



Numerical investigation of effective parameters on the behavior of concrete-filled steel tubular gusset plate connections

M. Ebrahimnejad¹, A. Razi², P. Arezoumand Omidi³

¹ Civil Engineering Department, Faculty of Technology and Engineering-East of Guilan, University of Guilan, Roudsar, Iran

² Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Science and Culture, Rasht, Iran

³ Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Islamic Azad University- South Tehran Branch, Tehran, Iran

ABSTRACT: Concrete-filled steel tubular (CFST) gusset plate connection is a commonly used method in which the plates are welded directly to the columns. Due to the importance of stress distribution and energy absorption capacity on the behavior of the mentioned connections, in the present study, numerical analysis of the behavior of these connections under different loadings has been investigated. The studied variables include the thickness of the gusset plate, the compressive strength of the concrete, the D/t (diameter to thickness) ratio of CFST, and the type of loading. The results show that although filling hollow tubular sections with concrete prevents the local buckling of the steel wall, the use of concrete with higher compressive strength does not always lead to increased load capacity and energy absorption, so in many of the studied models, the energy absorption capacity decreases by 18% to 30%. On the other hand, the results showed that the diameter-to-thickness ratio has a significant effect on the energy absorption capacity of the simulated connections so by increasing this ratio, the energy absorption capacity has decreased in the range of 76% to 91%. Also, the loading condition is effective in the load-bearing capacity and the energy absorption of the structure. So that in the case of eccentric tension and in-plane bending, the energy absorption capacity is reduced by 53% and 86%, respectively, compared to axial tension loading.

Review History:

Received: Dec. 02, 2021

Revised: Sep. 16, 2022

Accepted: Feb. 13, 2023

Available Online: Feb. 26, 2023

Keywords:

Concrete-filled steel tube (CFST)

Gusset plate

Finite Element Method

Failure

1- Introduction

Nowadays, the use of Concrete Filled Steel Tubular Sections (CFST) has received much attention due to their performance in improving the behavior of the structure. This is due to the efficiency of the concrete in the steel profiles, which significantly increases the local buckling strength of the thin-walled hollow sections. One of the influencing factors affecting the behavior of CFST columns is the behavior of the brace connections to these members. Extensive research has been done in this field, and it has been shown that the CFST profile can increase connection strength under compression or tension loading by bracing [1-3].

According to the previous investigations and the lack of design criteria for the CFST-to-gusset plate connection, in this investigation, the parameters affecting the behavior of these connections are investigated using finite element modeling. The variables studied include the thickness of the gusset plate, the compressive strength of the concrete, and the diameter-to-thickness ratio of the CFST. According to these variables, 12 finite element models are simulated and analyzed under axial tension loads. To investigate the influence of the type of loading, the next step is to select the best connection from the point of view of energy absorption and to examine its behavior under eccentric tension and in-plane bending again.

2- Methodology

The modeling is performed in ABAQUS finite element software using the C3D8R element, and a non-linear static method is used for analysis. The load is applied gradually to the models (displacement control) with a time step of 0.10 seconds until the failure. The specifications of steel and concrete members are shown in Table 1 and Table 2, respectively.

Table 1. Mechanical properties of T-300-4AX in Xu et al. research [2].

Member	Thickness (mm)	F _y (MPa)	F _u (MPa)	E (MPa)	ε _u (%)
Column	4	269	385	2.04e5	32.6
Brace	6	330	485	1.99e5	34
Gusset plate	12	405	505	2.04e5	34.9

Table 2. Specifications of concrete material introduced to the software.

Dilation Angle	Eccentricity	F _{b0} /F _{c0}	K	Viscosity Parameter
30.5	0.1	1.16	0.666	0.001

*Corresponding author's email: m.ebrahimnejad@guilan.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

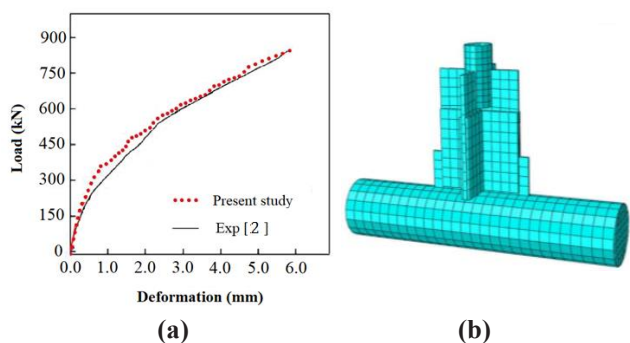


Fig. 1. Model verification; (a) Meshing the studied model, (b) Comparison of load-deformation curves obtained from experimental and numerical works.

Poisson’s ratio and concrete density are selected as 0.2 and $2400 \frac{kg}{m^3}$, respectively. The concrete damaged plasticity model (CDP) has been used to define this material. To model the steel-concrete interaction, surface-to-surface contact is created with tangential behavior (using the penalty method) and normal behavior with friction coefficients of 0.25 and 0.5, respectively. In the present study, the numerical results have been verified with the results of the T-300-4AX sample in the experimental study conducted by Xu et al. [2], as shown in Figure 1a.

According to the load-displacement curve shown in Figure 1b, it can be seen that there is an acceptable agreement between the numerical modeling and the experimental results. In the following, a parametric study is carried out to investigate the influencing factors on the connection behavior of the CFST column to the gusset plate connection. The investigated models have been presented in Table 3.

3- Results and Discussion

According to the results, it can be seen that in all the models examined in this study, cracks are initially created between the end of the gusset plate and the tube wall. After increasing the load, when this reaches 85 to 90% of the ultimate strength, a yield line appears on the tube and around the connection to the gusset plate, and finally, a sudden failure occurs with the formation of rupture cracks along the gusset plate.

Table 3. Introducing the models investigated in the present study.

Model	D/t	Compressive strength of concrete (MPa)	Gusset plate’s thickness (mm)
Dt50 f40 t11	50	40	11
Dt50 f40 t14		40	14
Dt50 f45 t11		45	11
Dt50 f45 t14		45	14
Dt50 f50 t11		50	11
Dt50 f50 t14		50	14
Dt70 f40 t11	70	40	11
Dt70 f40 t14		40	14
Dt70 f45 t11		45	11
Dt70 f45 t14		45	14
Dt70 f50 t11		50	11
Dt70 f50 t14		50	14

By examining the von Mises stress contours, it can be said that, generally, for the models under axial tension, the failure occurred due to the steel tube punch shear and appears as a rupture of the steel tube along the connection with the gusset plate. Of course, in the models with a D/t ratio equal to 70 (e.g., Figure 2), the rupture is mainly concentrated at the two ends of the gusset plate, while the middle parts experience less stress. Also, for the models with a D/t ratio equal to 50 (e.g., Figure 3), in addition to yielding at the connection point of the gusset plate with the steel tube, the yielding effects on the steel tube (along the endpoints of the gusset plate) are observed.

In the following, a comparison is made between different models according to the amount of energy absorption of the CFST column to the gusset plate connection.

As can be seen in Figure 4, among the 12 finite element models of the CSFT to the gusset plate connection that have been subjected to axial tension, in the case where the thickness of the gusset plate is 14 mm, the compressive strength of concrete is 40 MPa and the D/t ratio is equal to 50 (model Dt50 f40 t14), the energy absorption capacity has increased compared to other cases. This amount is more than ten times the energy absorption in the weakest model, in which the thickness of the connecting plate is 14 mm, the compressive strength of concrete is 40 MPa, and the D/t is 70 (model Dt70 f40 t14).

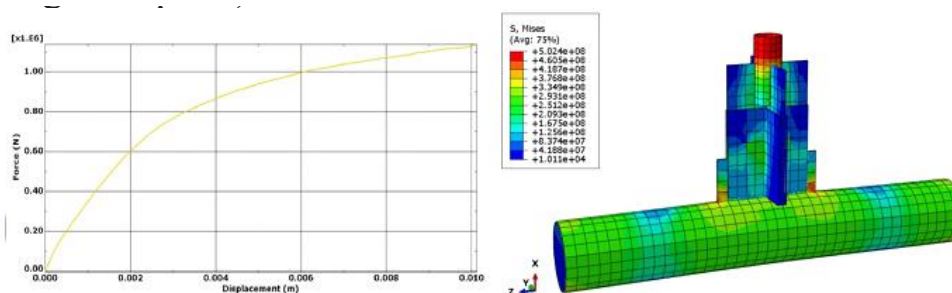


Fig. 2. Results of Dt70 f40 t11 model.

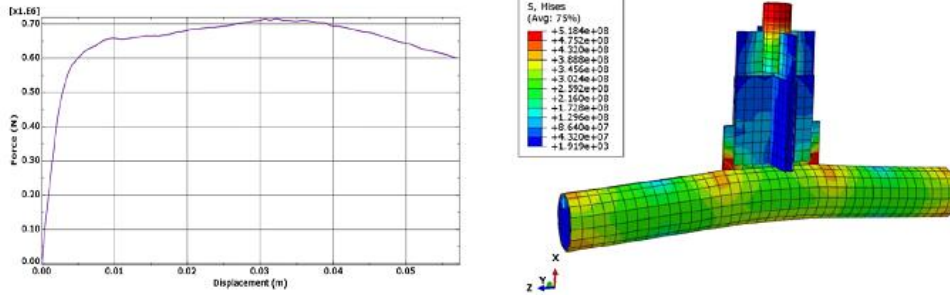


Fig. 3. Results of Dt50 f40 t14 model.

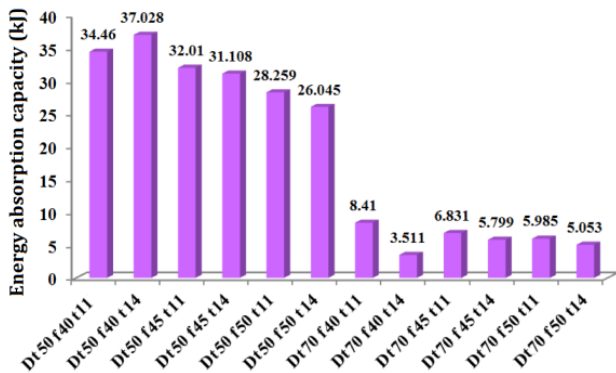


Fig. 4. The energy absorption results in the studied models.

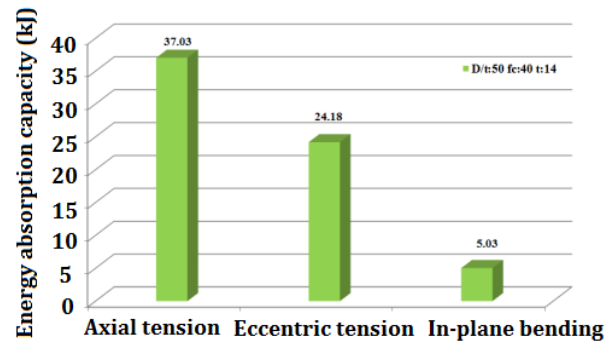


Fig. 5. Comparison of the effects of different loads on the connection behavior in the studied CSFT columns.

Due to the possibility of creating unexpected loads, it is necessary to study the behavior of the investigated models under eccentric tension and in-plane bending. For this reason, the model Dt50 f40 t14, which has the best behavior in terms of energy absorption capacity, is subjected to the mentioned loads and analyzed. In the case of eccentric tension loading and in-plane bending, the energy absorption capacity has decreased by 53% and 86%, respectively, compared to axial tensile loading. According to the obtained values in Figure 5, it can be concluded that how to apply the load affects the energy absorption capacity of the CSFT to gusset plate connection.

4- Conclusions

The most important results of the research are briefly stated as follows:

Changing the thickness of the gusset plate has a more considerable effect on the energy absorption capacity of models with a diameter-to-thickness ratio of 70.

Using concrete with higher compressive strength does not always increase the load-bearing capacity and energy absorption. However, filling tube sections with concrete postpones the local buckling of the steel wall.

The diameter-to-thickness ratio is the most important compared to other investigated parameters, and with the increase of this ratio, the energy absorption capacity has decreased significantly.

References

- [1] R. Feng, B. Young, Behaviour of concrete-filled stainless steel tubular X-joints subjected to compression, *Thin-Walled Structures*, 47(4) (2009) 365-374.
- [2] F. Xu, J. Chen, W.-I. Jin, Experimental investigation of concrete-filled steel tubular longitudinal gusset plate connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 124 (2016) 163-172.
- [3] J. Chen, J.-h. Zhu, F. Xu, and W. Xue, 02.05: Design of concrete-filled steel tubular longitudinal gusset plate connections, *ce/papers*, 1 (2017) 471-478.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Ebrahimnejad, A. Razi, P. Arezoumand Omid, Numerical investigation of effective parameters on the behavior of concrete-filled steel tubular gusset plate connections , Amirkabir J. Civil Eng., 55(3) (2023) 145-148.

