



Investigation of Vulnerability of Concrete Filled Steel Column Connections under Different Blast Scenarios

A. Aliakbari¹, S. A. Hashemi¹, M. Ziaei^{2*}, Y. Nasira¹

¹Zanjan Islamic Azad University, Zanjan, Iran

²Garmsar University, Garmsar, Iran

ABSTRACT: Considering the increasing hostile and terroristic threats in the country, it is important to consider the passive defence criteria in structures. The desirable properties of steel and concrete can be used simultaneously to increase the strength of structural members. Concrete-filled steel tube columns (CFSTs) have been proposed as an efficient system in previous years. The main problem with using this type of column is how to connect the beam to such a column and extensive research has been done for seismic load scenarios. Despite the excellent resistance of these types of columns to the blast load, no comprehensive investigation has yet been conducted on the performance of beam-to-column joints under blast load. In this paper, the behavior of three types of beam-to-column connections under 5 blast scenarios is investigated. ABAQUS software was used to conduct the research. Verification was first performed using the results of an experimental study and a good agreement was observed. The behavior of beam-to-column blast-loaded connections was investigated using 16 different models using explicit nonlinear dynamic analysis. The results were compared in terms of stress, strain and damage contour as well as force, energy absorption, displacement, rotation and torsion diagrams. It was observed that the optimal connection where the connection was carried out as an extension of the beam inside the column, all parts of the column contributed to the load carrying and energy absorption and very good behavior was observed. In this case, the plastic joint in the beam is formed away from the column face.

Review History:

Received: Aug. 04, 2020

Revised: Sep. 16, 2020

Accepted: Jan. 18, 2021

Available Online: Jan. 29, 2021

Keywords:

Steel beam to Concrete filled steel tube column

Blast

Finite element simulation

Nonlinear dynamic analysis

Vulnerability

1- Introduction

Steel-concrete composite structures have been considered by engineers for decades due to the proper cooperation of these two materials in providing the tensile and compressive strength required for structural members. One of the composite member types is Concrete Filled Steel Tube columns (CFST). In these columns, the steel wall plays the role of longitudinal reinforcement and stirrups and also provides desirable confinement for the concrete core. The concrete core also delays the bending deformation and buckling of the steel wall. As a result, these columns have high stiffness, strength and ductility, all of which are very desirable to reduce the vulnerability of the structure to explosion load. Consequently, it can be expected that the use of CFST columns, due to the confinement of concrete inside the steel tube and prevention of local buckling of the steel wall, will reduce the damages caused by the explosion in the vicinity of the structure to some extent.

The connections of steel beams to CFST columns can be designed to be pinned or fixed connections. Since the behavior of joints in the structure is very important and strongly affects the overall behavior of the structure, the connections of steel beams to such columns have been

studied by many researchers under earthquake loading [1-4]. However, the behavior of the connections in this type of columns has been less studied under blast loading.

The explosion causes a shock wave whose front pressure gradually decreases as it moves away from the blast center. The wave front is necessarily vertical due to the sudden increase in pressure caused by the explosion. The maximum pressure caused by the explosion is at the end of this initial phase. The propagation speed decreases with time and distance, but is usually greater than the speed of sound in the environment.

Since in the forced vibration phase induced by explosion load, the response of the structure is localized and in the area close to the explosion [5], the vulnerability is judged by controlling the amount of equivalent plastic strain in steel and tensile and compressive damage in concrete. In the free vibration phase, where the response of the structure is a displacement response [5], the vulnerability of the structure is judged according to the amount of rotation of the beam and the displacement of its end, as well as the deformation of the connection members.

2- Methodology

Finite element simulation is employed to investigate the behavior of steel beam to CFST column connections.

*Corresponding author's email: F.m.ziaei@fmgarmsar.ac.ir



To ensure the accuracy of the predictions of finite element models, validation was carried out using the results of an experimental blast test on CFST columns [6].

The finite element model was developed according to the details reported in the experiment. Eight-node three-dimensional elements were used to simulate the specimen. The behavior of steel was defined with a bilinear model by defining the yield stress and the ultimate stress. The behavior of concrete was defined using the concrete damaged plasticity model. This model is used for different loads and simulates the behavior of concrete by expressing separate behavior of concrete in pressure and tension. In this model, damage states are defined by a numerical variable called damage (D).

The CONWEP method was used to simulate the explosion load. In this method, the center of the explosive and its weight as well as the surface affected by the explosion charge, are determined in the model.

The specimen selected for validation is specimen C1, in which the weight of the explosive is 5 kg, the height of the explosive is 50 cm and its distance from the perimeter of the column is 20 cm. The analysis is of explicit nonlinear dynamic type. The size of the solution increments is automatically selected by the software. The size of the meshes, according to the sensitivity analysis of the mesh, is equal to 4 cm. The time considered in the analysis is 50 milliseconds. The effect of strain rate on the behavior of steel and concrete is considered by applying the relevant coefficients in the behavior of materials.

