همبند تنش-حرارت نشان داد که افزایش ضخامت ورق باعث کاهش چشم‌گیر تغییرشکل ستون می‌شود. هم‌چنین افزایش ضخامت و تنش تسلیم ورق در کاهش کمتر مقاومت تسلیم و سختی الاستیک سیستم پس از آتش‌سوزی موثر بوده اما در ضخامت ثابت ورق، سختی الاستیک سیستم با افزایش تنش تسلیم ثابت می‌ماند. بر اساس نتایج، روابط ساده‌ای جهت محاسبه کاهش سختی الاستیک و مقاومت تسلیم سیستم پس از آتش‌سوزی، به‌دست آمد.

### ۱- مقدمه

سختی اولیه قابل توجه، مقاومت پس‌کمانشی بالا، جذب انرژی زیاد و کاهش وزن اسکلت سازه برخی از مزایای سیستم دیوار برشی فولادی با ورق نازک است. این خصوصیات برجسته، آن را به گزینه مناسبی برای تحمل بارهای جانبی ناشی از زلزله و باد تبدیل کرده است. ایده استفاده از مقاومت پس‌کمانشی ورق اولین بار توسط تربورن و همکارانش [۱] ارائه و صحت آن به وسیله آزمایش تیملر و کولاک [۲] به اثبات رسید. مطالعات گسترده‌ای به منظور ارزیابی مقاومت، شکل‌پذیری، رفتار هیستریزیس، اثر اتصالات تیر به ستون، اثر بازشو، ضریب رفتار، اثر فولاد نرم و غیره بر روی دیوارهای برشی فولادی صورت پذیرفته که از آن جمله می‌توان به مطالعات و آزمایش

های رابرتز و صبوری [۳]، مطالعات ویان و برونو [۴] و مطالعات قلهکی [۵] اشاره نمود. هم‌چنین روش‌هایی نیز برای تحلیل و طراحی پانل‌های برشی فولادی ارائه شده که از جمله می‌توان به مدل نواری پیشنهادی توربرن و همکاران [۱] و مدل اندرکنش ورق با قاب توسط صبوری و رابرتز [۶] اشاره نمود که این مدل از جامعیت بیشتری نسبت به مدل نواری برخوردار بوده و برای دیوارهای تقویت شده نیز کاربرد دارد. اما در عوض، مدل نواری، سهولت در امر محاسبات دیوارهای برشی فولادی بدون تقویت را فراهم می‌کند.

نظر به تاثیر عوامل محیطی بر عملکرد رفتار سازه‌ها، مخصوصاً سازه‌های بلندمرتبه و خاص، لذا می‌بایست خطرات محیطی که ممکن است عملکرد سازه را مختل کند در طراحی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی، آتش سوزی ساختمان‌ها

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Mgholhaki@semnan.ac.ir

هر دو ستون با مقطع BOX و H شکل ساخته شده از فولاد مقاوم در برابر آتش پیشنهاد گردید.

Liew در سال ۲۰۰۸ [۱۱] به بررسی قابلیت بهره‌برداری و استفاده مجدد از ساختمان‌های با قاب فولادی در شرایط انفجار و آتش به کمک روش عددی پیشنهادی پرداخت. روش عددی پیشنهادی بر مبنای رویکرد المان ترکیبی برای مدل‌سازی چهارچوب بزرگ مقیاس می‌باشد و ثابت گردیده است که این روش از دقت قابل قبولی برای تحلیل رفتار اعضاء و ناپایداری قابها ناشی از آثار نرخ بالای کرنش و حرارت آتش می‌باشد. پس از انجام تحلیل‌های متعدد، مشخص گردید که سازه در برابر اثرات مذکور، کاملاً آسیب پذیر بوده که دلیل این نتیجه نیز مقاومت کم در برابر آتش می‌باشد که به موجب آن اعضاء سازه‌های اصلی به دلیل بارهای شدید انفجار، دچار تغییرشکل گردیدند.

Dong و همکارانش در سال ۲۰۰۹ [۱۲] به بررسی پاسخ حرارتی و سازه‌ای قاب فولادی کامپوزیتی دو طبقه با دو دهانه تحت بار حرارتی پرداختند. تحقیقات آن‌ها نتایج آزمایشگاهی آزمایش حرارتی که بر روی سه نمونه بزرگ مقیاس قاب‌های کامپوزیت انجام گرفته را تشریح می‌نماید. این سه آزمایش از نظر تعداد و موقعیت نقاطی که تحت اثر حرارت قرار گرفتند، با یکدیگر متفاوت می‌باشند. از طریق بررسی روند تغییرشکل‌های ایجادشده طی زمان در قاب‌ها، نتایج به دست آمده تحلیل و با یکدیگر مقایسه گردیدند. نتایج بیانگر این واقعیت می‌باشند که تغییرشکل‌های ایجادشده در قاب‌ها، به شدت تابع تعداد و موقعیت نقاطی می‌باشد که در معرض بارگذاری حرارتی قرار گرفتند.

Ruirui و همکارانش در سال ۲۰۱۲ [۱۳] به بررسی آنالیز خرابی پیش‌رونده ساختمان‌های فولادی تحت شرایط آتش پرداختند. از تحقیقات آنها اینطور می‌توان نتیجه‌گیری نمود که قاب‌های مهاربندی نشده با نسبت بارگذاری کمتر و مقطع تیر بزرگتر، دمای گسیختگی بالاتری را نیاز خواهند داشت که طی آن، خرابی کلی در سازه اتفاق می‌افتد. اگرچه تخریب موضعی قاب در شرایطی که نسبت بارگذاری افزایش می‌یابد و مقطع تیر کوچکتر می‌گردد، با سهولت بیشتری به وقوع می‌پیوندد. سیستم مهاربندی به طرز شایانی می‌تواند در جلوگیری از امر خرابی پیش‌رونده کمک نماید. سختی جانبی بیشتر قاب می‌تواند باعث تغییرشکل‌های قائم کوچکتری در

بوده و برای به حساب آوردن اثرات آن در سازه‌ها باید رفتار مصالح و اجزاء مختلف سازه تحت بارگذاری حرارتی مورد بررسی قرار گیرد. تاثیر حرارت بر فولاد از لحاظ خواص مکانیکی با زوال خصوصیات مقاومتی و سختی آن همراه است. حرارت زیاد، بر سختی الاستیک، مقاومت تسلیم و مدول الاستیسیته مصالح فولاد تاثیرگذار بوده و تاکنون مراجع مختلفی از جمله مرکز ملی استاندارد و فناوری آمریکا [۷] این نرخ کاهش را گزارش کرده‌اند. این مرکز، پس از حادثه یازده سپتامبر به طور گسترده به مطالعه خواص مقاومتی فولاد در اثر حرارت پرداخته است. به دلیل انبساط حرارتی فولاد، در اعضاء سازه‌های مقید، نیروهایی مازاد بر نیروهای داخلی اعضا بر آن‌ها اعمال می‌شود که قابل توجه بوده و موجب تغییرشکل‌های بزرگ در سازه شده و می‌بایست در طراحی‌ها مدنظر قرار گیرد.

با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی انجام گرفته در نرم افزار ABAQUS در فضای دوبعدی، لیو و چن [۸] به بررسی اندرکنش میان آثار ناشی از آتش و انفجار بر عملکرد ستون‌ها و قاب‌های یک سازه فولادی پرداختند. به دنبال آن، آنها تحلیل‌های انجام شده را در فضای سه بعدی نیز تکرار نمودند که در مدل‌های اخیرشان، کمانش موضعی به همراه کمانش پیچشی - جانبی تیرها نیز منظور گردید که به موجب آن، هنگامی که ستون‌های بحرانی سازه در معرض آتش قرار گرفتند، دچار کمانش گردیدند و سازه دچار خرابی پیش‌رونده شد [۹].