DOI: [10.22060/ceej.2023.20837.7545](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.20837.7545)





بررسی عددی پارامترهای مؤثر بر رفتار اتصال ورق گاست به مقاطع لوله ای فولادی پر شده با بتن

میلاذ ابراهیم نژاد شلمانی^{۱*}، علی راضی احمدسرای^۲، پویا آرزومند لنگرودی^۳

۱- دانشکده فنی و مهندسی شرق، دانشگاه گیلان، رودسر، ایران

۲- دانشکده فنی، دانشگاه علم و فرهنگ، رشت، ایران

۳- دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷

کلمات کلیدی:

اتصالات

مقاطع لوله‌ای فولادی پر شده با بتن

(CFST)

ورق گاست

روش اجزای محدود

گسیختگی

خلاصه: اتصال مقاطع لوله ای فولادی پر شده با بتن (Concrete Filled Steel Tube) به ورق گاست (Gusset plate)،

یک روش اتصال متداول است که در آن، صفحات مستقیماً به وجوه ستون جوش می‌شوند. نظر به اهمیت چگونگی توزیع تنش و ظرفیت جذب انرژی بر رفتار اتصال مذکور، در مطالعه‌ی حاضر به تحلیل عددی رفتار این اتصال تحت بارگذاری‌های مختلف پرداخته شده است. متغیرهای مورد بررسی شامل ضخامت ورق گاست، مقاومت فشاری بتن، نسبت قطر به ضخامت لوله فولادی متصل به ورق گاست و نوع بارگذاری می‌باشد. نتایج حاصل نشان می‌دهد اگر چه پر کردن مقاطع لوله‌ای توخالی با بتن کماتنس موضعی جداره‌ی فولادی را به تعویق می‌اندازد، اما استفاده از بتن با مقاومت فشاری بیشتر همواره منجر به افزایش میزان جذب انرژی نمی‌شود، به طوری که در بسیاری از مدل‌های مورد مطالعه کاهش ظرفیت جذب انرژی ۱۸ تا ۳۰ درصدی افتاده است. از سوی دیگر نسبت قطر به ضخامت نقش تاثیرگذاری بر میزان ظرفیت جذب انرژی اتصالات داشته و با افزایش این نسبت، ظرفیت جذب انرژی بین ۷۶ تا ۹۱ درصد کاهش می‌یابد. همچنین نحوه اعمال بار نیز بر رفتار این اتصالات مؤثر است، به نحوی که در حالت بارگذاری کششی برون محور و خمش صفحه‌ای، ظرفیت جذب انرژی در مقایسه با حالت بارگذاری کشش محوری به ترتیب ۵۳ و ۸۶ درصد کاهش یافته است. لذا می‌بایست به منظور پیش‌بینی درست از ظرفیت باربری و میزان جذب انرژی نهایی سازه، توجه لازم به این موضوع در فرآیند طراحی صورت پذیرد.

۱- مقدمه

که پر کردن مقاطع لوله‌ای با بتن می‌تواند به طور مؤثری ظرفیت باربری فشاری و کششی مقطع را افزایش دهد [۳-۱]. ژو^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۹ مکانیسم انتقال بار مقاطع CFST همراه با نبشی‌های محصور شده در بتن، تحت کشش محوری را به صورت تجربی و عددی ارزیابی نمودند [۴]. با در نظر گرفتن پارامترهای نسبت قطر به ضخامت (D/T)، نوع اتصال، و پیکربندی نبشی‌های محصور شده، تحلیل المان محدود برای بررسی بیشتر رفتار کششی اعضای کامپوزیت انجام شد. توزیع بار، مکانیسم انتقال بار، و برهمکنش‌های بین اجزا، یعنی لوله، بتن داخلی و نبشی‌های محصور شده، به طور گسترده مورد ارزیابی قرار گرفت. نشان داده شد که همه این اجزا می‌توانند تحت کشش محوری به صورت هم افزا کار کنند، اگر چه نبشی‌های محصور شده از صفحات انتهایی جدا شده بودند. روش طراحی مقاومت کششی برای عضو مورد مطالعه، بر اساس تحلیل‌های

امروزه استفاده از مقاطع لوله‌ای فولادی پر شده با بتن (CFST) در خرپاهای مورد استفاده در ساختمان‌ها، پل‌ها، سازه‌های دریایی و سازه‌های انتقال برق، به دلیل عملکرد بسیار خوب آن‌ها در فشار، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این امر به دلیل کارایی بتن داخل پروفیل‌های فولادی است که به طور قابل ملاحظه‌ای، به ویژه برای اعضای با نسبت قطر به ضخامت بالا، ظرفیت مقاومت کماتنس موضعی مقاطع لوله‌ای جدار نازک را افزایش می‌دهد. اتصال مقاطع لوله‌ای فولادی پر شده با بتن به ورق اتصال (گاست پلیت)، یک روش اتصال مناسب و متداول است که در آن، صفحات مستقیماً به وجوه ستون جوش می‌شوند.

در سال‌های گذشته تحقیقات گسترده‌ای در خصوص بررسی رفتار مقاطع مرکب به ویژه مقاطع CFST انجام شده و نشان داده شده است



باید به گونه‌ای باشد که فولاد و بتن توأم در باربری مشارکت کنند. در این زمینه نیز تحقیقات گسترده‌ای انجام شده و نشان داده شده است که مقطع CFST می‌تواند مقاومت اتصالات تحت بار فشاری یا کششی ناشی از بادبند را افزایش دهد [۹-۱۱]. ساکای^۲ و همکاران از نتایج آزمایش استاتیکی اتصالات بادبند K شکل به مقاطع لوله‌ای فولادی پر شده با بتن به این نتیجه رسیدند که مقاومت نهایی نمونه‌های پر شده با بتن تقریباً دو برابر نمونه‌های بدون بتن است [۱۲]. در مطالعه‌ای میرقاردی و بالازاده رفتار لرزه‌ای اتصال تیر فولادی به ستون CFST همراه با ورق میان گذر را بررسی نمودند [۱۳]. در اتصال پیشنهاد شده چون مفصل پلاستیک می‌تواند در فاصله‌ای از بر ستون تشکیل گردد و اجزای اتصال در وضعیت الاستیک باقی بمانند، از این رو بعد از وقوع زلزله آسیبی به ناحیه اتصال وارد نمی‌گردد و تنها خرابی‌ها در تیر و در خارج از محدوده اتصال روی می‌دهد.

چن^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۷ تحقیقات تجربی بر روی اتصال لوله‌ای فولادی پر شده با بتن به ورق اتصال با در نظر گرفتن لاغری (نسبت قطر به ضخامت) مختلف برای نمونه‌های آزمایشی ارائه نمودند [۱۴]. سه شرایط بارگذاری مختلف، از جمله کشش محوری، کشش خارج از مرکز و خمش درون صفحه بر روی نمونه‌ها اعمال شد. مشاهده گردید که شکست برشی پانچ عضو CFST حالت اصلی شکست می‌باشد. همچنین توصیه شد که سهم بتن در طراحی در نظر گرفته شود، زیرا می‌تواند به طور موثر تغییر شکل عضو CFST را مهار کند.

ژو^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۸ رفتار مکانیکی اتصال طولی ورق اتصال به مقطع توخالی دایره‌ای پر شده با بتن تحت کشش محوری، کشش خارج از مرکز و خمش درون صفحه را به کمک تحلیل المان محدود مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. طیف وسیعی از پارامترهای مربوط به پیکربندی هندسی، خواص مواد و موقعیت‌های بار برای بررسی حالت حدی حاکم و مشخصات تنش برشی در شکست صورت گرفت. مدل ارائه شده نشان داد که تنها حالت حدی حاکم، شکست برشی پانچ است.

تجربی و عددی بر روی مکانیسم انتقال بار و برهم‌کنش‌های اجزا پیشنهاد شد. مقایسه بین پیش‌بینی‌های محاسبه شده و نتایج حاصل از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها نشان داد که روش طراحی پیشنهادی دقیق و قابل اعتماد است.

ژو^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۱ به صورت تجربی و عددی، اعمال بار و انتقال برش را در اعضای لوله فولادی پر شده با بتن (CFST) با عضو فولادی محصور در بتن با اتصالات برشی را بررسی نمودند [۵]. اثرات لاغری مقطع، پیکربندی نبشی، طول ستون در بالا و پایین اتصال، و انواع صفحه تقویت کننده داخلی مورد ارزیابی قرار گرفت. یک رویکرد طراحی برای مکانیسم انتقال پیوستگی مستقیم پیشنهاد گردید و نشان داده شد که رویکرد پیشنهادی می‌تواند مقاومت پیوستگی را در سطح مشترک لوله فولادی و بتن پر کننده با دقت معقولی پیش‌بینی کند.

پاچیده و همکاران با هدف مطالعه عملکرد ستون‌های لوله‌های فولادی دو پوسته با بتن دارای هندسه منشوری، چند نمونه ستون با مقطع داخلی مربعی، لوزی شکل و دایره‌ای و همچنین مقطع بیرونی مربع شکل مورد بررسی قرار دادند [۶]. بر اساس نتایج، حالت شکسته ستون‌های با مقطع داخلی مربع یا لوزی شکل مشابه است، اما نمونه‌هایی با مقطع دایره‌ای آسیب شدیدتری متحمل شدند. علاوه بر این، نسبت سختی و شکل‌پذیری نمونه‌های اولیه، که بخش‌های داخلی آن‌ها به شکل لوزی است، بیشتر از نمونه‌های دیگر بود. پاچیده و همکاران همچنین تاثیر افزایش دما بر عملکرد ستون‌های فولادی لوله‌ای دو پوسته پر شده با بتن با هندسه منشوری و دارای مقاطع مختلف را نیز بررسی کردند [۷]. مشابه قبل نتایج نشان داد که ستون‌ها با هسته داخلی دایره‌ای آسیب‌های شدیدتری را نسبت به بقیه تجربه می‌نمایند. رنجبری و عابدی نیز در مطالعه‌ای به بررسی عددی رفتار ستون‌های CFST تقویت شده با سخت کننده و ساخته شده از بتن با مقاومت بالا در برابر آتش پرداختند [۸]. در این تحقیق تاثیر پارامترهایی همچون لاغری و سطح بار اعمالی و فاکتور سطح بر مقاومت آتش ستون‌ها، همچنین اثر خروج از مرکزیت بار در مقاومت ستون‌ها با مقطع مدور و بیضوی بررسی شد.

از جمله موارد تعیین کننده در رفتار ستون‌های CFST، رفتار اتصالات اعضایی نظیر مهاربندها به این ستون‌هاست. اتصال ایجاد شده

2 Sakai
3 Chen
4 Xu

1 Xu

توجه به این متغیرها در ابتدا مجموعاً، ۱۲ مدل اجزای محدود اتصال به CFST تحت بار محوری کششی شبیه‌سازی و تحلیل می‌شوند و بهینه‌ترین حالت به لحاظ ظرفیت باربری و میزان جذب انرژی انتخاب می‌گردد. در مرحله‌ی بعد و به منظور بررسی تأثیر نوع بارگذاری، اتصال بهینه‌ی انتخاب شده، تحت بارهای کششی برون محور و خمشی صفحه‌ای مجدداً تحلیل می‌گردد.

ساختار مقاله حاضر بدین‌گونه است که در ادامه، در بخش دوم نحوه مدل‌سازی اجزای محدود شامل شبکه‌بندی، تعریف خصوصیات مصالح فولادی و بتنی و اندرکنش بین آن‌ها و همچنین شرایط مرزی ارائه شده و در نهایت اعتبارسنجی با کار آزمایشگاهی صورت می‌گیرد. در بخش سوم، یک مطالعه پارامتری با در نظر گرفتن متغیرهایی نظیر ضخامت ورق اتصال، مقاومت مشخصه فشاری بتن و نسبت قطر به ضخامت لوله فولادی پر شده با بتن صورت گرفته و نتایج آن به صورت کانتورهای تنش و منحنی بار- تغییر مکان ارائه می‌گردد. در بخش چهارم، تفسیر نتایج با در نظر گرفتن هر یک از متغیرهای مورد بررسی ارائه شده و در پایان، در بخش پنجم یک نتیجه‌گیری از تحقیق انجام شده صورت می‌گیرد.

۲- مدل‌سازی عددی و اعتبارسنجی

۲-۱- معرفی نمونه آزمایشگاهی مرتبط

یکی از مهم‌ترین مراحل مربوط به تحلیل‌های عددی، بررسی اعتبار نتایج حاصل از آن‌ها از طریق مقایسه با نتایج تجربی و آزمایشگاهی می‌باشد. در پژوهش حاضر، صحت‌سنجی نتایج عددی با نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی انجام شده توسط ژو^۱ و همکاران [۱۹] که در شکل ۱ نشان داده شده است صورت پذیرفت. در مطالعه‌ی آزمایشگاهی ژو و همکاران، اتصالات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است که از بین آن‌ها مدل AX-300-T-4 برای صحت‌سنجی انتخاب گردید. مشخصات هندسی این مدل در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲- مدل‌سازی و شبکه‌بندی

برای مدل‌سازی از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده گردید. المان‌های سازه‌ای مورد نظر در این پژوهش شامل بتن، مقاطع لوله‌ای فولادی، ورق گاست و نبشی‌های اتصال می‌باشند. این

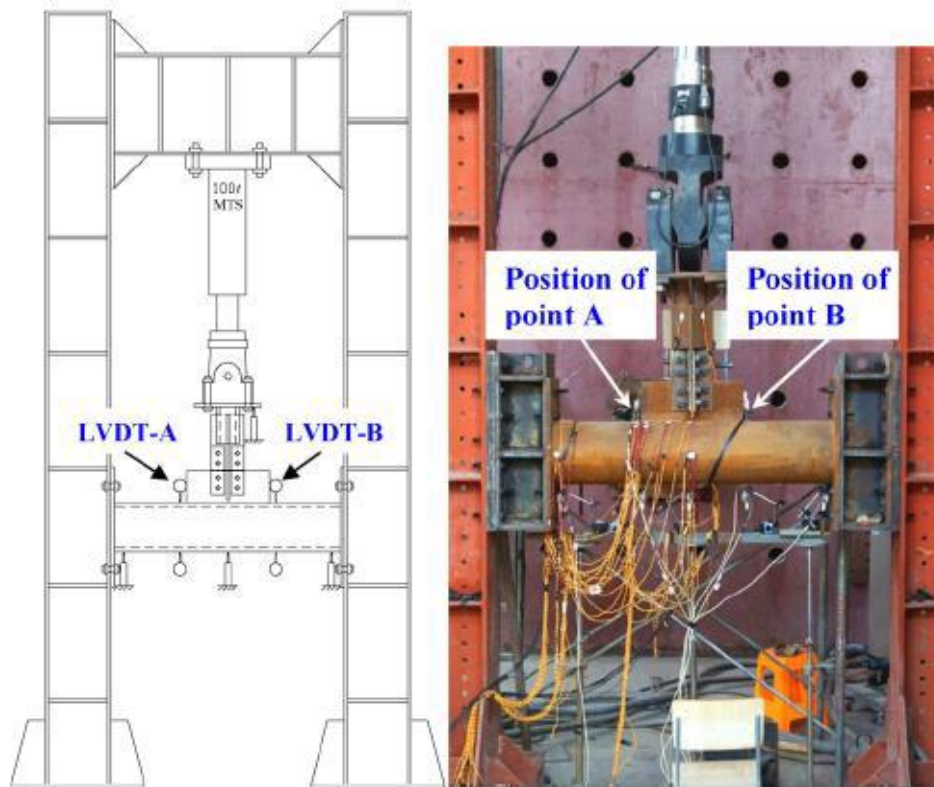
لی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۸ یکی از اتصالات معمول در اعضای لوله‌ای فولادی، یعنی اتصال KT لوله به ورق گاست که توسط حلقه سخت شده است را مورد مطالعه قرار دادند [۱۶]. آن‌ها یک فرمول طراحی برای جبران ضعف آیین‌نامه‌های طراحی ارائه نمودند که بر اساس تئوری خط تسلیم می‌باشد.

چانگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۸ برای ارزیابی تأثیر صفحه داخلی عمودی تقویت کننده بر رفتار فشاری اتصالات مقطع توخالی مربعی (SHS)، چهار اتصال T با و بدون چنین تقویت کننده‌ای به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد آزمایش قرار دادند [۱۷]. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که صفحه داخلی عمودی برای افزایش مقاومت فشاری اتصالات مذکور مؤثر است، اما با افزایش نسبت عرض بین مهاربند و عضو SHS، کارایی تقویت کننده کاهش می‌یابد. در همین حال، وجود صفحه داخلی عمودی تأثیر کمی بر توزیع کرنش و حالت شکست اتصال دارد.

در سال ۲۰۲۲، سونگ^۳ و همکاران رفتار مکانیکی اتصالات K و KK به مقطع دایره‌ای پر شده با بتن (CHS) را به صورت تجربی و عددی ارزیابی نمودند [۱۸]. سه اتصال K و KK پر شده با بتن در مقیاس بزرگ مورد آزمایش قرار گرفتند. بر اساس مدل‌های توسعه یافته، مطالعه پارامتری برای بررسی تأثیر دو جفت مهاربند K و نیروی فشاری محوری عضو CHS بر توزیع تنش برشی پانچ و مقاومت نهایی انجام شد. نتایج تجربی و عددی هر دو نشان دادند که گسیختگی اتصال CHS پر شده با بتن به صورت شکست برشی پانچ بر روی دیواره عضو CHS نزدیک نوک جوش می‌باشد. اندرکنش بین دو جفت K باید در طراحی مقاومت در نظر گرفته شود و سطح بار فشاری عضو CHS باید کنترل شود تا از وقوع حالت شکست ترکیبی جلوگیری گردد.

با توجه به پژوهش‌های پیشین و کمبود ضوابط طراحی برای اتصال لوله فولادی پر شده با بتن به ورق اتصال، در این تحقیق با مدل‌سازی اجزای محدود، این موضوع مورد توجه قرار می‌گیرد و پارامترهای تأثیرگذار بر طراحی این اتصالات بررسی می‌شود. متغیرهای مورد بررسی شامل ضخامت ورق اتصال، مقاومت مشخصه فشاری بتن، نسبت قطر به ضخامت CFST متصل به ورق گاست می‌باشند. با

1 Li
2 Chang
3 Song



شکل ۱. تنظیمات آزمایش برای نمونه‌های تحت کشش محوری در مطالعه زو و همکاران [۱۹]

Fig. 1. Test setup for specimens subjected to axial tension in Xu et al. research [19].

۲-۳-۲- مشخصات بتن

در این مطالعه برای تعریف بتن، از مدل آسیب پلاستیک بتن (CDP^۱) استفاده شده است. داده‌های مورد نیاز برای تعریف این مدل در نرم افزار آباکوس در جدول ۳ نمایش داده شده است. ضریب پواسون و چگالی بتن $\frac{N}{mm^2}$ به ترتیب ۰/۲ و $4002 \frac{kg}{m^3}$ در نظر گرفته شده است.

علاوه بر ضرایب فوق، منحنی تنش-کرنش بتن نیز باید معرفی گردد که با توجه به محصور شدگی^۲ بتن توسط لوله فولادی، نیاز به تعریف منحنی تنش-کرنش برای بتن محصور شده می‌باشد. با توجه به شکل ۳ که در آن منحنی تنش-کرنش برای بتن محصور شده و محصور نشده^۳ ارائه شده است، رابطه تنش-کرنش بتن محصور شده

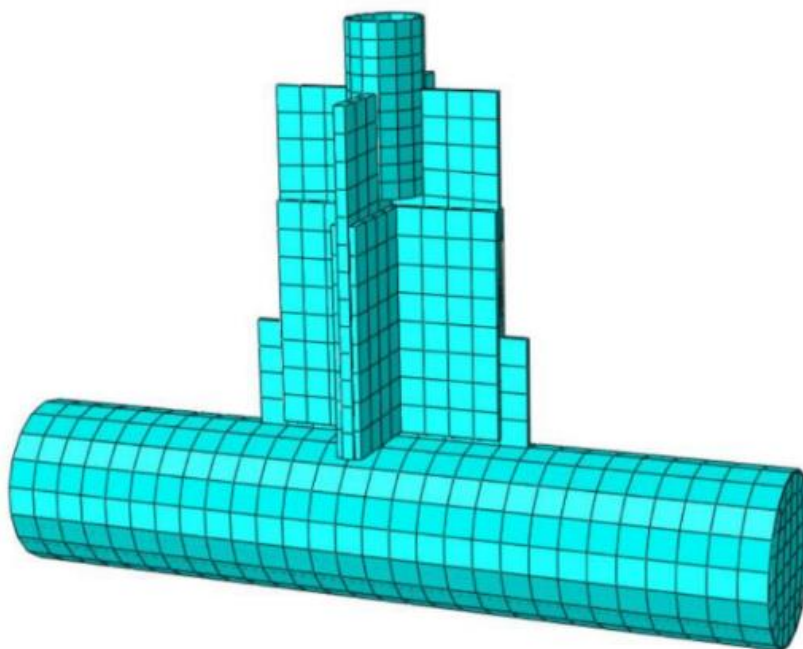
المان‌ها به صورت سه بعدی و از نوع Solid و Deformable مدل شده و در نهایت سرهم‌بندی شده‌اند. در این تحلیل از المان CYDAR برای مدل‌سازی استفاده گردیده است و بر اساس آنالیز حساسیت شبکه‌بندی صورت گرفته، شبکه‌بندی مطابق شکل ۲ به عنوان شبکه‌بندی نهایی انتخاب گردید.

۲-۳-۳- خصوصیات مصالح

۲-۳-۱- مشخصات فولاد

مشخصات ستون، بادبند و ورق گاست که از اعضای فولادی مدل جهت صحت‌سنجی هستند، در جدول ۲ آورده شده است. در این تحقیق برای مدل‌سازی مصالح فولادی از رفتار پلاستیک کامل استفاده می‌شود.

- 1 Concrete Damaged Plasticity
- 2 Confined
- 3 Unconfined



شکل ۲. شبکه بندی انتخاب شده برای مدل مورد مطالعه

Fig. 2. Meshing selected for the studied model.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی مقاطع فولادی مدل T-300-4AX در مطالعه ژو و همکاران [۱۹]

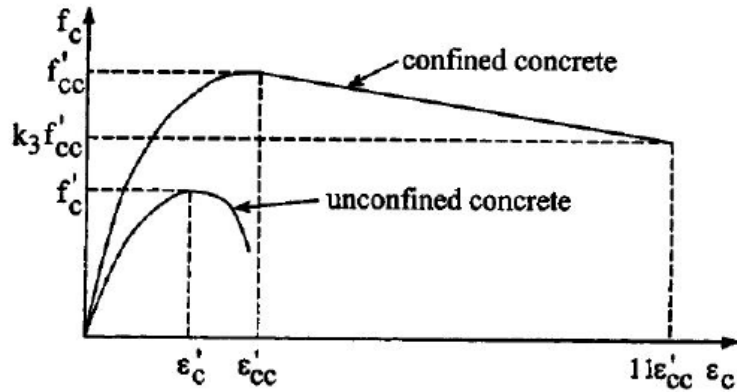
Table 2. Mechanical properties of T-300-4AX in Xu et al. research [19].

عضو	ضخامت اسمی (میلی متر)	F_y (مگاپاسکال)	F_u (مگاپاسکال)	E (مگاپاسکال)	ϵ_u %
Q235 (ستون)	۴	۲۶۹	۳۸۵	2.04×10^5	۳۲/۶
Q345 (بادبند)	۶	۳۳۰	۴۸۵	1.99×10^5	۳۴/۰
Q345 (ورق گاست)	۱۲	۴۰۵	۵۰۵	2.04×10^5	۳۴/۹

جدول ۳. مشخصات مصالح بتنی معرفی شده به نرم افزار [۲۰]

Table 3. Specifications of concrete material introduced to the software [20].

Dilation Angle	Eccentricity	Fb0/Fc0	K	Viscosity Parameter
۳۰/۵	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۶۶	۰/۰۰۱



شکل ۳. منحنی تنش- کرنش معادل برای بتن محصور نشده و محصور شده [۲۳]

Fig. 3. Stress-strain curves for unconfined and confined concrete [23].

ترتیب برابر ۴/۱ و ۲۰/۵ در نظر گرفته می‌شوند [۲۲]. پارامتر f_l نیز فشار محصور کننده در اطراف هسته بتنی بوده و برای ستون فلزی دایره‌ای پر شده با بتن با استفاده از روابط تجربی زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$\left| \begin{aligned} \frac{f_l}{f_y} &= 0.043646 - 0.000832 \left(\frac{D}{t} \right) \\ \text{for } 21.7 \leq \frac{D}{t} &\leq 47 \\ \frac{f_l}{f_y} &= 0.006241 - 0.0000357 \left(\frac{D}{t} \right) \\ \text{for } 47 \leq \frac{D}{t} &\leq 150 \end{aligned} \right. \quad (4)$$

که f_y ، D و t به ترتیب نشان دهنده تنش تسلیم، قطر و ضخامت لوله فولادی می‌باشند.

بخش دوم منحنی تنش- کرنش شکل ۳ برای بتن محصور شده را می‌توان با استفاده از رابطه زیر بیان نمود [۲۴]:

$$f_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + (R + R_E - 2) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc}} \right) - (2R - 1) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc}} \right)^2 + R \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc}} \right)^3} \quad (5)$$

به سه ناحیه تقسیم می‌شود. بخش اول منحنی، ناحیه‌ای است خطی با حداکثر تنش $0.5f'_{cc}$ و مدول الاستیسیته E_c که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_{cc}} \text{ MPa} \quad (1)$$

که f'_{cc} مقاومت فشاری بتن محصور شده می‌باشد که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$f'_{cc} = f'_c + k_1 f_l \quad (2)$$

کرنش متناظر در بتن محصور شده نیز با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۱]:

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_c \left(1 + k_2 \frac{f_l}{f'_c} \right) \quad (3)$$

در روابط فوق f'_c و ε'_c (برابر ۰/۰۰۳) به ترتیب بیانگر مقاومت فشاری و کرنش بتن در حالت محصور نشده می‌باشند. پارامترهای k_1 و k_2 ثابت‌هایی هستند که با توجه به نتایج آزمایشگاهی به

که:

$$R = \frac{R_E (R_\sigma - 1)}{(R_E - 1)^2} - \frac{1}{R_E}, \quad R_E = \frac{E_c \varepsilon'_{cc}}{f'_{cc}} \quad (6)$$

در روابط فوق، $R_\sigma = 4$ و $R_E = 4$ در نظر گرفته می‌شوند [۲۵].

رابطه (۵) برای حالتی که $\varepsilon_c \leq \varepsilon'_{cc}$ باشد برقرار است. در حالتی که $\varepsilon_c > \varepsilon'_{cc}$ باشد، بخش سوم منحنی تنش- کرنش شکل ۳ که خطی نزولی بوده و بیانگر رفتار نرم شوندگی بتن است شکل می‌گیرد. اگر ضریب k_3 به عنوان پارامتر زوال مصالح تعریف شود، بخش نرم شوندگی منحنی در نقطه‌ای که تنش و کرنش آن به ترتیب $f_c = k_3 f'_{cc}$ و $\varepsilon_c = 11 \varepsilon'_{cc}$ هستند پایان می‌یابد.

ضریب k_3 برای ستون فلزی دایره‌ای پر شده با بتن با استفاده از روابط تجربی زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$k_3 = 1 \quad \text{for } 21.7 \leq \frac{D}{t} \leq 47$$

$$k_3 = 0.0000339 \left(\frac{D}{t} \right)^2 - 0.010085 \left(\frac{D}{t} \right) + 1.3491 \quad (7)$$

$$\text{for } 47 \leq \frac{D}{t} \leq 150$$

۲-۳-۳- اندرکنش فولاد و بتن

به منظور استفاده از مزایای ستون‌های CFST، می‌بایست لوله فولادی و هسته بتنی به صورت یک عضو واحد عمل نمایند. لذا مدل‌سازی درست اندرکنش فولاد و بتن برای اعمال محدودیت‌های اصطکاکی، یکی از مهم‌ترین فاکتورها در مدل‌سازی اعضای مرکب به شمار می‌رود. برای این منظور، تماس سطح به سطح با رفتار مماسی^۱ بین لوله فولادی و هسته بتنی با استفاده از روش پنالتی (که به عنوان روش سختی هم شناخته می‌شود) ایجاد می‌شود. این روش سختی

امکان حرکت نسبی بین سطوح دو ماده را حتی زمانی که به هم چسبیده‌اند نیز فراهم می‌کند. ضریب اصطکاک مورد استفاده در این بخش ۰/۲۵ می‌باشد. علاوه بر این، تماس عمودی^۲ بین دو ماده نیز با استفاده از اصطکاک (با ضریب اصطکاک ۰/۵) ایجاد می‌گردد که در آن، سطح داخلی لوله فولادی به عنوان سطح پیرو^۳ در نظر گرفته می‌شود. تماس سخت^۴ ایجاد شده بین دو سطح باعث می‌گردد فشار از دو سطح فقط در صورت وجود تماس واقعی بین آن‌ها منتقل شود و در عین حال باعث جدا شدن سطوح تحت تأثیر نیروی کششی می‌شود. در نهایت با تعریف رفتار تماس مماسی و عمودی، سطوح تماس بین فولاد و بتن می‌توانند نسبت به هم لغزیده و جدا شوند، اما مجاز به نفوذ در داخل یکدیگر نیستند.