کو-چن و همکارانش در سال ۲۰۰۵ [۱۰] به بررسی آزمایشگاهی کمانش موضعی ستون‌های فولادی در برابر آتش پرداختند. اهداف اصلی این تحقیق عبارتند از ارزیابی تغییرات مقاومت نهایی ستون‌های فولادی ناشی از نسبت‌های مختلف عرض به ضخامت تحت بارگذاری حرارتی افزایشی، به علاوه بررسی آثار کاهنده ناشی از افزایش حرارت بر مقاومت ستون‌ها و همچنین، تبیین ضوابط طراحی ستون‌های فولادی ساخته شده از فولاد مقاوم در برابر حرارت می‌باشند. بر مبنای نتایج آزمایشگاهی، می‌توان اینطور نتیجه‌گیری نمود که بارهای نهایی ستون‌های ریشه با افزایش نسبت عرض به ضخامت یا درجه حرارت، کاهش می‌یابند. همچنین مشخص گردید که تاثیرات نسبت عرض به ضخامت بر مقاومت نهایی ستون‌های با مقطع BOX در برابر افزایش حرارت، از ستون با مقطع H بیشتر می‌باشد. بر مبنای این مطالعات، دستورالعمل‌های طراحی برای نسبت عرض به ضخامت

ظرفیت باربری جانبی آن نیز حدود ۳۵٪ کاهش می‌یابد. می‌توان گفت که با استناد به نقطه‌نظر ظرفیت باربری جانبی باقیمانده تحت مخاطرات چندگانه، اخذ چنین رفتاری از دیوار، امری قابل پیش بینی متبادر می‌نماید.

بنابراین با مطالعه تحقیقات اخیر در زمینه آتش و سازه های فولادی مخصوصاً سیستم دیوار برشی فولادی، ملاحظه می‌گردد که تحقیقات جدی بر روی رفتار این سیستم صورت نپذیرفته و صرفاً نتایج محدود حاصل شده است. در این مقاله به بررسی رفتار سیستم دیوار برشی فولادی در مقابل آتش و میزان آسیب‌پذیری آن پرداخته شده است. حال آتش یا گرادیان حرارتی به هر شکلی که به سازه وارد شود و دمای فلز را بسیار بالا ببرد، ممکن است موجب کاهش مقاومت دیوار برشی شود. یعنی اگر این دیوار که قبلاً تحت اثر آتش یا گرادیان حرارتی باشد و تعویض و یا تعمیر نشود، ممکن است در مقابل بارهای جانبی همانند زلزله عملکرد درستی نداشته باشد، پس باید عملکرد آن قبل از آمدن زلزله بررسی شود. بنابراین نوآوری و هدف اصلی مقاله، ایجاد ارتباط بین مقدار گرادیان حرارتی و مقدار کاهش مقاومت یا سختی جانبی دیوار با ضخامت‌ها (۵/۰، ۲ و ۴ میلی‌متر) و مقاومت های تسلیم (۱۸۰ و ۲۴۰ مگاپاسکال) مختلف می‌باشد که به کمک روابط ریاضی درجه اول مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مدل‌سازی، صحت‌سنجی و تحلیل تنش

به لحاظ اهمیت تاثیر آتش بر رفتار سیستم های مقاوم، در این مقاله سعی شده است که اثر آتش بر روی پایداری و عملکرد سیستم دیوار برشی فولادی با ورق نازک مطالعه شود. بر این اساس ابتدا یک نمونه دیوار برشی فولادی سه طبقه با اتصالات تیر به ستون صلب در نمافزار اجزاء محدود مدل‌سازی شده و سپس اثرات آتش بر روی آن بررسی می‌گردد. ابتدا به منظور صحت سنجی مدل‌سازی‌ها در نرم افزار آباکوس [۱۷]، مدل سه طبقه آزمایشگاهی [۵] مطابق شکل ۱ با انتخاب مدول الاستیسیته برابر ۲۰۶ گیگاپاسکال و ضریب پواسون برابر ۰/۳ و پارامترهای مکانیکی مطابق جدول ۱ ساخته شد.

به دلیل رخ دادن کمانش های متعدد و وارد شدن ورق به ناحیه پس کمانش، تحلیل های کامپیوتری دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک دارای مشکلات زیادی بوده و تحلیل تغییرشکل های بزرگ به

ستون گسیخته شده در شرایط پایداری مجدد گردد. اگرچه دمای گسیختگی کلی قاب، هیچگونه حساسیتی به سختی جانبی آن ندارد. در سال ۲۰۱۶ عملکرد یک سازه فولادی شش طبقه ساخته شده از پروفیل های سرد نوردشده با استفاده از میز لرزه بزرگ‌مقیاس در دانشگاه کالیفرنیا تحت بررسی‌های آزمایشگاهی قرار گرفت. سیستم باربر جانبی سازه متشکل از اعضای فولادی سرد نوردشده دارای غلاف فولادی بود که روی آنها با استفاده از صفحات گچی پوشانده شده بود. به دلیل مزایای فراوان استفاده از مصالح سبک از جمله کاهش هزینه ها و افزایش سرعت ساخت، امروزه از این مصالح و چنین تکنولوژی‌هایی به طور گسترده در مناطق لرزه‌خیز واقع در غرب کشور آمریکا استفاده می‌گردد. به منظور آشنایی و دریافت اطلاعات در خصوص نحوه طراحی و ساخت این دیوارها برای مقاصد لرزه‌های خوانندگان علاقه‌مند به این سیستم ها به گزارشی که توسط مرجع NEHRP در خصوص طراحی لرزه‌های سیستم های باربری جانبی متشکل از فولاد سرد نوردشده منتشر گردیده است، رجوع نمایند [۱۴]. هدف اصلی بررسی عملکرد لرزه ای این روش ساخت برای سازه های میان‌مرتبه (۵ تا ۱۰ طبقه) به انضمام مطالعه پاسخ سازه های آسیب دیده در اثر زلزله به پدیده آتش می‌باشد. پس از انجام آزمایش های آتش سوزی، سازه ها در معرض تحریکات ناشی از زلزله قرار گرفتند تا بدین طریق بتوان پاسخ سازه های آسیب دیده ناشی از آتش را در برابر پس لرزه های ناشی از زمین لرزه ارزیابی نمود. هدف از انجام آزمایش های پس لرزه، کمک جهت اخذ تصمیم در خصوص دسترسی نخستین پاسخ‌دهنده به ساختمان در شرایط هم زمانی آتش‌سوزی و زمین‌لرزه، هم‌چنین ارزیابی در خصوص تعمیر در مقابل جایگزینی می‌باشد. کلیه جزئیات مربوط به این ساختمان شش طبقه در مرجع [۱۵] موجود می‌باشند.

Matthew و همکارانش در سال ۲۰۱۶ [۱۶] به بررسی رفتار ورق دیوار برشی فولادی تحت بارهای لرزه‌ای و آتش پرداختند. تعدادی آزمایش بر روی ۶ نمونه دیوار برشی با ابعاد ۲/۷ در ۳/۷ متر که قاب های اطراف آن همگی از فولاد سرد نوردشده که یک طرف آنها با استفاده از صفحات فولادی و طرف دیگر به وسیله صفحات گچی پوشانده شده بود، مورد آزمایش قرار گرفتند. بر مبنای نتایج به دست آمده، آتش باعث تغییر مود خرابی دیوار می‌گردد. بدین صورت که کمانش موضعی ورق فولادی به کمانش کلی تبدیل می‌گردد و

جدول ۱. خصوصیات مکانیکی اجزاء نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی

Table 1. Mechanical properties of laboratory components of steel shear wall

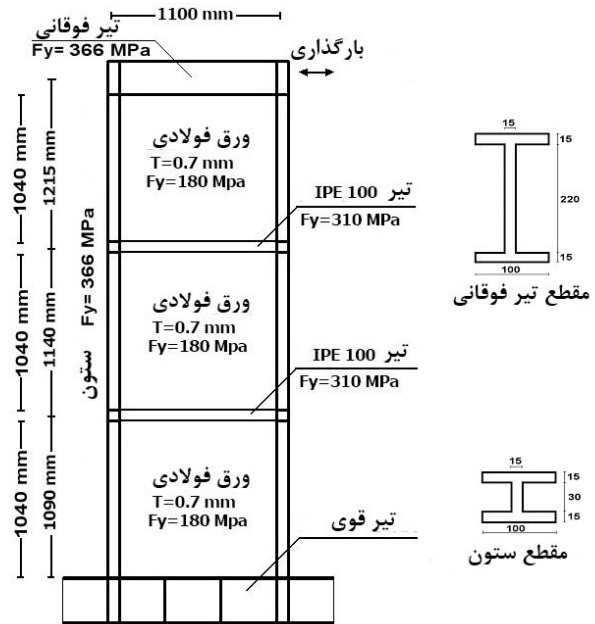
اعضاء	تنش تسلیم (N/mm <sup>2</sup> )	تنش نهایی (N/mm <sup>2</sup> )
ورق	۱۸۰	۳۰۰
تیرهای میانی	۳۱۰	۴۴۶
ستون و تیر فوقانی	۳۶۶	۵۵۰

مدل سازی ها استفاده شد.

همچنین هر دو نوع غیرخطی شدن مصالح و هندسه در تحلیل ها لحاظ گردید. برای سادگی، از مدل پلاستیسیته دو خطی با سخت شوندگی سینماتیکی و تابع تسلیم فون مایسز استفاده گردید. شیب قسمت سخت شونده نمودار تنش- کرنش برابر ۵ درصد قسمت الاستیک در نظر گرفته شد.

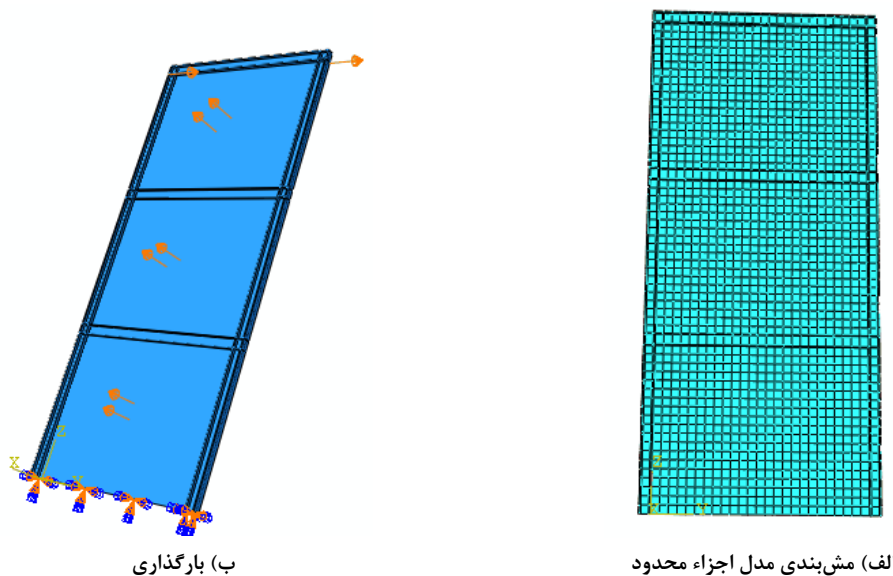
در نرم افزارهای اجزاء محدود چنانچه فرض ناصافی اولیه در مرکز ورق ها در نظر گرفته نشود، ورق تحت بار داخل صفحه دچار کمانش نشده و بدین ترتیب سختی و بار تسلیم دیوار، بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده می شود. بر این اساس پس از آنالیز حساسیت نسبت به اعوجاج اولیه، در نهایت جهت تحلیل ها، ۳ میلی متر اعوجاج اولیه به وسط ورقها اعمال گردید.

در شکل ۲ تصاویر مش بندی و بارگذاری مدل اجزاء محدود سیستم دیوار برشی فولادی در نرم افزار آباکوس نشان داده شده



شکل ۱. نمای کلی و جزئیات نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی  
Fig. 1. General view and details of laboratory sample of steel shear wall

کار رفته می تواند تاثیر زیادی بر نتایج داشته باشد. در ورقهای نازک به علت کمانش های متعدد در نواحی مختلف، همگرایی عددی به سختی صورت پذیرفته، لذا شبکه بندی ریز برای ورق لازم است، که پس از تحلیل حساسیت شبکه بندی، از ابعاد مش ۵۰ میلی متری جهت تحلیل ها استفاده شد. از طرف دیگر به دلیل وسیع بودن دامنه تغییرات تنش، لذا از المان Shell S4R در



شکل ۲. تصاویر مش بندی و بارگذاری  
Fig. 2. Grid and upload images A) Comparison of finite element model b) Loading

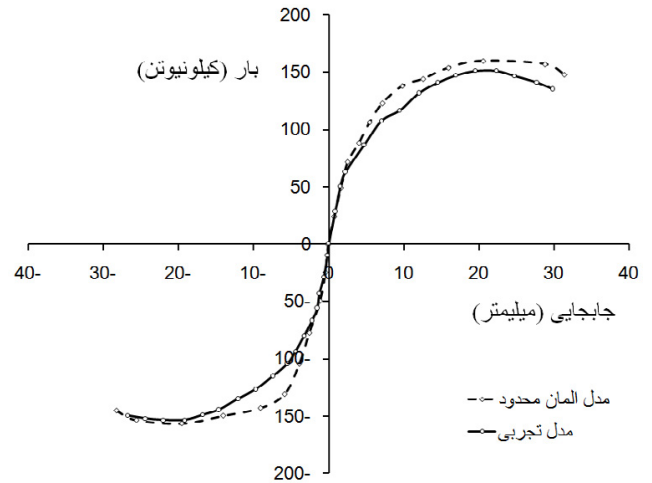


حرارت باعث کاهش مدول الاستیسیته و تنش تسلیم فولاد شده که این کاهش خصوصیات مکانیکی، باعث کاهش مقاومت کلی عضو تحت اثر حرارت شده و به ازاء یک بار ثابت، با گذشت زمان مقاومت و به تبع آن پایداری به شدت کاهش می‌یابد. تاثیر دیگر افزایش حرارت بر فولاد، افزایش میزان ضریب انبساط حرارتی فولاد است. این خصوصیت، در سازه های مقید و بدون درجه آزادی انتقالی می‌تواند باعث ایجاد تنش های اضافی حاصل از افزایش طول عضو شود.

با استفاده از نتایج آزمایش های اسکلیچ و همکارانش [۱۸] در مدل سازی ها، خصوصیات مکانیکی فولادها شامل مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و حد تسلیم نسبی آنها مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شد. مطابق شکل ۴، مقادیر مدول الاستیسیته و تنش تسلیم بین دمای ۲۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد دچار کاهش نشده و حتی تنش تسلیم تا دمای ۴۰۰ درجه نیز کاهش نمی‌یابد. اما پس از آن و تا دمای بین ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد هر دو مقدار مدول الاستیسیته و تنش تسلیم فولاد به شدت کاهش یافته و در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد به صفر می‌رسند، (نقطه ذوب فولاد ۱۵۵۰ درجه است).

به عبارت دیگر در این دما عضو فولادی هیچ مقاومتی در برابر بارهای وارده نداشته که البته در واقعیت به دلیل اینکه عضو، قبل از رسیدن به این دما دچار کماتش های موضعی و کلی می‌شود، لذا زودتر از حالت باربری خارج می‌شود.

همچنین مطابق نتایج اسکلیچ و همکاران [۱۹]، نمودار تنش- کرنش فولاد در دماهای مختلف از شکل ۵ تبعیت نموده و مقادیر نقاط مختلف آن مطابق جدول ۲ محاسبه می‌شود.



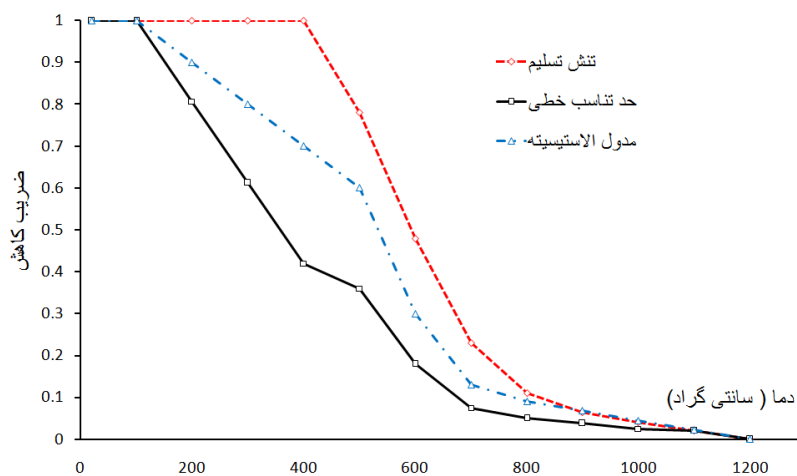
شکل ۳. مقایسه نتایج روش اجزاء محدود با نتایج آزمایشگاهی  
Fig. 3. Comparison of finite element method results with laboratory results

است.