۲-۴- شرایط مرزی و نوع تحلیل

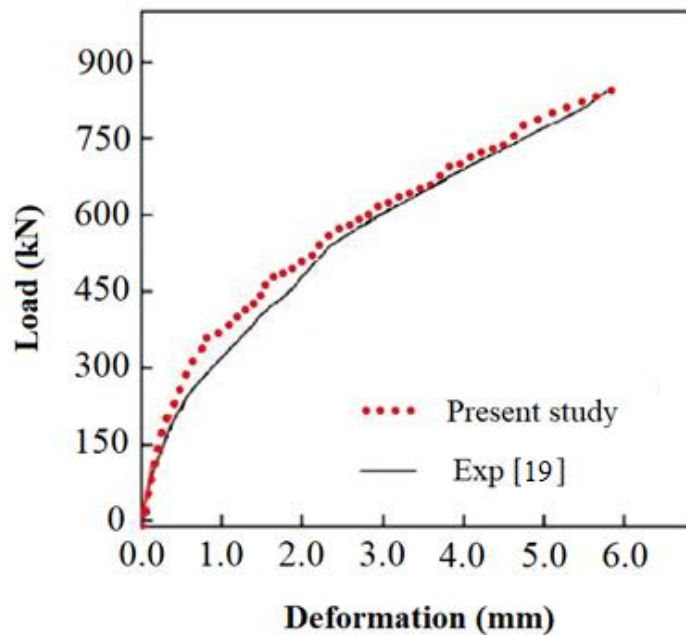
برای تحلیل مدل‌های مورد بررسی از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی اتصالات با این هدف می‌باشد که بتوان شرایط مربوط به رفتار این اتصالات را تحت بارگذاری کششی مورد بررسی قرار داد. بار اعمال شده به صورت تدریجی (جابه‌جایی کنترل) و با گام زمانی ۰/۱۰ ثانیه به مدل‌های مورد بررسی تا لحظه‌ی گسیختگی اعمال گردید.

۲-۵- اعتبارسنجی

پس از شبیه‌سازی و تحلیل مدل AX-300-T، نمودار بار-جابه‌جایی مدل‌های آزمایشگاهی و عددی مطابق شکل ۴ و جدول ۴ با هم مقایسه گردید. با توجه به منحنی بار-جابه‌جایی نشان داده شده، مشاهده می‌شود که مطابقت قابل قبولی بین نتایج مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. اختلاف اندکی که در میزان سختی اولیه و جذب انرژی مدل عددی نسبت به نمونه آزمایشگاهی وجود دارد ناشی از ایده‌آل‌سازی‌های صورت گرفته در مدل‌سازی به ویژه در مدل‌سازی جوش‌های اتصال می‌باشد.

- 2 Normal
- 3 Slave
- 4 Hard contact

- 1 Tangential behavior



شکل ۴. مقایسه مقادیر بار-جاب‌جایی مدل عددی و آزمایشگاهی

Fig. 4. Comparison of load-deformation curves obtained from experimental and numerical works.

جدول ۴. مقایسه نتایج مدل نرم‌افزاری با نمونه آزمایشگاهی

Table 4. Comparison of results obtained from the numerical model with the experimental work.

جذب انرژی (J)	حداکثر نیرو (kN)	سختی اولیه (kN/mm)	
۳۳۱۰/۷۸	۸۴۷	۶۹۵	مطالعه آزمایشگاهی [۱۹]
۳۴۴۴/۴۵	۸۴۵	۷۴۶	تحقیق حاضر
	۰/۲ درصد کاهش	۷ درصد افزایش	اختلاف

۳- مطالعه پارامتری

در این بخش به منظور بررسی عوامل مؤثر بر رفتار اتصال ستون لوله‌ای فولادی پر شده با بتن به ورق اتصال، یک مطالعه پارامتری با در نظر گرفتن متغیرهایی نظیر ضخامت ورق اتصال (۱۱ و ۱۴ میلی‌متر)، مقاومت مشخصه فشاری بتن (۴۰، ۴۵، ۵۰ مگاپاسکال) و نسبت قطر به ضخامت لوله فولادی پر شده با بتن (۵۰ و ۷۰) صورت می‌گیرد.

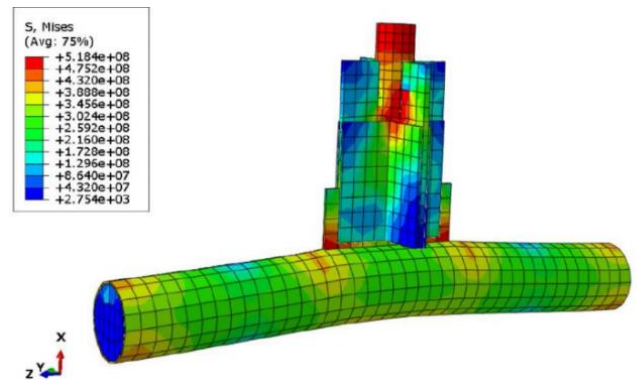
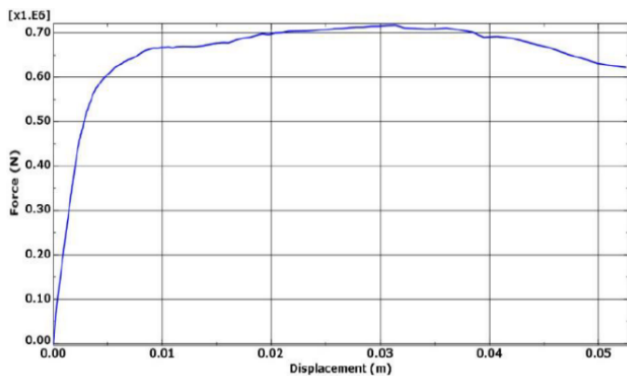
با توجه به این متغیرها، در ابتدا ۱۲ مدل اجزای محدود اتصال ستون لوله‌ای فولادی پر شده با بتن تحت بار محوری کششی شبیه‌سازی و تحلیل می‌شوند و بهترین حالت به لحاظ ظرفیت

باربری و میزان جذب انرژی انتخاب می‌گردد. در مرحله‌ی بعدی و به منظور بررسی نوع بارگذاری، اتصال بهینه‌ی انتخاب شده، تحت بارهای کششی برون محور و خمش صفحه‌ای مجدداً تحلیل می‌شود. حالت‌های اشاره شده در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. پس از تحلیل مدل‌های اتصالات مورد بررسی، نتایج حاصل از آن‌ها در قالب خروجی‌های توزیع کرنش، توزیع تنش، جاب‌جایی کلی و نمودار بار جاب‌جایی ارائه شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت. در این نمودارها نیروی محوری برحسب نیوتن، تنش فون میزز برحسب پاسکال و جاب‌جایی برحسب متر می‌باشند.

جدول ۵. معرفی حالت‌های مورد بررسی در مطالعه حاضر

Table 5. Introducing the models investigated in the present study.

عبارت اختصاری	ضخامت ورق اتصال (t) (میلی‌متر)	مقاومت مشخصه بتن (f_c) (مگاپاسکال)	D/t	حالت
Dt50 f40 t11	۱۱	۴۰	۵۰	۱
Dt50 f40 t14	۱۴	۴۰		۲
Dt50 f45 t11	۱۱	۴۵		۳
Dt50 f45 t14	۱۴	۴۵		۴
Dt50 f50 t11	۱۱	۵۰		۵
Dt50 f50 t14	۱۴	۵۰		۶
Dt70 f40 t11	۱۱	۴۰	۷۰	۷
Dt70 f40 t14	۱۴	۴۰		۸
Dt70 f45 t11	۱۱	۴۵		۹
Dt70 f45 t14	۱۴	۴۵		۱۰
Dt70 f50 t11	۱۱	۵۰		۱۱
Dt70 f50 t14	۱۴	۵۰		۱۲



شکل ۵. خروجی‌های مربوط به مدل Dt50 f40 t11

Fig. 5. Results of Dt50 f40 t11 model.

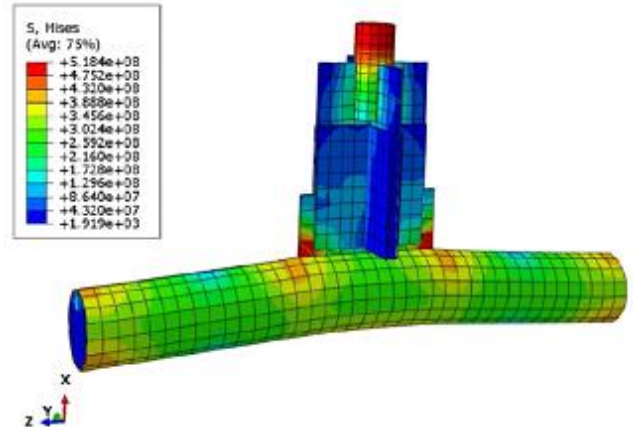
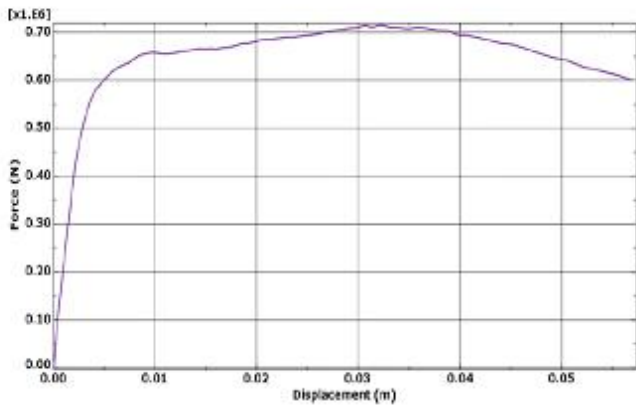
به تحلیل و بررسی اثرگذاری هر یک از متغیرهای مورد مطالعه پرداخته می‌شود. برای تمام مدل‌های مورد بررسی در این مطالعه، ابتدا ترک‌های اولیه بین انتهای ورق گاست و دیواره لوله ایجاد گردیده و پس از افزایش بار، وقتی بار به ۸۵ تا ۹۰ درصد مقاومت نهایی می‌رسد، یک خط تسلیم روی لوله و در اطراف محل اتصال به ورق گاست به وجود می‌آید و در نهایت یک شکست ناگهانی با ایجاد ترک‌های گسیختگی در امتداد ورق گاست رخ می‌دهد.

۳-۱- نتایج تحلیل

در شکل‌های ۵ تا ۱۶ خروجی‌های مربوط به مدل‌های اجزای محدود اتصال ورق گاست به ستون CFST ارائه گردیده است. این خروجی‌ها شامل کانتور تنش فون میزس و منحنی بار-تغییر مکان می‌باشند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

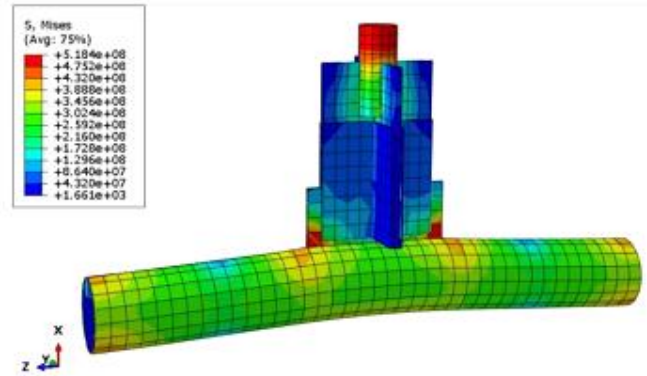
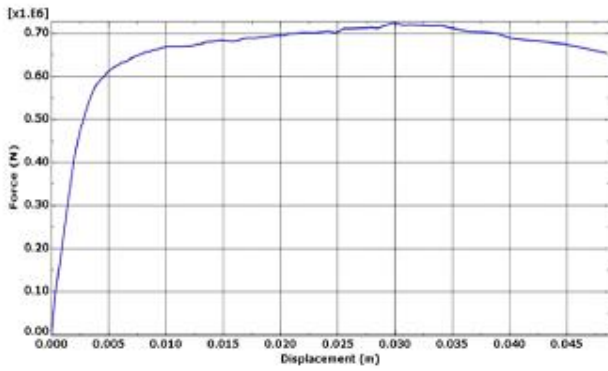
۴- تحلیل نتایج

در این قسمت با توجه به کانتورها و نمودارهای بخش قبل،



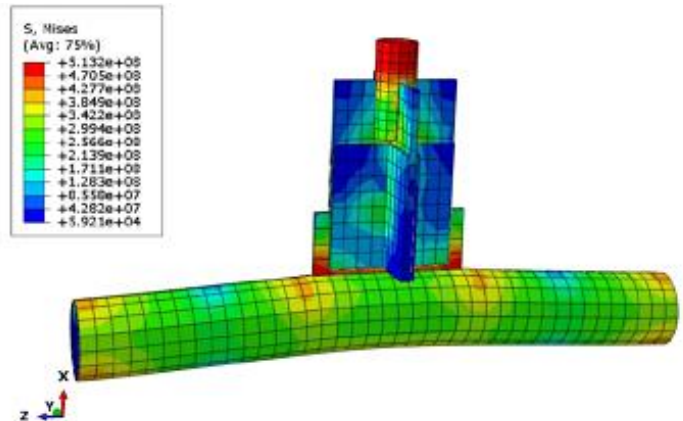
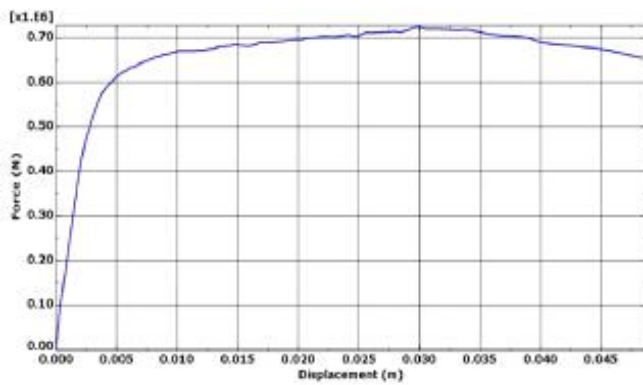
شکل ۶. خروجی‌های مربوط به مدل Dt50 f40 t14

Fig. 6. Results of Dt50 f40 t14 model.