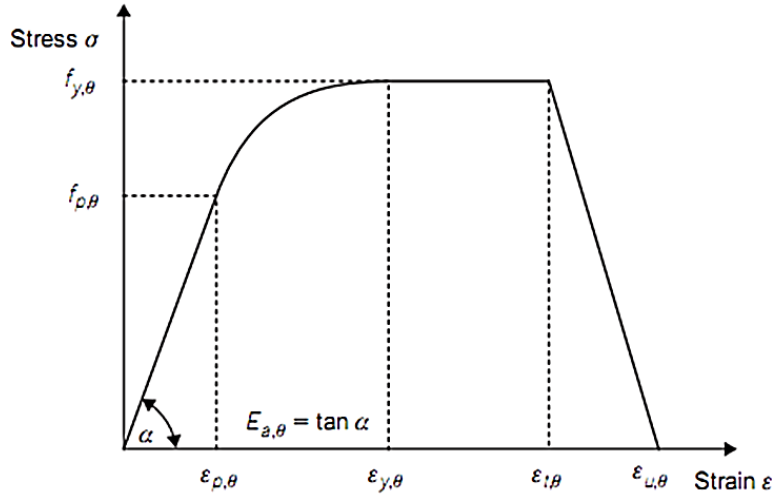
به منظور کالیبره نمودن مدل، تحلیل استاتیکی غیرخطی با اعمال تغییرمکان افزایشنده به تیر طبقه سوم انجام شد. در شکل ۳ منحنی به دست آمده از تحلیل اجزاء محدود در مقایسه با پوش منحنی چرخه‌ای آزمایشگاهی مدل سه طبقه آورده ست. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودارهای به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و عددی، در سختی اولیه و بار تسلیم‌شدگی تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

### ۳- خصوصیات فولاد در حرارت

حرارت بر مشخصات مکانیکی فولاد اثر کاهنده دارد. افزایش



شکل ۴. منحنی پارامترهای مقاومتی فولاد  
Fig. 4. Curve of steel resistance parameters



شکل ۵. منحنی تنش- کرنش فولاد در دماهای مختلف [۱۹]

Fig. 5. Stress-strain curve of steel at different temperatures

جدول ۲. روابط مربوط به تعیین منحنی تنش-کرنش فولاد در دماهای مختلف [۱۹]

جدول ۲. روابط مربوط به تعیین منحنی تنش-کرنش فولاد در دماهای مختلف [۱۹]

جدول ۲. روابط مربوط به تعیین منحنی تنش-کرنش فولاد در دماهای مختلف [۱۹]

جدول ۲. روابط مربوط به تعیین منحنی تنش-کرنش فولاد در دماهای مختلف [۱۹]

Table 2. Relationships related to determining the stress-strain curve of steel at different temperatures

محدوده کرنش	تنش	مدول مماسی
$\varepsilon \leq \varepsilon_{\rho,\theta}$	$E\varepsilon$	$E$
$\varepsilon_{\rho,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{\rho,\theta} - c + (b/a) [a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0.5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0.5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} [1 - \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta})}{(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})}]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0	-
Parameters	$\varepsilon_{y,\theta} = 0.02 \varepsilon_{\rho,\theta} = f_{\rho,\theta} / E_{a,\theta}$ $\varepsilon_{t,\theta} = 0.15 \varepsilon_{u,\theta} = 0.2$	
Functions	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{\rho,\theta})^2 + c^2$ $(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{\rho,\theta} + c / E_{a,\theta})$	
	$b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{\rho,\theta})E_{a,\theta} + c^2$	$c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{\rho,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{\rho,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{\rho,\theta})}$

بر اساس روابط جدول ۲ و برای دماهای مختلف، منحنی‌های تنش-کرنش مورد استفاده در تحلیل‌ها مطابق شکل ۶ استخراج گردید.

انجمن مهندسان عمران آمریکا (ASCE) [۲۰] مقدار ضریب انبساط حرارتی فولاد را در دماهای مختلف مطابق روابط ۱ و ۲ ارائه نموده است.

$$\alpha = (0.004T + 12) \cdot 10^{-6} \quad (1/^\circ\text{C}) \quad T < 1000^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\alpha = 16 \cdot 10^{-6} \quad (1/^\circ\text{C}) \quad T \geq 1000^\circ\text{C} \quad (2)$$

که در آنها، T میزان دما بر حسب درجه سانتیگراد است. مطابق پیشنهاد ASTM [۲۱] خصوصیات حرارتی فولاد شامل گرمای ویژه ( $C_p$ ) و ضریب انتقال حرارت ( $a$ ) جهت انجام تحلیل حرارتی به ترتیب از روابط ۳ تا ۷ به دست می‌آید.

$$C_p = 425 + 0.773T - 1.69 \cdot 10^{-3}T^2 + 2.22 \cdot 10^{-6}T^3 \quad T < 600^\circ\text{C} \quad (3)$$

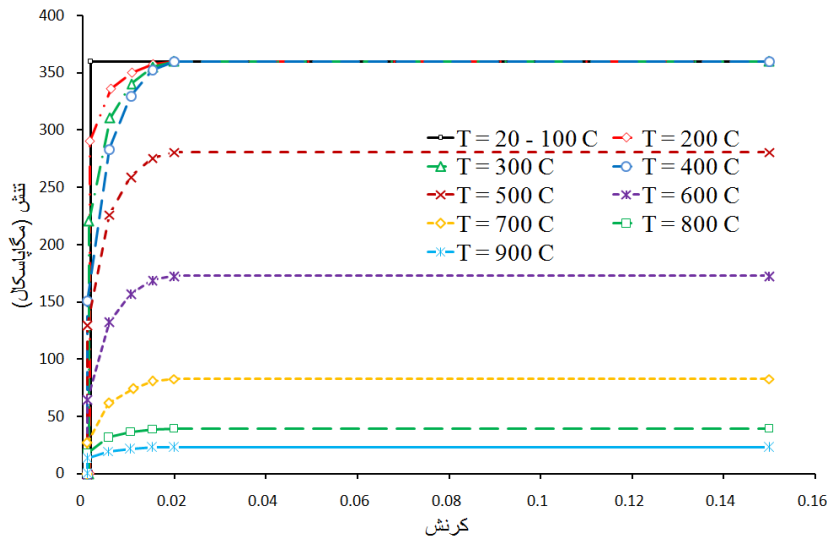
$$C_p = 666 + \frac{13002}{738 - T} \quad 600^\circ\text{C} \leq T < 735^\circ\text{C} \quad (4)$$

که در آن،

$E_{a,\theta}$  برابر  $\tan \alpha$  (آلفا شیب اولیه یا مدول الاستیسیته)

(منحنی در ناحیه خطی)

$\varepsilon_{\rho,\theta}$  و  $f_{\rho,\theta}$  برابر کرنش و تنش ناحیه خطی



شکل ۶. منحنی‌های تنش-کرنش فولاد جهت تحلیل  
 Fig. 6. Stress-strain curves of steel for analysis

بوده و فقط طبقه اول شامل تیر و ستون و ورق پانل به‌طور مستقیم و هم‌زمان در معرض آتش مستقیم قرار گرفته‌اند. مطابق تحلیل حرارتی، ارزیابی نرخ افزایش دمای اعضاء طبقات اول تا سوم صورت پذیرفت. تغییرات دما بر حسب زمان بر اساس پیشنهاد ASTM [۲۱] از منحنی شکل ۷ تبعیت می‌کند که در واقع برای شبیه‌سازی عملیات آتش و حرارت ناشی از آن به‌کار می‌رود. معادله منحنی شکل ۶ بر اساس پیشنهاد لی [۲۲] از رابطه ۸ تبعیت می‌کند.

$$T = 750(1 - e^{(-3.79553\sqrt{t_b})}) + 170.41\sqrt{t_b} + T_0 \quad (8)$$

در رابطه ۸ پارامتر  $t_b$ ، مدت زمان آتش‌سوزی بر حسب ساعت بوده و  $T$  و  $T_0$  به ترتیب دمای اولیه و ثانویه عضو بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

شکل ۸ نحوه توزیع حرارت بین اعضاء مختلف دیوار برشی فولادی سه طبقه را نشان می‌دهد.