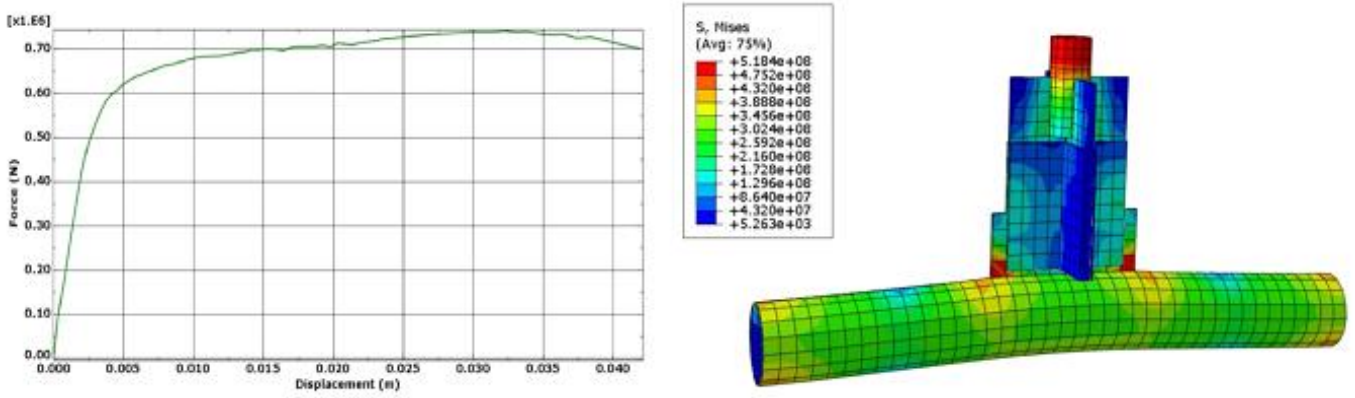
شکل ۷. خروجی‌های مربوط به مدل Dt50 f45 t11

Fig. 7. Results of Dt50 f45 t11 model.



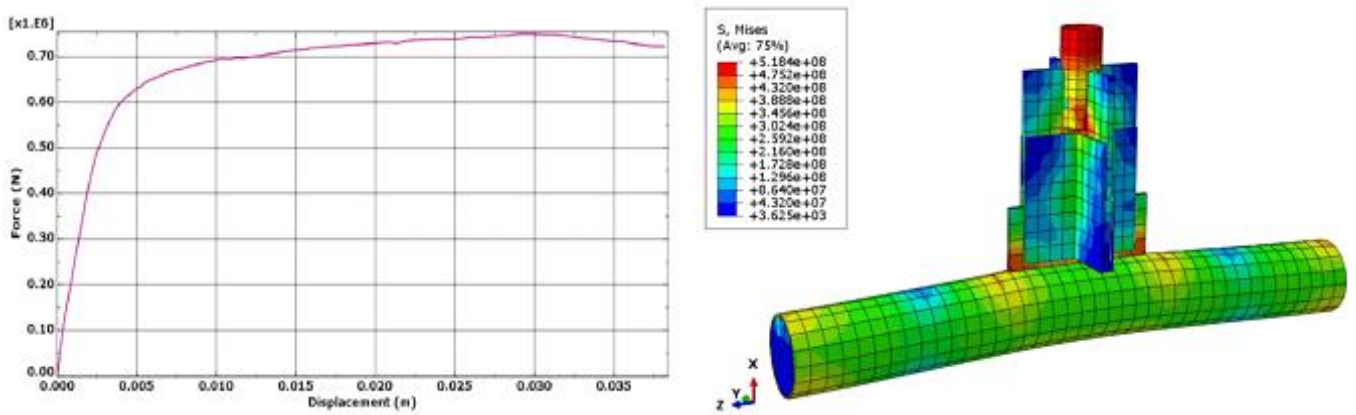
شکل ۸. خروجی‌های مربوط به مدل Dt50 f45 t14

Fig. 8. Results of Dt50 f45 t14 model.



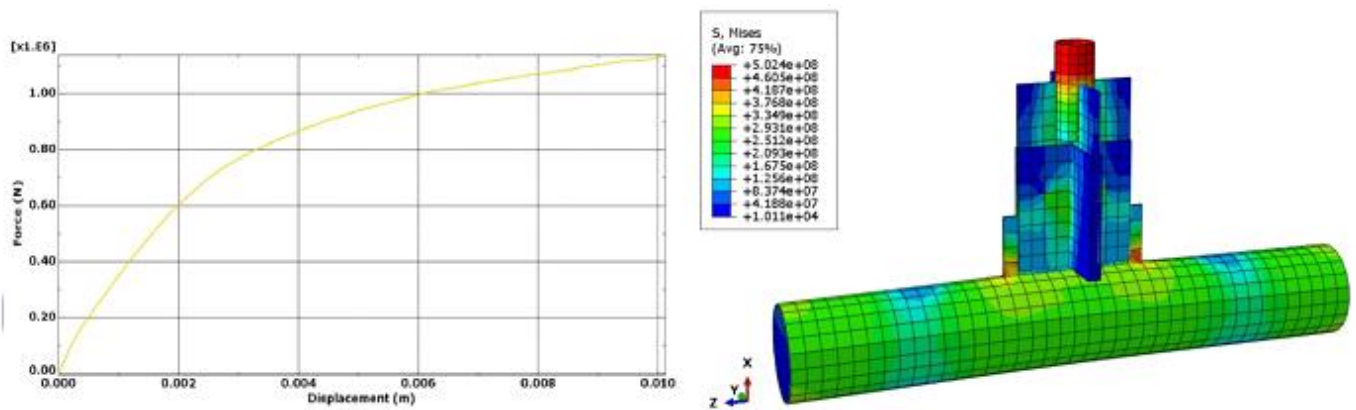
شکل ۹. خروجی‌های مربوط به مدل Dt50 f50 t11

Fig. 9. Results of Dt50 f50 t11 model.



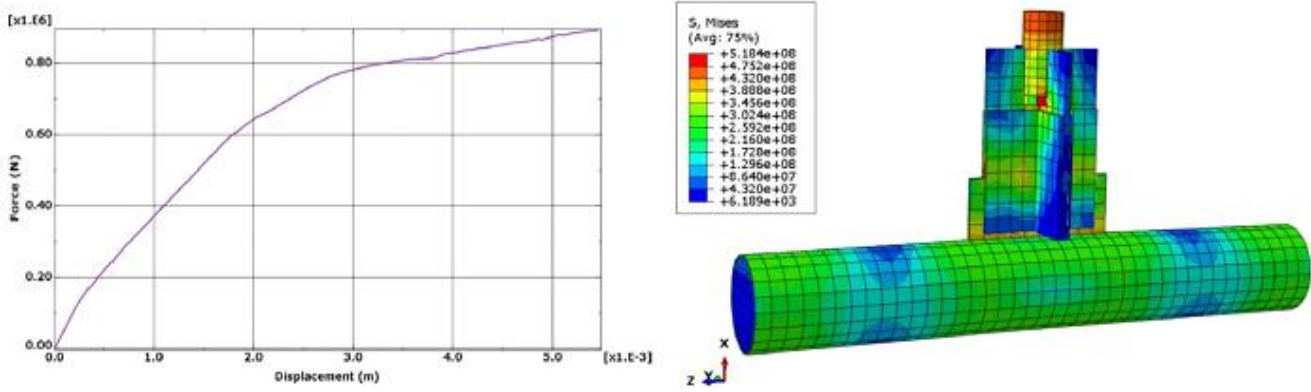
شکل ۱۰. خروجی‌های مربوط به مدل Dt50 f50 t14

Fig. 10. Results of Dt50 f50 t14 model.



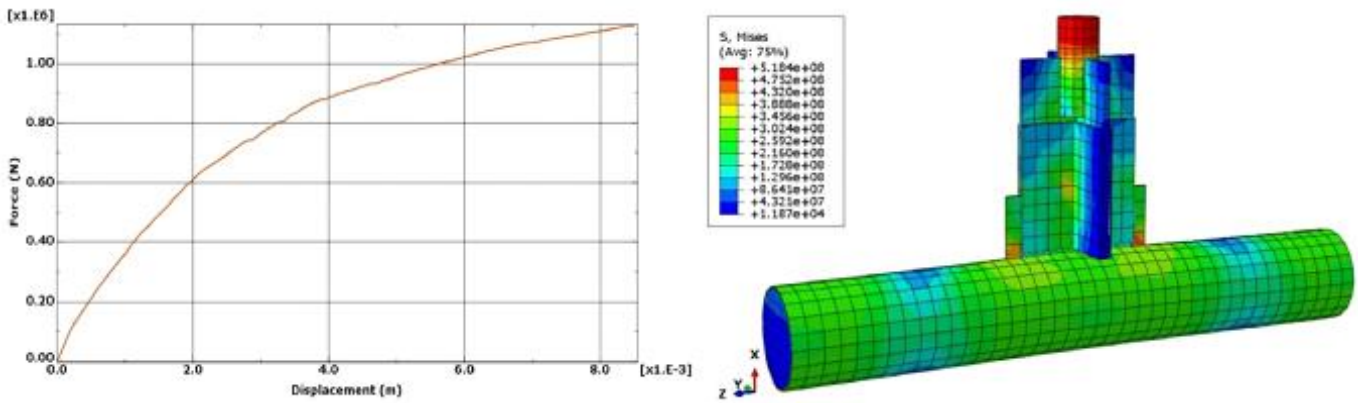
شکل ۱۱. خروجی‌های مربوط به مدل Dt70 f40 t11

Fig. 11. Results of Dt70 f40 t11 model.



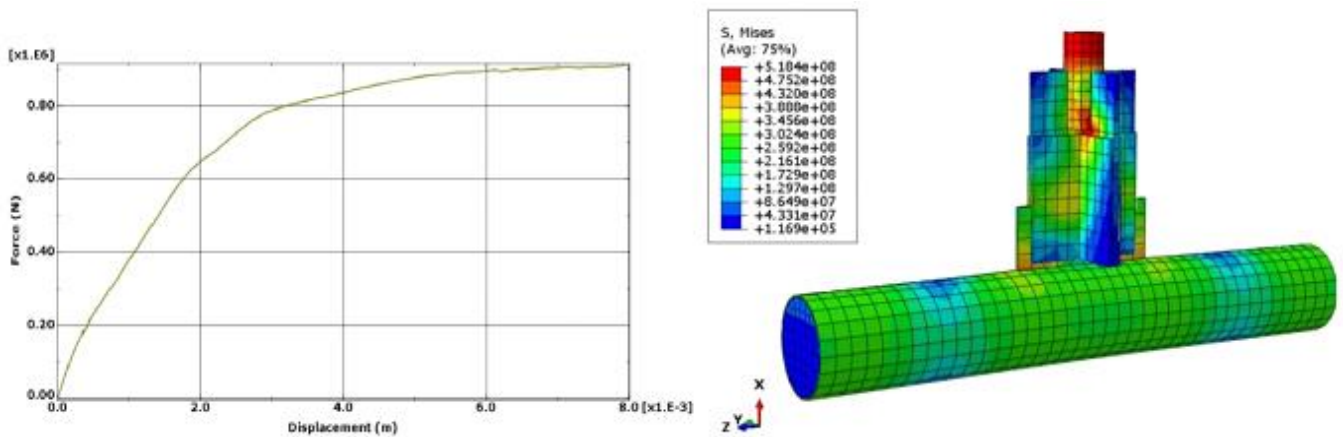
شکل ۱۲. خروجی‌های مربوط به مدل Dt70 f40 t14

Fig.12. Results of Dt70 f40 t14 model.



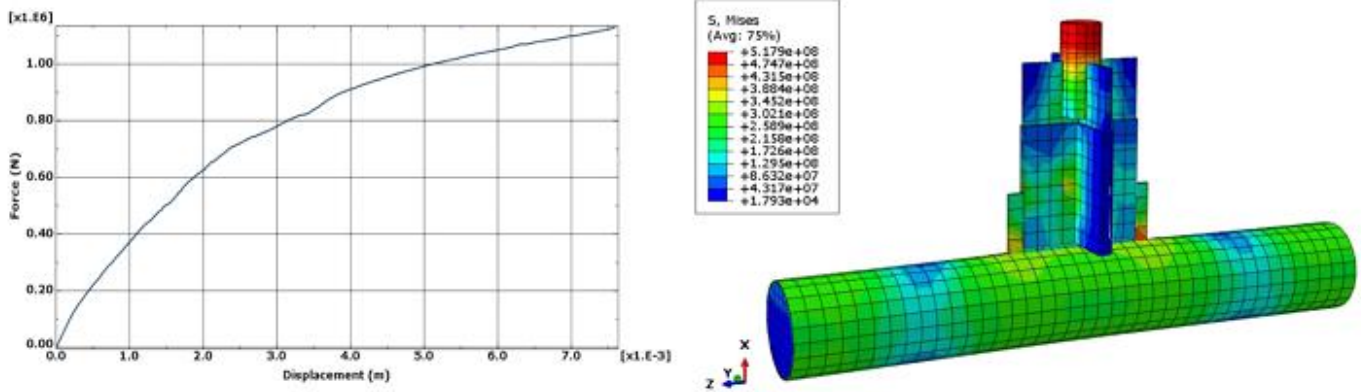
شکل ۱۳. خروجی‌های مربوط به مدل Dt70 f45 t11

Fig. 13. Results of Dt70 f45 t11 model.