در تحلیل‌های حرارتی، در وسط هر عضو (تیر، ستون و ورق) یک نقطه به‌عنوان سنجه برای ثبت تاریخچه حرارتی عضو انتخاب و تغییرات دما بر حسب زمان مطابق شکل ۹ برای هر عضو به‌دست آمد. لازم‌به‌ذکر است که در تحلیل حرارتی، انتقال حرارت تنها از طریق رسانش صورت گرفته و از اثر تشعشع به‌دلیل اثرات اندک، صرف‌نظر گردیده‌است.

$$C_p = 545 + \frac{17820}{T - 731} \quad 735^\circ\text{C} \leq T < 900^\circ\text{C} \quad (5)$$

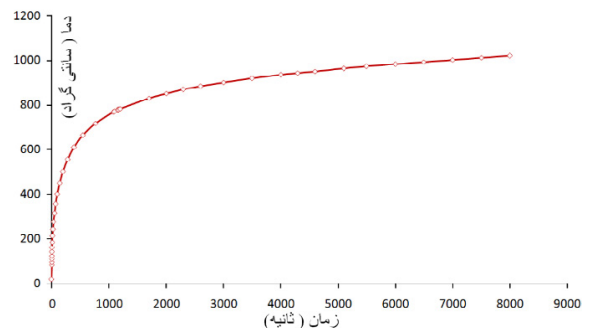
$$C_p = 650 \quad T \geq 900^\circ\text{C} \quad (6)$$

$$\lambda_a = 54 - \frac{T}{30} \geq 27.33 \quad (7)$$

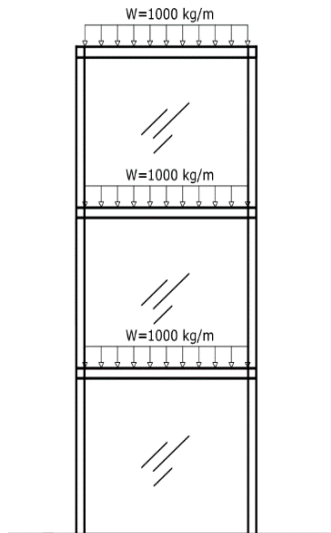
هم‌چنین وزن مخصوص فولاد، ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضریب پواسون آن برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده و از تغییرات ضریب پواسون با دما به دلیل اندک بودن، صرف‌نظر گردید.

#### ۴- تحلیل حرارتی

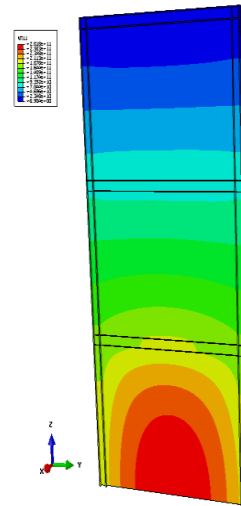
پس از حصول اطمینان از مدل‌سازی صحیح سازه‌های دیوار برشی فولادی سه طبقه، تحلیل حرارتی مدل تحت آتش صورت پذیرفت. در این تحلیل فرض شد که کلیه اعضاء دیوار در برابر آتش بدون حفاظت



شکل ۷. منحنی دما - زمان فولاد مطابق پیشنهاد ASTM  
 Fig. 7. Temperature-time curve of steel according to ASTM proposal



شکل ۱۰. بارگذاری ثقلی دیوار برشی فولادی  
Fig. 10. Gravity loading of steel shear wall



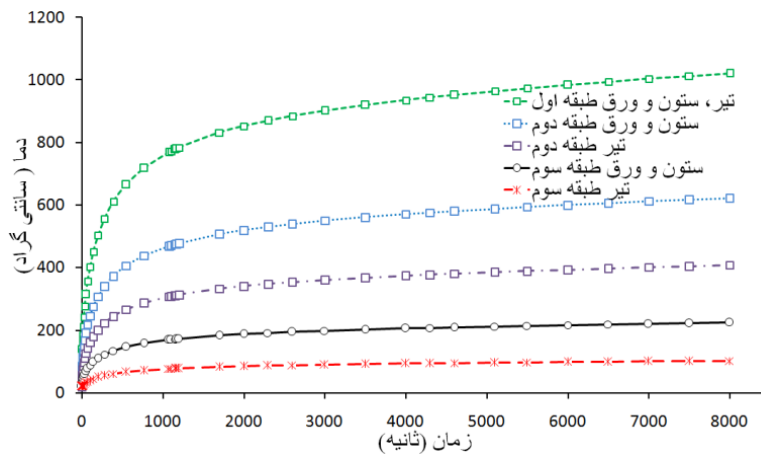
شکل ۸. نحوه توزیع حرارت بین اعضاء دیوار برشی فولادی سه طبقه  
Fig. 8. How to distribute heat between the members of a three-story steel shear wall

(مربوط به تجهیزات و وسائل) وارد بر تیرها برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر در نظر گرفته شد، (شکل ۱۰). همچنین از جابجائی در راستای عمود بر پانل به دلیل وجود سقف طبقات، ممانعت به عمل آمد. تحلیل همبند تنش-حرارت در دو بخش دنبال و خصوصیات رفتاری دیوار برشی فولادی مورد بررسی قرار گرفت. در بخش اول تاثیر آتش در حالت بار ثقلی و در بخش دوم اثرات بار جانبی بر روی دیوار کاهش مقاومت یافته، بررسی گردید. در این حالت فرض گردید که پس از آتش سوزی و کاهش خصوصیات مقاومتی دیوار، دیوار برشی تعویض یا مقاوم سازی نگردیده و در معرض زلزله قرار گرفته است.

با توجه به توزیع نرخ افزایش دما بر حسب زمان مطابق شکل ۹، و با استفاده از پارامترهای جدول ۲ و روابط ۱ تا ۸، تغییر مشخصات مکانیکی فولاد با دما در زمان های مختلف گسترش آتش برای هر عضو محاسبه و در تحلیل همبند (کوپل) تنش-حرارت به کار گرفته شد.

### ۵- تحلیل همبند (کوپل) تنش-حرارت

به منظور تحلیل سازه تحت بار ثقلی و بررسی اثرات آتش سوزی بر روی آن، دیوار برشی فولادی سه طبقه تحت تحلیل همبند تنش-حرارت قرار گرفت. در حالت آتش سوزی، شدت بار مرده و زنده



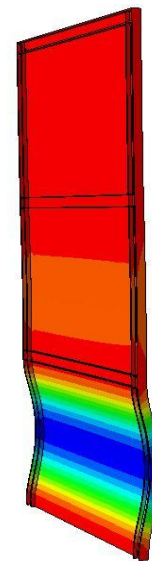
شکل ۹. توزیع دما بر حسب زمان، بین اعضاء دیوار برشی فولادی سه طبقه  
Fig. 9. Temperature distribution over time, between members of a three-story steel shear wall

### ۵-۱- تحلیل اثر آتش در حالت بار ثقلی

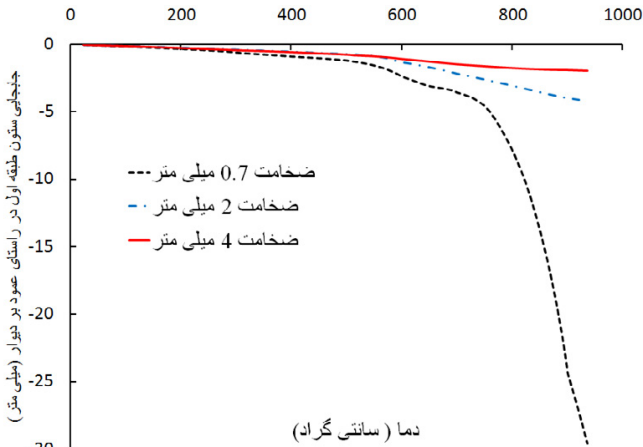
در این تحلیل ابتدا بار ثقلی بر سازه وارد و پانل قبل از وقوع آتش‌سوزی تحت تنش قرار گرفت. سپس پانل طبقه اول در معرض آتش قرار داده شد. با گسترش تدریجی آتش و حرارت از طبقه اول به دیگر طبقات مطابق شکل ۹، خصوصیات مکانیکی اعضاء کاهش پیدا نموده که با توجه به بیشتر بودن حرارت در طبقات پائینی، میزان کاهش مقاومت اعضاء طبقه اول از سایر اعضاء دیگر طبقات بیشتر بوده و ناپایداری و خرابی پانل در این طبقه مشاهده می‌شود (شکل ۱۱). با کماتش کلی دیوار حول محور ضعیف ستون، پانل طبقه اول از باربری خارج می‌شود.

به‌منظور بررسی اثر ضخامت ورق بر پایداری دیوار، این تحلیل‌ها با سه ضخامت ورق مختلف ۰/۷، ۲ و ۴ میلی‌متر انجام شد. شکل ۱۲، میزان جابجایی عمود بر صفحه ستون طبقه اول را در مدل‌های با ضخامت ورق متفاوت نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود با تغییر ضخامت ورق از ۰/۷ به ۲ میلی‌متر، تغییرشکل ستون ۸۶٪ و با تغییر ضخامت ورق از ۲ به ۴ میلی‌متر، تغییرشکل ستون ۵۳٪ کاهش یافته‌است. همچنین در دمای حدود ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، نرخ افزایش تغییرشکل ورق ۰/۷ میلی‌متری ۱۸/۳ برابر ورق ۲ میلی‌متری بوده و نرخ افزایش تغییرشکل ورق ۲ میلی‌متری ۶ برابر ورق ۴ میلی‌متری می‌باشد. کماتش و جابجایی جانبی ستون بر پایداری آن تاثیر مستقیم گذاشته



شکل ۱۱. تغییرشکل دیوار برشی فولادی تحت بار ثقلی و حرارت  
Fig. 11. Deformation of a steel shear wall under gravity and heat



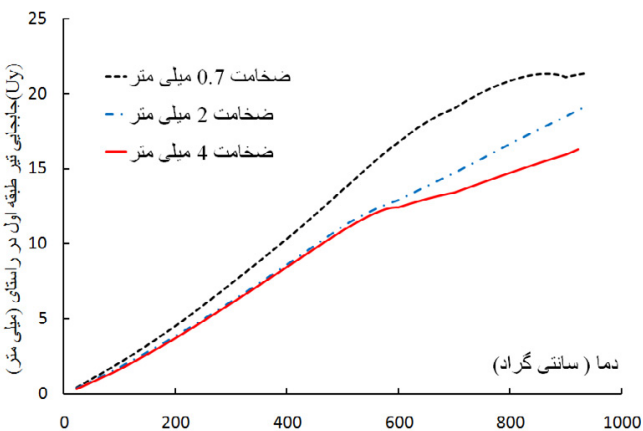
شکل ۱۲. جابجایی عمود بر صفحه ستون طبقه اول در ضخامت‌های مختلف ورق

Fig. 12. Displacement perpendicular to the plane of the first floor column in different sheet thicknesses

و باعث ناپایداری سازه می‌شود. لذا به نظر می‌رسد باید با ایجاد پوشش مناسب بر روی ستون‌ها از ناپایداری آن‌ها جلوگیری نمود.

شکل ۱۳ جابجایی نقطه میانی تیر طبقه اول در راستای قائم را نشان می‌دهد. با افزایش ضخامت ورق از ۰/۷ به ۲ میلی‌متر، تغییرشکل تیر ۱۰٪ و با افزایش ضخامت ورق از ۲ به ۴ میلی‌متر، تغییرشکل تیر ۱۵٪ کاهش پیدا کرده‌است.

در شکل ۱۴ جابجایی تیر طبقه اول در راستای افقی نشان داده شده که بیانگر میزان انبساط تیر طبقه اول است. در فاصله دمای بین ۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، نرخ میزان افزایش طول تیر در ضخامت ورق ۰/۷ میلی‌متر، ۱/۶۷ برابر حالت ورق ۲ میلی‌متری و ۲/۱ برابر حالت ورق ۴ میلی‌متری است. اصولاً افزایش طول تیر بدون

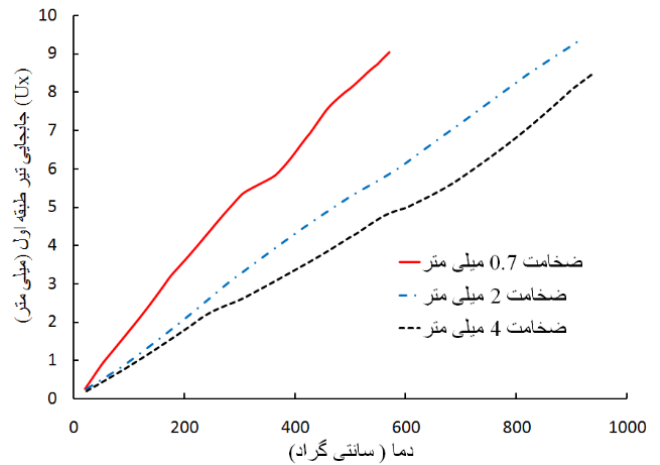


شکل ۱۳. جابجایی تیر طبقه اول در راستای قائم

Fig. 13. Moving the first floor beam in the vertical direction

در معرض حرارت‌های مختلف ناشی از آتش‌سوزی قرار گرفته و در پایان هر حرارت، نیروی جانبی در تراز طبقه سوم بر آن اعمال گردیده و مقاومت سیستم اندازه‌گیری می‌شود. این بدان معناست که می‌توان مقاومت تسلیم و سختی الاستیک سیستم را پس از هر سطح تخریبی آتش‌سوزی محاسبه نمود. به‌منظور بررسی اثر ضخامت‌های مختلف ورق و تنش‌های تسلیم متفاوت آن، ورق‌های با ضخامت‌های ۲، ۰/۷ و ۴ میلی‌متر و تنش‌های تسلیم ۱۸۰ و ۲۴۰ مگاپاسکال مدل‌سازی گردیده و مقاومت تسلیم سیستم در دماهای گوناگون محاسبه گردید. با افزایش حرارت و توزیع آن بین اعضاء مختلف سیستم، مقاومت هر عضو کاهش یافته و در نتیجه مقاومت جانبی کل سیستم مطابق شکل ۱۵، کاهش یافت.

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت و تنش تسلیم ورق، مقاومت جانبی افزایش یافته‌است. به‌طوری‌که در ورق با ضخامت ۴ میلی‌متر، به‌ازاء افزایش تنش تسلیم از ۱۸۰ به ۲۴۰ مگاپاسکال، مقاومت تسلیم به‌طور متوسط ۲۴٪ و به‌ازاء ورق به ضخامت ۲ و ۰/۷ میلی‌متر به‌ترتیب ۴۶٪ و ۳۶٪، افزایش یافته‌است. در دمای بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد میزان افت یکباره مقاومت تسلیم زیاد بوده که مربوط به توزیع حرارت در تمامی اعضاء می‌باشد. به‌گونه‌ای که به‌عنوان مثال برای ورق با تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال در ضخامت ۰/۷ میلی‌متر ۳۰٪ و در ورق‌های ۲ و ۴ میلی‌متر به‌ترتیب ۲۳٪ و ۳۲٪ افت یکباره مقاومت تسلیم در بازه تغییرات دمای ۱۰۰ درجه‌ای رخ داده‌است.



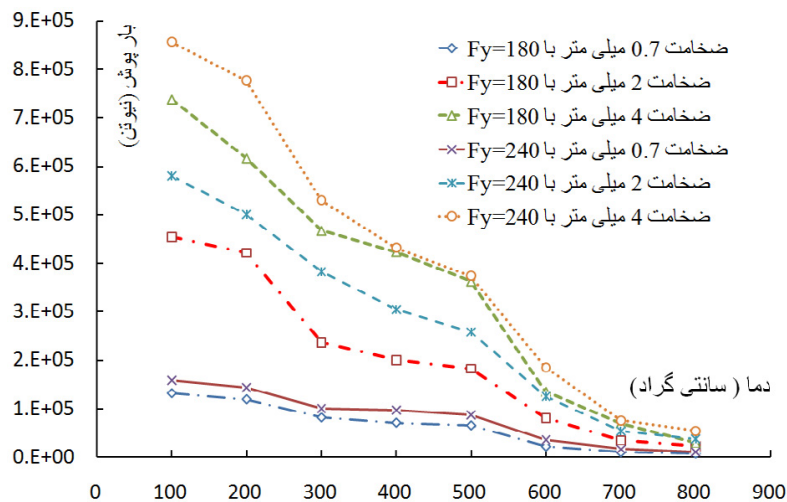
شکل ۱۴. جابجائی افقی تیر طبقه اول  
Fig. 14. Horizontal displacement of the first floor beam

وجود فاصله مناسب تا ستون باعث اعمال نیروی زیادی به ستون‌ها شده و پایداری ستون را با اختلال مواجه می‌کند. که در این سیستم به دلیل اتصال ورق‌ها به تیرها و ستون‌ها، امکان اجرای چنین درزی نمی‌باشد.