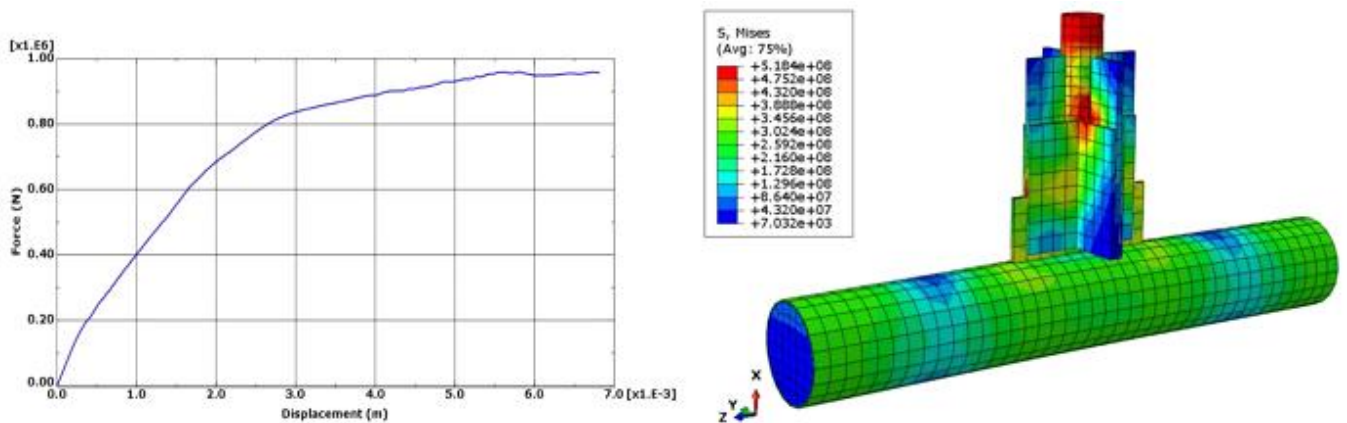
شکل ۱۴. خروجی‌های مربوط به مدل Dt70 f45 t14

Fig. 14. Results of Dt70 f45 t14 model.



شکل ۱۵. خروجی‌های مربوط به مدل Dt70 f50 t11

Fig. 15. Results of Dt70 f50 t11 model.



شکل ۱۶. خروجی‌های مربوط به مدل Dt70 f50 t14

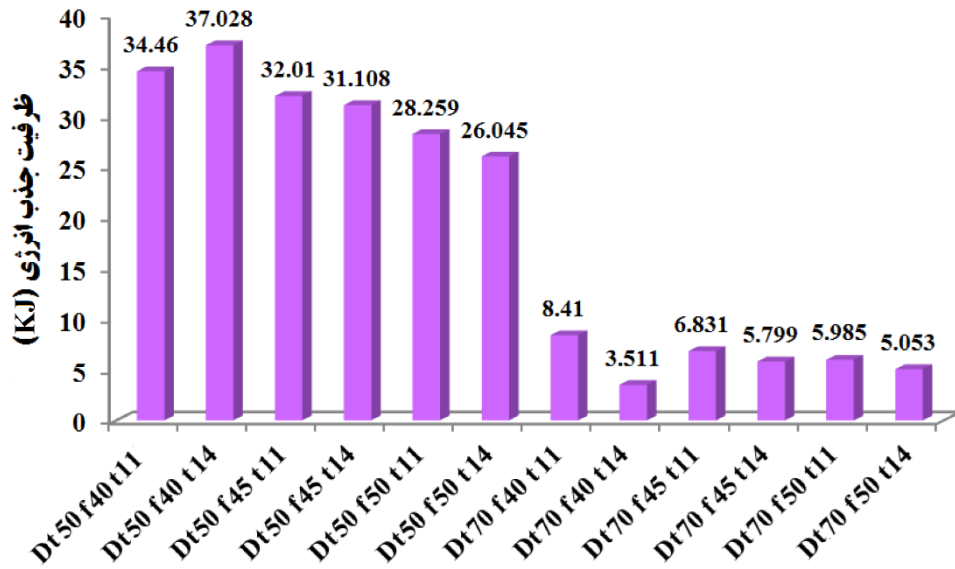
Fig. 16. Results of Dt70 f50 t14 model.

افزایش می‌یابد، می‌توان گفت علت عدم تسلیم لوله فولادی در حالت $D/t = 70$ (برخلاف حالت $D/t = 50$)، افزایش پارامتر لاغری می‌باشد که باعث می‌شود لوله فولادی به علت کمانش موضعی نتواند به حداکثر ظرفیت خود برسد.

در ادامه مقایسه‌ای بین مدل‌های مختلف با توجه به میزان جذب انرژی (مساحت زیر نمودار بار- تغییر مکان) اتصال ستون CFST به ورق گاست صورت می‌گیرد.

همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌گردد، از بین ۱۲ مدل اجزای محدود اتصال ورق گاست به ستون CSFT که تحت کشش محوری قرار گرفته‌اند، میزان ظرفیت جذب انرژی در حالتی که در آن ضخامت ورق اتصال ۱۴ میلی‌متر، مقاومت مشخصه فشاری بتن

در ابتدا با بررسی کانتورهای تنش فون میزس می‌توان گفت که به طور کلی برای مدل‌های تحت کشش محوری، خرابی در اثر برش پانچ لوله فولادی رخ داده و به شکل گسیختگی لوله فولادی در امتداد محل اتصال با ورق گاست ظهور می‌کند. البته در مدل‌های با نسبت D/t برابر ۷۰ (شکل‌های ۱۱ تا ۱۶) گسیختگی به طور عمده در دو انتهای ورق گاست متمرکز بوده و قسمت‌های میانی تنش‌های کمتری را تجربه می‌کنند. همچنین برای مدل‌های با نسبت D/t برابر ۵۰ (شکل‌های ۵ تا ۱۰)، علاوه بر تسلیم محل اتصال ورق گاست با لوله فولادی، اثراتی از تسلیم روی لوله فولادی (در امتداد نقاط انتهایی ورق گاست) نیز مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه با افزایش نسبت قطر به ضخامت لوله فولادی امکان وقوع کمانش موضعی در آن



شکل ۱۷. میزان جذب انرژی در مدل‌های مورد بررسی

Fig. 17. The energy absorption results in the studied models.

ضخامت ورق گاست به ترتیب ۲/۸ درصد و ۷/۸ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که به طور کلی در حالت $D/t=50$ ، اثرگذاری پارامتر ضخامت ورق گاست در رفتار اتصال ورق گاست به ستون CSFT ناچیز می‌باشد.

این در حالی است که در حالت نسبت قطر به ضخامت ۷۰ و مقاومت فشاری بتن ۴۰ مگاپاسکال، افزایش ضخامت ورق گاست به ۱۴ میلی‌متر باعث کاهش ۵۸/۳ درصدی میزان جذب انرژی می‌شود. همچنین با ثابت بودن نسبت قطر به ضخامت برابر ۷۰، ظرفیت جذب انرژی برای مقاومت‌های فشاری بتن ۴۵ و ۵۰ مگاپاسکال به ترتیب ۱۵/۱ درصد و ۱۵/۷ درصد کاهش می‌یابد.

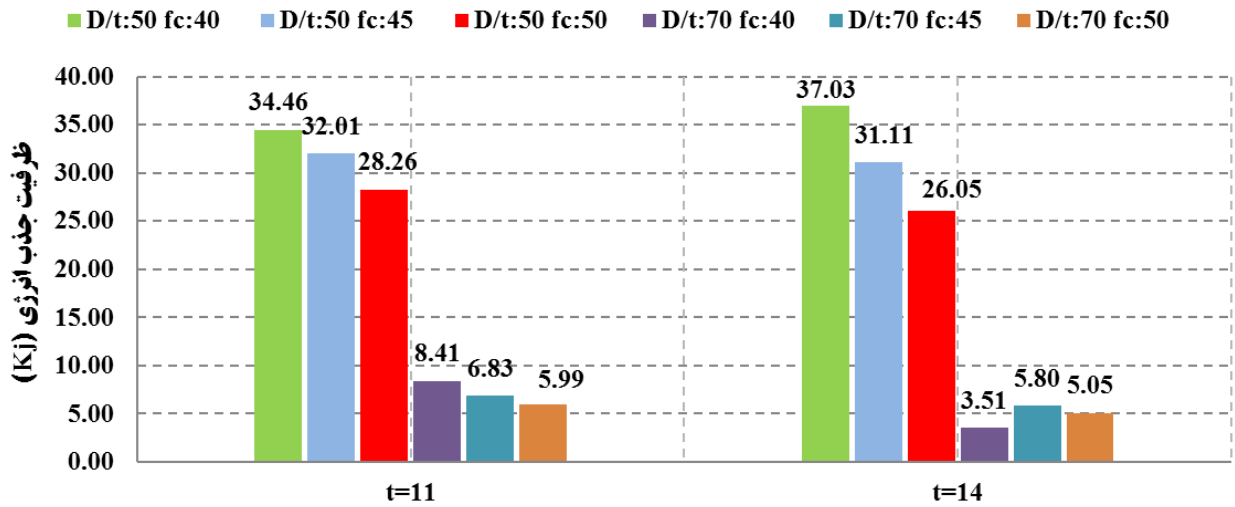
همانطور که مشاهده می‌گردد، تغییر ضخامت ورق گاست از ۱۱ به ۱۴ میلی‌متر بر ظرفیت جذب انرژی مدل‌های با نسبت قطر به ضخامت ۷۰ تاثیرگذاری بیشتری دارد. با توجه به اینکه محل وقوع تسلیم در محدوده اتصال ورق گاست به لوله فولادی است، می‌توان گفت که افزایش ضخامت ورق گاست باعث می‌شود نواحی تسلیم روی ورق گاست کاهش یافته و به جداره لوله فولادی منتقل شود. در نتیجه با افزایش نواحی تسلیم روی عضو CSFT، ظرفیت جذب انرژی مجموعه اتصال کاهش خواهد یافت.

۴۰ مگاپاسکال و نسبت قطر به ضخامت لوله برابر ۵۰ می‌باشد (مدل Dt50 f40 t14)، در مقایسه با سایر حالات بیشتر شده است. این میزان بیش از ۱۰ برابر میزان جذب انرژی در ضعیف‌ترین حالت می‌باشد که در آن ضخامت ورق اتصال ۱۴ میلی‌متر، مقاومت مشخصه فشاری بتن ۴۰ مگاپاسکال و نسبت قطر به ضخامت لوله برابر ۷۰ در نظر گرفته شده است (مدل Dt70 f40 t14). در ادامه هر یک از متغیرهای در نظر گرفته شده به صورت جداگانه ارزیابی خواهند شد.

۴-۱- بررسی اثر ضخامت ورق گاست

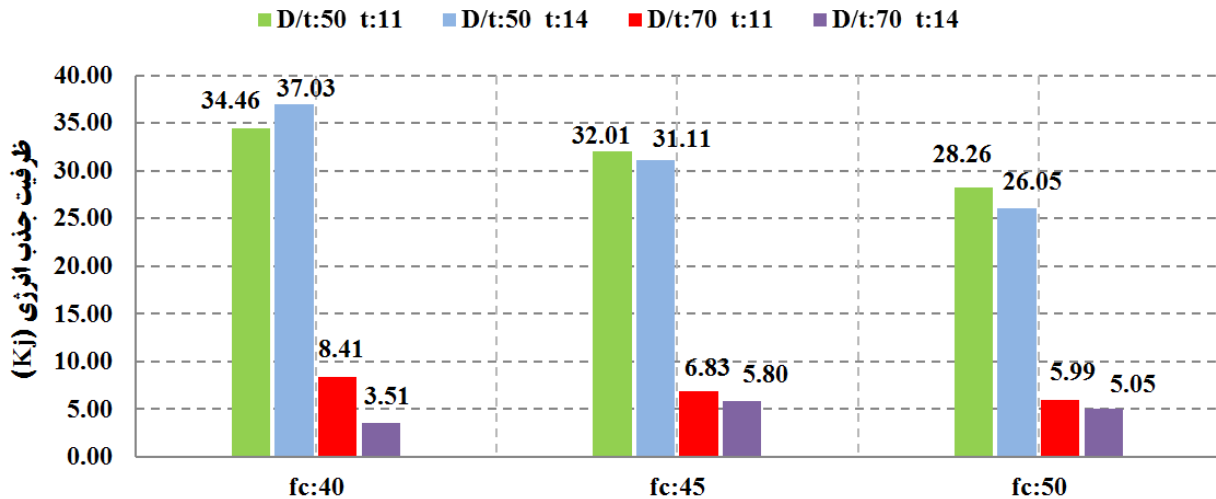
در این بخش به بررسی اثر ضخامت ورق گاست بر نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های اجزای محدود اتصال ورق گاست به ستون CFST پرداخته شده است. برای این منظور در نمودار مقایسه‌ای شکل ۱۸، میزان ظرفیت انرژی جذب شده‌ی مدل‌ها برای هر یک از ضخامت‌های ۱۱ و ۱۴ میلی‌متر ارائه شده است.

به طوری که ملاحظه می‌گردد، افزایش ضخامت ورق گاست متصل به ستون CFST با نسبت قطر به ضخامت ۵۰ و مقاومت فشاری بتن ۴۰ مگاپاسکال، منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی به میزان ۷/۵ درصد شده است. با ثابت بودن نسبت D/t و تغییر مقاومت فشاری بتن به ۴۵ و ۵۰ مگاپاسکال، میزان جذب انرژی با افزایش



شکل ۱۸. بررسی اثر ضخامت ورق گاست بر میزان جذب انرژی مدل ها

Fig. 18. The effect of gusset plate thickness on the energy absorption of models.



شکل ۱۹. جذب انرژی مربوط به حالت‌های ۱ تا ۱۲ با هدف مقایسه اثر مقاومت بتن

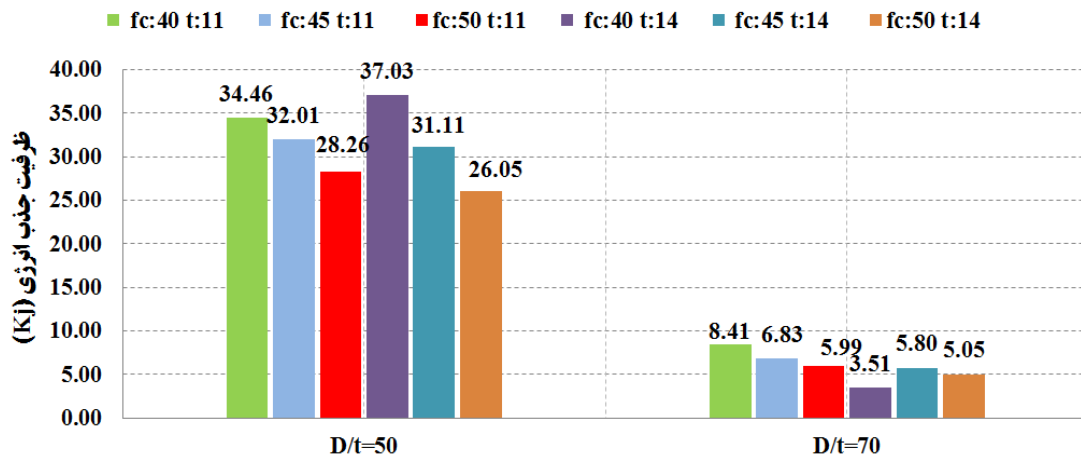
Fig. 19. Energy absorption of models with the aim of comparing the effect of concrete strength.

می‌گردد، در ستون با نسبت قطر به ضخامت ۵۰، ضخامت ورق گاست ۱۱ میلی‌متر و بتن با مقاومت فشاری ۵۰ مگاپاسکال، ظرفیت جذب انرژی به میزان ۱۸ درصد نسبت به مقدار متناظرش با بتن ۴۰ مگاپاسکال کمتر شده است. همچنین در ستون با نسبت قطر به ضخامت ۵۰، ضخامت ورق گاست ۱۴ میلی‌متر و بتن با مقاومت فشاری ۵۰ مگاپاسکال، جذب انرژی به میزان ۳۰ درصد نسبت به مقدار متناظرش با بتن ۴۰ مگاپاسکال کمتر شده است. از سوی

۴-۲- بررسی اثر مقاومت فشاری بتن

یکی دیگر از پارامترهایی که در مطالعه‌ی حاضر به آن پرداخته شده است، بررسی اثر مقاومت مشخصه فشاری بتن بر رفتار ستون‌های CFST تحت کشش می‌باشد.

همانطور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌گردد، با افزایش مقاومت مشخصه فشاری بتن استفاده شده در ستون CSFT، در بیشتر حالات میزان ظرفیت جذب انرژی کاهش یافته است. به طوری که ملاحظه



شکل ۲۰. جذب انرژی مربوط به حالت‌های ۱ تا ۱۲ با هدف مقایسه اثر نسبت قطر به ضخامت ستون فولادی

Fig. 20. Energy absorption of models with the aim of comparing the effect of D/t ratio of the steel column.

برای بررسی این مسئله، در شکل ۲۰ میزان ظرفیت جذب انرژی با هدف بررسی نسبت قطر به ضخامت برای مدل‌هایی که تحت کشش محوری قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که برای مدل‌های با ضخامت ورق گاست ۱۱ میلی‌متر و دارای مقاومت فشاری بتن ۴۰، ۴۵ و ۵۰ مگاپاسکال، با افزایش نسبت قطر به ضخامت از ۵۰ به ۷۰، ظرفیت جذب انرژی به ترتیب ۷۶، ۷۹ و ۷۹ درصد کاهش می‌یابد. این تغییر نسبت قطر به ضخامت برای مدل‌های دارای ضخامت ورق گاست ۱۴ میلی‌متر، به ازای مقاومت‌های بتن ذکر شده در بالا به ترتیب باعث کاهش جذب انرژی به میزان ۹۱، ۸۱ و ۸۱ درصد می‌گردد.

همانطور که مشاهده می‌گردد، نسبت قطر به ضخامت ستون فولادی نقش تاثیرگذاری بر میزان ظرفیت جذب انرژی اتصالات شبیه‌سازی شده داشته و با افزایش این نسبت، میزان ظرفیت جذب انرژی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. علت این امر، کاهش محدوده تسلیم در جداره لوله فولادی ناشی از افزایش امکان وقوع کمناش موضعی می‌باشد که باعث می‌شود سازه پیش از رسیدن به حداکثر ظرفیت خود دچار گسیختگی شود.

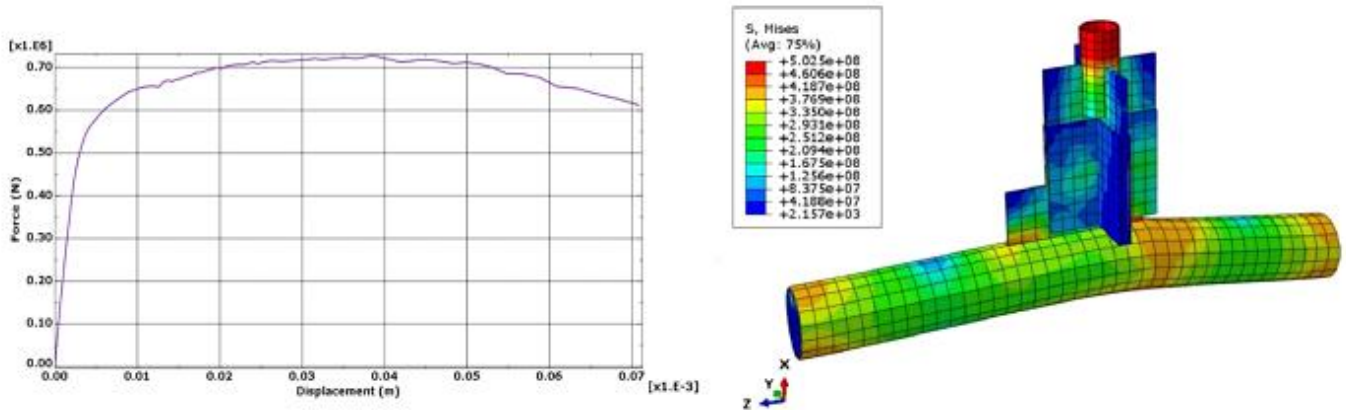
با توجه به این مقدار کاهش قابل توجه، می‌توان به این نتیجه دست یافت که افزایش نسبت قطر به ضخامت لوله‌های فولادی، در مقایسه با سایر پارامترهای مورد بررسی نظیر ضخامت ورق اتصال و مقاومت فشاری بتن موثرتر بوده و توجه به آن در طراحی ستون‌های CSFT ضروری است.

دیگر در ستون با نسبت قطر به ضخامت ۷۰ و ضخامت ورق گاست ۱۱ میلی‌متر و دارای بتن با مقاومت فشاری ۵۰ مگاپاسکال، میزان جذب انرژی به میزان ۲۹ درصد نسبت به مقدار متناظرش با بتن ۴۰ مگاپاسکال کمتر شده است. تنها حالتی که با افزایش مقاومت بتن، ظرفیت جذب انرژی افزایش یافته است مربوط می‌شود به ستون با نسبت قطر به ضخامت ۷۰ و ضخامت ورق گاست ۱۴ میلی‌متر که در آن، با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۴۰ مگاپاسکال به ۵۰ مگاپاسکال، میزان جذب انرژی ۴۴ درصد افزایش یافته است.

با توجه به مقادیر اشاره شده، می‌توان به این نتیجه دست یافت که اگر چه پر کردن مقاطع لوله‌ای توخالی با بتن از کمناش موضعی به طرف داخل جداره فولادی جلوگیری نموده و آن را به تعویق می‌اندازد، اما استفاده از بتن با مقاومت فشاری بیشتر همواره منجر به افزایش ظرفیت باربری و میزان جذب انرژی نمی‌شود؛ دلیل این موضوع آن است که افزایش مقاومت فشاری بتن، افزایش ترد شدگی و سختی آن را در پی دارد که این امر موجب می‌شود استهلاک انرژی مجموعه کاهش یابد.

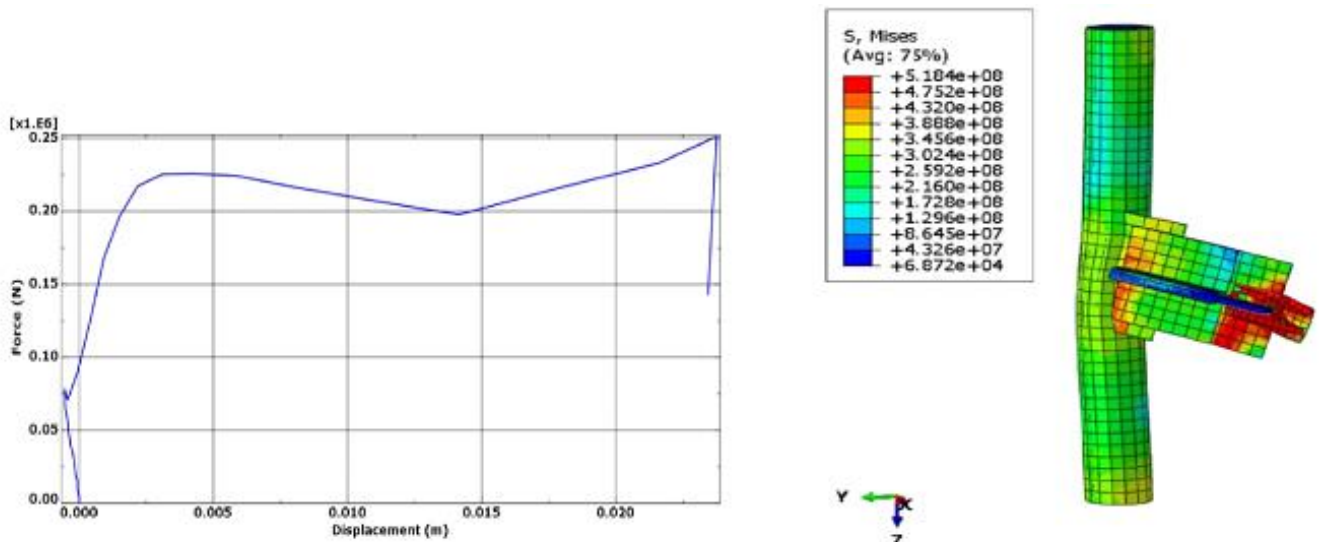
۴-۳- بررسی اثر نسبت قطر به ضخامت لوله فولادی (D/t)

در این قسمت به تحلیل نتایج حاصل از مدل‌های مورد بررسی از جنبه نسبت قطر به ضخامت ستون فولادی (ضریب فشردگی مقطع) پرداخته شده است که پارامتری مهم در بررسی پدیده کمناش موضعی جداره فولادی می‌باشد.



شکل ۲۱. خروجی‌های مربوط به مدل Dt50 f40 t14 تحت بارگذاری کششی برون محوری

Fig. 21. Results of Dt50 f40 t14 model under the eccentric tensile.



شکل ۲۲. خروجی‌های مربوط به مدل Dt50 f40 t14 تحت بارگذاری خمشی صفحه‌ای

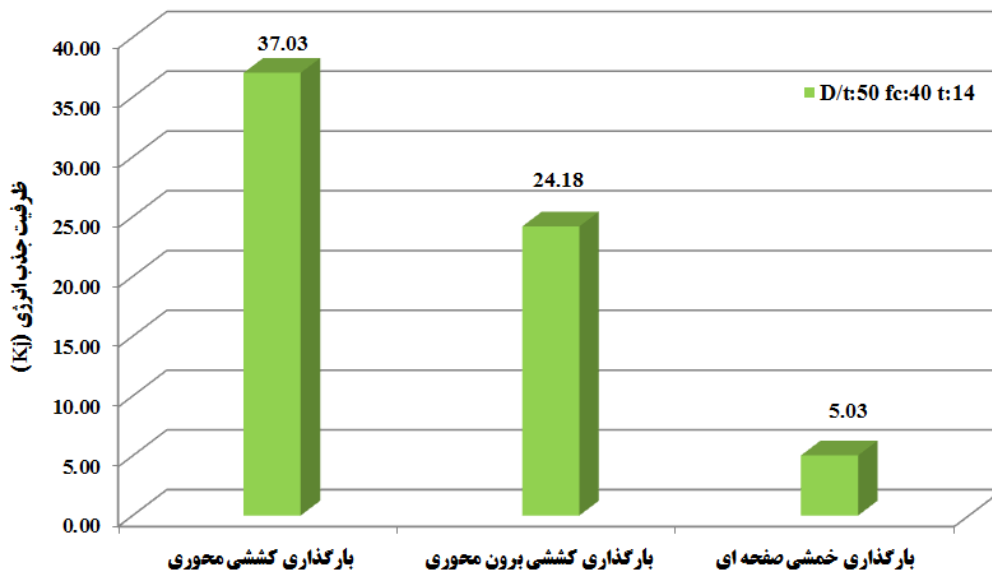
Fig. 22. Results of Dt50 f40 t14 model under the in-plane bending.

مقاومت فشاری مشخصه بتن برابر ۴۰ مگاپاسکال و ضخامت ورق اتصال آن برابر ۱۴ میلی‌متر بوده و بهترین رفتار را از لحاظ میزان ظرفیت جذب انرژی دارا می‌باشد، تحت بارگذاری‌های مذکور قرار گرفته و تحلیل می‌گردد. نتایج در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است.

به منظور مقایسه نتایج اتصال ورق گاست به ستون CSFT تحت بارگذاری کششی محوری با نتایج متناظر در حالت بارگذاری کششی برون محور و بارگذاری خمشی صفحه‌ای، می‌توان به شکل

۴-۴ بررسی اثر نوع بارگذاری

در بخش‌های قبلی به بررسی رفتار اتصال ورق گاست به ستون CSFT تحت اثر بارگذاری کششی محوری پرداخته شد. این در حالیست که در واقعیت احتمال ایجاد بارهای غیرقابل انتظاری نظیر بارهای برون محور نیز در محل اتصال ورق گاست وجود دارد. بنابراین ضروری است رفتار مدل‌های مورد بررسی، تحت بارگذاری کششی برون محور و همچنین خمشی صفحه‌ای نیز مورد مطالعه قرار گیرد. به همین دلیل مدل دوم که در آن نسبت قطر به ضخامت برابر ۵۰،



شکل ۲۳. مقایسه‌ی اثرگذاری حالت‌های مختلف بارگذاری بر روی اتصالات در ستون‌های CSFT مورد بررسی

Fig. 23. Comparison of the effects of different loadings on the connection behavior in the studied CSFT columns.