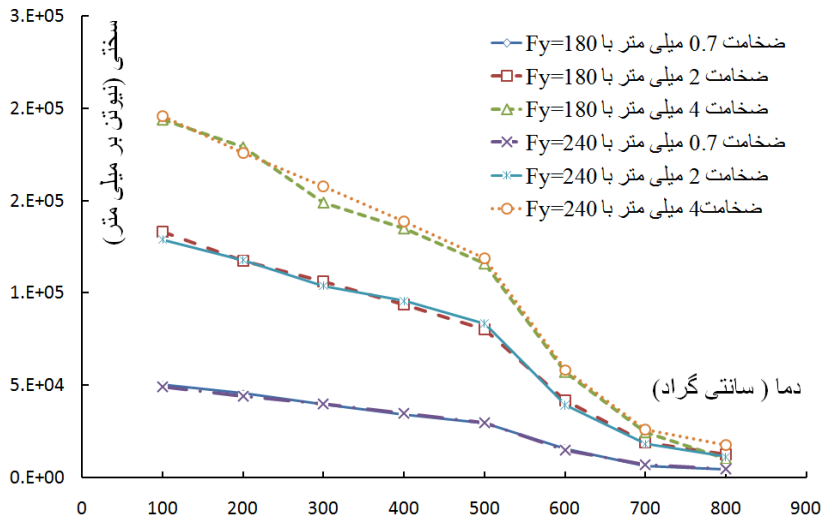
## ۲-۵- ارزیابی رفتار دیوار برشی فولادی تحت بار جانبی

### پس از آتش‌سوزی

به‌منظور ارزیابی مقاومت تسلیم و سختی جانبی الاستیک دیوار برشی فولادی سه طبقه پس از رخداد آتش‌سوزی، تحلیل همبند حرارت-تنش صورت پذیرفت. در این تحلیل ابتدا دیوار دارای بار ثقیلی



شکل ۱۵. مقاومت تسلیم دیوار برشی فولادی در دماهای متفاوت  
Fig. 15. yield strength of steel shear wall at different temperatures



شکل ۱۶. سختی جانبی الاستیک دیوار برشی فولادی  
Fig. 16. Elastic lateral stiffness of steel shear wall

۱۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته‌است.

معادلات هر یک از خطوط برازش داده‌شده در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ به منظور تعیین مقاومت تسلیم (Py) هر مدل، در جدول ۳ ارائه شده‌است. در این روابط، دما بر حسب درجه سانتی‌گراد و مقاومت

جدول ۳. روابط مقاومت تسلیم مدل‌ها در دماهای گوناگون

Table 3. The yield strength relationships of the models at different temperatures

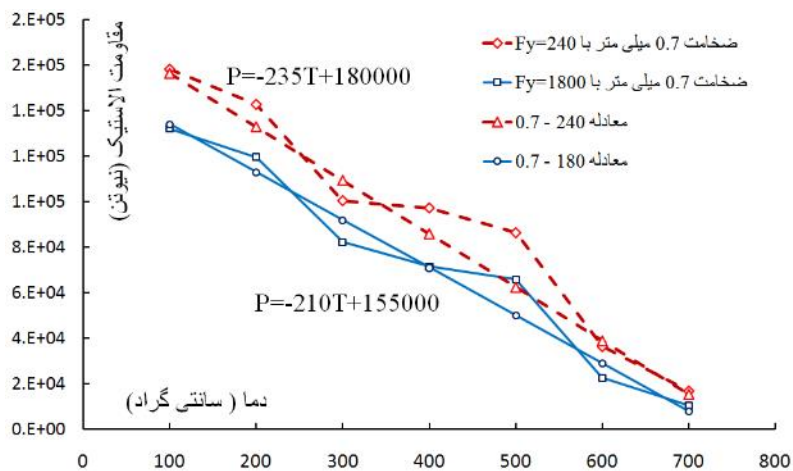
	$F_y = 180 \text{ MPa}$	$F_y = 240 \text{ MPa}$
$t = 0.5 \text{ mm}$	$P_T = -210T + 155000$	$P_T = -235T + 180000$
$t = 2 \text{ mm}$	$P_T = -900T + 530000$	$P_T = -210T + 670000$
$t = 4 \text{ mm}$	$P_T = -1150T + 860000$	$P_T = -1250T + 960000$

مطابق تحلیل‌های همبند تنش-حرارت، سختی الاستیک سیستم

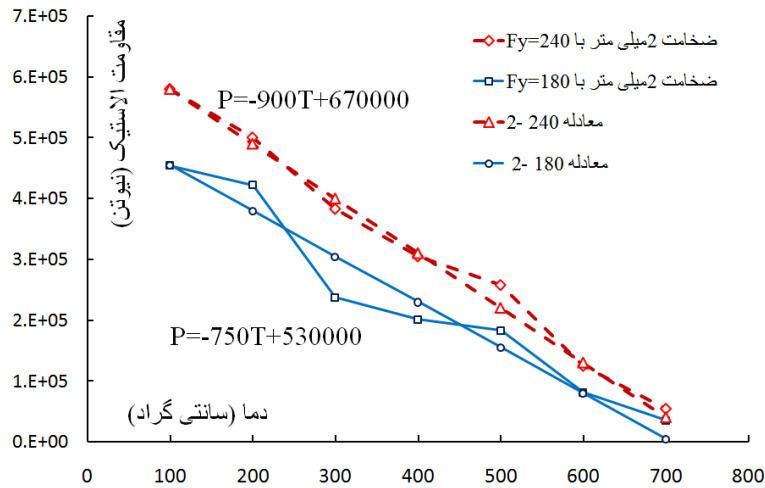
در دماهای مختلف مطابق شکل ۱۶ به دست آمد.

همانطور که مشاهده می‌شود در یک ضخامت ثابت ورق، افزایش تنش تسلیم تاثیر چندانی بر افزایش سختی الاستیک دیوار ندارد. بر خلاف مقاومت تسلیم که در یک ضخامت ثابت ورق، افزایش تنش تسلیم باعث بالارفتن مقاومت تسلیم می‌شود.

بر اساس نتایج فوق و به منظور سهولت در تعیین مقاومت تسلیم دیوار برشی فولادی سه طبقه، مطابق شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ خطوط با روابط ساده‌ای، بر نتایج ورق‌های با ضخامت و تنش تسلیم متفاوت، برازش داده شده‌است. لازم به ذکر است که این برازش در بازه حرارتی



شکل ۱۷. تغییرات مقاومت تسلیم مدل دارای ورق ۰/۷ میلی‌متر با حرارت  
Fig. 17. Changes in yield strength of model with 0.7 mm sheet with heat



شکل ۱۸. تغییرات مقاومت تسلیم مدل دارای ورق ۲ میلی‌متر با حرارت  
 Fig. 18. Changes in the yield strength of a model with a 2 mm sheet with heat

جدول ۴. روابط سختی الاستیک مدل‌ها در دماهای گوناگون

Table 4. Elastic stiffness relationships of models at different temperatures

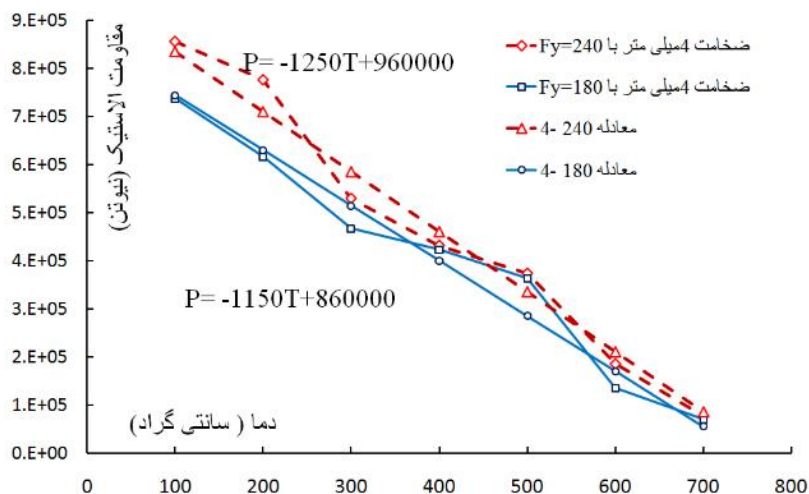
	t=0.5 mm	t = 2 mm	t = 4 mm
$F_y=180, 240 \text{ MPa}$	$K = -75T + 57500$	$K = -190T + 150000$	$K = -270T + 220000$

### ۶- نتیجه‌گیری

به‌منظور بررسی پایداری و تعیین سختی الاستیک و مقاومت تسلیم دیوار برشی فولادی با ورق نازک سه‌طبقه از تحلیل همبند تنش-حرارت و روابط پیشنهادی مراجع معتبر، در دو حالت اثر آتش در زمان حضور بار ثقلی و اثر آتش بر کاهش خصوصیات رفتاری

تسلیم بر حسب کیلونیوتن می‌باشد.