تحت بارهای محوری کششی، کششی برون محور و خمشی صفحه‌ای تحلیل گردیدند. مهم‌ترین نتایج تحقیق را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر بیان نمود:

در اتصال ورق گاست به ستون CFST با $D/t=50$ و مقاومت فشاری بتن ۴۰، ۴۵ و ۵۰ مگاپاسکال، با افزایش ضخامت ورق گاست از ۱۱ به ۱۴ میلی‌متر ظرفیت جذب انرژی به ترتیب ۷/۵ درصد افزایش، ۲/۸ درصد کاهش و ۷/۸ درصد کاهش می‌یابد. این در حالی است که برای $D/t=70$ با مقاومت‌های فشاری بتن ۴۰، ۴۵ و ۵۰ مگاپاسکال، افزایش ضخامت ورق گاست به ترتیب باعث کاهش ۵۸/۳، ۱۵/۱ و ۱۵/۷ درصدی میزان جذب انرژی می‌شود. ملاحظه می‌گردد که تغییر ضخامت ورق گاست بر ظرفیت جذب انرژی مدل‌های با نسبت قطر به ضخامت ۷۰ تاثیرگذاری بیشتری دارد.

با افزایش مقاومت فشاری بتن استفاده شده در ستون CSFT، در بیشتر حالات میزان ظرفیت جذب انرژی کاهش یافته است. در ستون با $D/t=50$ و ضخامت ورق گاست ۱۱ میلی‌متر، با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۴۰ به ۵۰ مگاپاسکال، میزان ظرفیت جذب انرژی به میزان ۱۸ درصد کاهش یافته است. در صورتی که اگر ضخامت ورق گاست ۱۴ میلی‌متر گردد (با ثابت بودن سایر پارامترها)، جذب انرژی

۲۳ مراجعه نمود. همانطور که مشاهده می‌گردد، در حالت اعمال بارگذاری کششی برون محور میزان ظرفیت جذب انرژی برابر ۲۴/۱۸ کیلوژول شده است که در مقایسه با حالت بارگذاری کششی محوری حدوداً به میزان ۵۳ درصد کاهش یافته است. همچنین در حالت اعمال بارگذاری خمشی صفحه‌ای میزان ظرفیت جذب انرژی ۵/۰۳ کیلوژول شده است که در مقایسه با حالت بارگذاری کششی محوری حدوداً به میزان ۸۶ درصد کاهش یافته است. با توجه به مقادیر حاصل شده می‌توان به این نتیجه دست یافت که نحوه اعمال بار بر روی اتصالات ستون CSFT نقش تاثیرگذاری در میزان جذب انرژی داشته و می‌بایست در طراحی‌های مربوطه، توجه لازم به این موضوع صورت پذیرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با مدل‌سازی اجزای محدود، رفتار اتصال لوله فولادی پر شده با بتن به ورق اتصال مورد توجه قرار گرفت. پارامترهای تاثیرگذار در طراحی این اتصالات شامل ضخامت ورق اتصال، مقاومت مشخصه فشاری بتن، نسبت قطر به ضخامت عضو CFST متصل به ورق گاست در نظر گرفته شده و مجموعاً ۱۴ مدل اجزای محدود

بسیار مناسبی محسوب شود، اما دقت آن در پیش‌بینی محل شروع ترک‌ها و مسیر خرابی همراه با تقریب خواهد بود. بدیهی است مدل‌سازی کلیه اجزای تشکیل دهنده بتن می‌تواند دقت پیش‌بینی نتایج تحلیل را افزایش داده و علاوه بر آن، الگویی جهت مدل‌سازی بتن حاوی انواع الیاف را نیز فراهم آورد. همچنین در این تحقیق مدل‌سازی تماس بین فولاد و بتن و همچنین تماس اجزای فولادی به یکدیگر با ساده‌سازی‌هایی همراه می‌باشد که ممکن است در تعیین مکانیزم گسیختگی مؤثر باشد. برای افزایش دقت مدل‌سازی تماس فولاد و بتن می‌توان از المان‌های رابط استفاده نموده و مدل‌سازی دقیق‌تر اتصال اجزای فولادی به یکدیگر را می‌توان به کمک مدل‌سازی کلیه جوش‌ها با در نظر گرفتن المان رابط بین جوش و عضو امکان‌پذیر نمود. البته ذکر این نکته ضروری است که رفع هر دو محدودیت فوق مستلزم هزینه محاسباتی بسیار بالایی بوده و برای سازه‌هایی با ابعاد بزرگ و جزئیات زیاد، تنها به کمک ابر کامپیوترها امکان‌پذیر می‌باشد. لازم به ذکر است که مطالعه پارامتری مذکور را می‌توان با در نظر گرفتن محدوده گسترده‌تری از نسبت قطر به ضخامت لوله و مقاومت مشخصه بتن و با اضافه نمودن پارامترهای مؤثر دیگری چون مشخصات مصالح فولادی و تغییر نوع بارگذاری به بارگذاری چرخه‌ای تکمیل نمود.

منابع

- [1] A. Yadegari, Gh. Pachideh, M. Gholhaki, M. Shiri, Seismic Performance of C-PSW, 2nd international conference on civil engineering, architecture & urban planning elites, London, 2016.
- [2] T. Moradi Shaghghi, F. Nateghi E, Experimental research of stiffeners effects on the behavior of concrete filled steel tube columns (CFST), Sharif Journal of Civil Engineering, 2.26(2) (2010) 3-10.
- [3] M.H. Yazdan panah, A. Taheri, Evaluation and compare three cross-sections for CFT columns in terms of efficiency and ductility, 2rd International Conference on New Research Findings in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, (IFIA), Tehran, (2016).
- [4] F. Xu, J. Wang, J. Chen, Y-h. Wang, Load-transfer mechanism in angle-encased CFST members under axial tension, Engineering Structures, 178 (2019), 162-178.
- [5] F. Xu, Sh-Sh. Song, Zh. Lai, J. Chen, Mechanism of load

به میزان ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با تغییر مقاومت فشاری بتن از ۴۰ به ۵۰ مگاپاسکال در ستون با $D/t=70$ ، میزان جذب انرژی برای ضخامت ورق گاست ۱۱ میلی‌متر با کاهش ۲۹ درصدی و برای ضخامت ورق گاست ۱۴ میلی‌متر با افزایش ۴۴ درصدی همراه می‌باشد. مشاهده می‌گردد که استفاده از بتن با مقاومت فشاری بیشتر همواره منجر به افزایش ظرفیت باربری و میزان جذب انرژی نمی‌شود، اگر چه پر کردن مقاطع لوله‌ای توخالی با بتن از کمانش موضعی به طرف داخل جداره‌ی فولادی جلوگیری می‌نماید و کمانش موضعی جداره‌ی فولادی را به تعویق می‌اندازد.

میزان ظرفیت جذب انرژی با هدف بررسی نسبت قطر به ضخامت برای مدل‌هایی که تحت کشش محوری قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که برای مدل‌های با ضخامت ۱۱ میلی‌متر و دارای مقاومت بتن ۴۰، ۴۵ و ۵۰ مگاپاسکال، با افزایش نسبت D/t از ۵۰ به ۷۰، ظرفیت جذب انرژی به ترتیب ۷۶، ۷۹ و ۷۹ درصد کاهش می‌یابد. این تغییر نسبت قطر به ضخامت برای مدل‌های دارای ضخامت ۱۴ میلی‌متر، به ازای مقاومت‌های بتن ذکر شده در بالا به ترتیب باعث کاهش جذب انرژی به میزان ۹۱، ۸۱ و ۸۱ درصد می‌گردد. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت D/t عضو CFST، میزان ظرفیت جذب انرژی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. این امر نشان می‌دهد که پارامتر مذکور در مقایسه با سایر پارامترهای مورد بررسی نظیر ضخامت ورق گاست و مقاومت فشاری بتن از اهمیت بالاتری برخوردار است.

در حالت اعمال بارگذاری کششی برون محور و خمش صفحه‌ای، میزان ظرفیت جذب انرژی در مقایسه با حالت بارگذاری کشش محوری به ترتیب ۵۳ درصد و ۸۶ درصد کاهش یافته است. با توجه به مقادیر حاصل شده می‌توان به این نتیجه دست یافت که نحوه اعمال بار بر روی اتصالات ستون CSFT نقش تاثیرگذاری در میزان جذب انرژی داشته و می‌بایست در طراحی‌های مربوطه، توجه لازم به این موضوع صورت پذیرد.

اگر چه در این تحقیق از روش‌ها و ایده‌آل‌سازی‌های متداول و معتبر در مدل‌سازی استفاده گردید، با این حال، وجود برخی محدودیت‌ها ممکن است نتایج تحقیق را با تقریب‌هایی مواجه سازد. به عنوان مثال مدل‌سازی بتن به صورت یک ماده همگن و بدون توجه به توزیع سنگدانه و خمیر سیمان که مدلی بسیار مرسوم می‌باشد، ممکن است در پیش‌بینی رفتار کلی سازه روش

- punching shear fracture-based design of longitudinal plate to concrete-filled CHS connections, *Construction and Building Materials*, 156 (2017), 91-106.
- [16] X. Li, L. Zhang, X. Xue, X. Wang, H. Wang, Prediction on ultimate strength of tube-gusset KT-joints stiffened by 1/4 ring plates through experimental and numerical study, *Thin-Walled Structures*, 123 (2018), 409-419.
- [17] H. Chang, J. Xia, Zh. Guo, Ch. Hou, W. Din, F. Qin, Experimental study on the axial compressive strength of vertical inner plate reinforced square hollow section T-joints, *Engineering Structures*, 172 (2018), 131-140.
- [18] Sh-Sh. Song, J. Chen, F. Xu, Mechanical behaviour and design of concrete-filled K and KK CHS connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 188 (2022), 107000.
- [19] F. Xu, J. Chen, W.-l. Jin, Experimental investigation of concrete-filled steel tubular longitudinal gusset plate connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 124 (2016) 163-172.
- [20] S.S. Mahini, H.R. Ronagh, Web-bonded FRPs for relocation of plastic hinges away from the column face in exterior RC joints, *Composite Structures*, 93(10) (2011) 2460-2472.
- [21] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, R. Park, Theoretical stress-strain model for confined concrete. *J. Struct. Eng.*, 114(8) (1988), 1804–1826.
- [22] F. E. Richart, A. Brandtzaeg, R. L. Brown, A study of the failure of concrete under combined compressive stresses Bull. 185, Univ. of Illinois Engineering Experimental Station, Champaign, Ill, (1928).
- [23] H-T. Hu, Ch-Sh. Huang. M-H. Wu, Y-M. Wu, Nonlinear Analysis of Axially Loaded Concrete-Filled Tube Columns with Confinement Effect, *J. Struct. Eng.*, 129 (2003), 1322-1329.
- [24] L. P. Saenz, Discussion of 'Equation for the stress-strain curve of concrete' by P. Desayi, and S. Krishnan. *ACI J.*, 61 (1964), 1229–1235.
- [25] H.-T. Hu, W. C. Schnobrich, Constitutive modeling of concrete by using nonassociated plasticity. *J. Mater. Civ. Eng.*, 1(4) (1989), 199–216.
- introduction and transfer within steel-encased CFST members with shear connections, *Engineering Structures*, 242 (2021), 112576.
- [6] Gh. Pachideh, M. Gholhaki, A. Moshtagh, An Experimental Study on Cyclic Performance of the Geometrically Prismatic Concrete-Filled Double Skin Steel Tubular (CFDST) Columns, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45 (2021), 629–638.
- [7] Gh. Pachideh, M. Gholhaki, A. Moshtagh, Impact of Temperature Rise on the Seismic Performance of Concrete-Filled Double Skin Steel Columns with Prismatic Geometry, *Journal of Testing and Evaluation* 49 (4) (2020), 2800-2815.
- [8] M. Ranjbari, K. Abedi, Investigate the behavior of CFT steel columns reinforced with stiffeners and made of high-strength fire-resistant concrete, 8th National Congress of Civil Engineering, (2014).
- [9] R. Feng, B. Young, Tests of concrete-filled stainless steel tubular T-joints, *Journal of Constructional Steel Research*, 64(11) (2008) 1283-1293.
- [10] R. Feng, B. Young, Behaviour of concrete-filled stainless steel tubular X-joints subjected to compression, *Thin-Walled Structures*, 47(4) (2009) 365-374.
- [11] R. Feng, B. Young, Design of Concrete-Filled Stainless Steel Tubular Connections, *Advances in Structural Engineering*, 13(3) (2010) 471-492.
- [12] Y. Sakai, T. Hosaka, A. Isoe, A. Ichikawa, K. Mitsuki, Experiments on concrete filled and reinforced tubular K-joints of truss girder, *Journal of Constructional Steel Research*, 60(3) (2004) 683-699.
- [13] S.R. Mir ghaderi, Y. Balazadeh, Investigation the connection of the beam to the concrete filled tube by the mid plates, 3rd National Conference on Retrofitting, Tabriz, (2008).
- [14] J. Chen, J.-h. Zhu, F. Xu, and W. Xue, 02.05: Design of concrete-filled steel tubular longitudinal gusset plate connections, *ce/papers*, 1 (2017): 471-478.
- [15] F. Xu, J. Chen, T-M. Chan, Numerical analysis and

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Ebrahimnejad, A. Razi, P. Arezoumand Omid, Numerical investigation of effective parameters on the behavior of concrete-filled steel tubular gusset plate connections, Amirkabir J. Civil Eng., 55(3) (2023) 701-722.

DOI: 10.22060/ceej.2023.20837.7545