هم‌چنین جدول ۴ معادلات مربوط به سختی الاستیک (K) دیوار برشی فولادی سه‌طبقه را برای ضخامت‌های مختلف ورق نشان می‌دهد. در این روابط، دما بر حسب درجه سانتی‌گراد و سختی الاستیک بر حسب کیلونیوتن بر میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱۹. تغییرات مقاومت تسلیم مدل دارای ورق ۴ میلی‌متر با حرارت  
 Fig. 19. Changes in the yield strength of a model with a 4 mm sheet with heat



- on Earthquake Engineering, Paper No.978, Vancouver British Columbia, Canada, 2004.
- [5] Gholhaki, M., "Study of Behavior of Thin Steel Plate Shear Walls and Effect of Beam to Column Connections", PhD Thesis, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, 2007.
- [6] Sabouri-Ghomi, S., Roberts, T., "Nonlinear Dynamic Analysis of Steel Plate Shaer Walls Including Shear and Bending Deformations", Engineering Structural, 1992, 5, 309-317.
- [7] National Institue of Standards and Technology, Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster, Department of Commerce USA, 2005.
- [8] Liew J. Y. R., Chen, H., "Explosion and fire analysis of steel frames using fiber element approach," Journal of Structural Engineering, 2004, 130(7), 991-1000.
- [9] Liew J. Y. R., Chen, H., "Direct analysis for performance-based design of steel and composite structures", Progr Struct Engrg Mater, 2004, 6(4), 213-228.
- [10] Kuo-Chen, Y., Sheng-Jin, C., Cun-Ci, L., Hung-Hsin, L., "Experimental study on local buckling of fire-resisting steel columns under fire load", Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61, 553-565.
- [11] Liew J. Y. R., "Survivability of steel frame structures subject to blast and fire", Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64, 854-866.
- [12] Dong, Y. L., Zhu, E. C., Prasad, K., "Thermal and structural response of two-storey two-bay composite steel frames under furnace loading", Fire Safety Journal, 2009, 44, 439-450.
- [13] Ruirui, S., Zhaohui, H., Ian, B., "Progressive collapse analysis of steel structures under fire conditions", Engineering Structures, 2012, 34, 400-413.
- [14] Madsen, R. L., Castle, T. A., Schafer, B. W., "Seismic Design of Cold-Formed Steel Lateral Load-Resisting Systems: A Guide for Practicing Engineers", Gaithersburg, MD, 2016, <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.GCR.16-917-38>.
- [15] Wang, X., Hutchinson, T. C., Hegemier, G., Gunisetty, S., Kamath, P., Meacham, B., "Earthquake and fire performance of a mid-rise cold-formed steel framed

جانبی سیستم استفاده شد، که نتایج ذیل حاصل شد:

- با توجه به اتصال مستقیم ورق به تیرها و ستون‌های پیرامونی، افزایش حرارت، تاثیر شدیدی بر تغییرشکل تیر و ستون داشته و بر خلاف سیستم‌های معمولی که توصیه می‌شود در آن فاصله‌ای به‌عنوان درز انبساط بین اعضاء تیر و ستون ایجاد شود، در این سیستم امکان ایجاد این درز نبوده و می‌بایست با ایجاد پوشش حرارتی مناسب بر روی اعضاء، مخصوصا ورق‌ها و ستون‌ها، از اثرات مخرب بر پایداری و کاهش سختی و مقاومت سیستم کاسته و آن را به تعویق انداخت.

- در سازه‌هایی که از سیستم دیوار برشی فولادی استفاده می‌کنند، می‌توان سختی الاستیک و مقاومت تسلیم کاهش یافته سیستم را پس از هرگونه آتش‌سوزی با محاسبه روابط ساده، ارزیابی نمود.

- روابط مقاومت تسلیم سیستم دیوار برشی فولادی در دماهای مختلف با ضخامت‌های ۰/۵، ۲ و ۴ میلی‌متر با تنش تسلیم ۱۸۰ مگاپاسکال به‌ترتیب عبارتند از:  $PT = -210T + 155000$ ،  $PT = -900T + 530000$  و  $PT = -1150T + 860000$  و با تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال به‌ترتیب عبارتند از:  $PT = -235T + 180000$ ،  $PT = -210T + 670000$  و  $PT = -1250T + 96000$

- روابط سختی الاستیک سیستم دیوار برشی فولادی در دماهای مختلف با تنش‌های تسلیم مختلف (۱۸۰ و ۲۴۰ مگاپاسکال) در ضخامت‌های ۰/۵، ۲ و ۴ میلی‌متر به‌ترتیب عبارتند از:  $K = -270T + 220000$ ،  $K = -190T + 150000$  و  $K = -75T + 57500$

## مراجع

- [1] Thorburn, L., Kulak, G., Montgomery, C., "Analysis of Steel Plate Shear Wall", Structural Engineering Report No. 107, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 1983.
- [2] Timler, P., Kulak, G., "Experimental Study of Steel Plate Shear Wall", Structural Engineering Report No. 114, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 1983.
- [3] Roberts, T., Sabouri-Ghomi, S., "Hysteretic Characteristics of Unstiffend Perforated Steel Plate Shear Panels", Thin Walled Structures, 1992, 14, 139-151.
- [4] Vian, D., Bruneau, M., "Testing of Special LYS Steel Plate Shear Walls", Proceeding of the 13th World Conference

- Franssen, J. M., Kruppa, J., Joyeux, D., Twilt, L., Van Oerle, J., Aurrtrrtxe, G., "Development of Design Rules for Steel Structures Subjected to Natural Fires in Large Components", European Commission, Technical Steel Research, Report EUR 18868 EN, 1999.
- [20] American Society of Civil Engineers, Standard Calculation Methods for Structural Fire Protection, ASCE/SFPE, Standard 7-05, 2005.
- [21] American Society for Testing and Materials, Standard Methods of Fire Tests of Building Construction and Materials, ASTM Standard E119-05, 2005.
- [22] Lie, T. T., "Fire Temperature-Time Relations", Chapter 4-8 of the SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, 2002.
- building-test program and test results," rapid release (preliminary) report (SSRP-2016/07), San Diego, CA, 2016.
- [16] Hoehler, M. S., Smith C. M., Hutchinson, T. C., Wang, X., Meacham, B. J., Kamath., P., "Behavior of steel-sheathed shear walls subjected to seismic and fire loads", Fire Safety Journal, 2017, 91, 524-531.
- [17] Abaqus Standard User's manual, Version (6.10.1), Karlsson and Sorensen, 2012.
- [18] Schleich, J. B., Bouillette, J. P., Hass, R., Preston, R., Sandman, T., "International Fire Engineering Design for Steel Structures, State of the Art. Brussels", Belgium, International Iron and Steel Institute, 1993.
- [19] Schleich, J. B., Cajot, L. G., Pierre, M., Brasseur, M.,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Gh. Pachideh, M. Gholhaki, Y. Noori, *An Investigation into the Impact of Fire on Lateral Stability and Strength of Thin Steel Plate Shear Walls*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(4) (2020) 859-872.

DOI: [10.22060/ceej.2018.15003.5809](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.15003.5809)