After ensuring the accuracy of the finite element model simulation, the response of the beam connection to the trapped CFST column under various explosion loading scenarios has been investigated. The geometry of the beams and columns is taken from the design done in the research of reference [7]. The cross-section of the box column is 40 x 40 cm with a thickness of 10 mm and the cross-section of the beam is IPE330. The yield stress and the ultimate stress of the steel are 240 and 400 MPa. The compressive strength of concrete is 25 MPa. The welding material used between the beam and the column is also simulated differently from the base steel. The height of the floor is 3.2 meters and the length of the opening is 5 meters, which is simulated due to the symmetry of half of the opening.

In the research, it is assumed that the walls and roof of the structure were destroyed by the explosion in the initial moments, and the transfer of the explosion pressure to the beams and columns and the connection is done directly. According to the table provided in FEMA-453 [8], the weight of the explosive is estimated at 454 kg of TNT.

Three connection specimens are considered for conducting research, which are the connection of the beam to the column with full penetration welding, the connection with the reinforcement plate and the connection with the extension of the beam inside the column. The third connection was suggested in the literature as a connection with very good seismic load behavior [1].

All three connections were analyzed under five explosion scenarios at different distances from the structure. In the first

scenario, the explosive is placed on the ground and exactly on the beam axis. In subsequent scenarios, the distance outside the frame plane on the ground is increased by 0.5 m in each scenario to examine the impact of the blast center location.

3- Results and discussion

The difference in permanent deformation in the experiment and numerical analysis is equal to 10%. Given the observed agreement and the degree of difference, the accuracy of the modeling predictions in estimating the response of the CFST structure to the explosion can be assured.

In the first scenario, no torsion was observed in the beam because the explosion occurred exactly in the direction of the center of the beam. In other scenarios, with the explosive moving away from the center of the beam, in addition to the rotation that occurred in the beam, significant torsion has also occurred in the beam. Most of the concrete core of the column was severely damaged by the explosion. However, due to the surrounding steel wall and the confinement of the concrete core, the deformation of the concrete core is not significant.

4- Conclusion

According to the results, the use of haunch plates, as well as the extension of the beam inside the column, has caused the connection resistance to the blast load to increase significantly and the frame behavior is desirable under the blast weighing 454 kg (1000 lbs.) of TNT in a close distance that is a strong explosion. Comparing the maximum amount of rotation and torsion in the three connections under the most severe explosion scenario, it is observed that the third connection, especially in the case of more severe explosion, has a better performance and the amount of rotation is reduced by about 30% compared to the other two connections. In terms of the equivalent plastic strain index, the performance of the third connection was also more appropriate. The maximum amount of plastic strain in the first, second and third joints is 0.55, 0.249 and 0.217, respectively, which indicates that the beam in the first connection in the first scenario is damaged in the area of the bottom flange connection to the column.

It is also observed that by increasing the horizontal distance of the center of the explosive from the axis of the beam, the amount of force applied to the frame in the horizontal and vertical direction has decreased. The effect of the type of connection on the amount of force applied horizontally and vertically is not a regular trend.

References

- [1] S.P. Schneider, Y.M. Alostaz, Experimental Behavior of Connections to Concrete-filled Steel Tubes, *Journal of Constructional Steel Research*, 45(3) (1998) 321-352.
- [2] C. Kang, K. Shin, Y. Oh, T. Moon, Hysteresis behavior of CFT column to H-beam connections with external T-stiffeners and penetrated elements, *Engineering structures*, 23(9) (2001) 1191-1201.
- [3] C. Cheng, L. Chung, Seismic performance of steel beams to concrete-filled steel tubular column connections, *Journal of Construction Steel Research*, 59(3) (2003) 405-426.

- [4] J.M. Ricles, S.W. Peng, L. Lu, Seismic behavior of composite concrete filled steel tube column-wide flange beam-moment connections, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 130(2) (2004) 223-232.
- [5] G. Hao, Predictions of Structural Response to Dynamic Loads of Different Loading Rates, *International Journal of Protective Structures*, 6(4) (2015) 585-605.
- [6] M. Li, Z. Zong, H. Hao, X. Zhang, J. Lin, G. Xie, Experimental and numerical study on the behaviour of CFST columns subjected to close-in blast loading, *Engineering Structures*, 185 (2019) 203-220.
- [7] B. Li, Y.-L. Yang, Y.-F. Chen, W. Cheng, L.-B. Zhang, behavior of connections between square CFST columns and H-section steel beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 145 (2018) 10-27.
- [8] Risk Management series, Design guidance for shelters and safe rooms, FEMA-453, 2006.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Aliakbari, S. A. Hashemi, M. Ziaei, Y. Nasira, *Investigation of Vulnerability of Concrete Filled Steel Column Connections under Different Blast Scenarios*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(12) (2022) 1151-1154.

DOI: [10.22060/ceej.2021.18821.6971](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.18821.6971)





بررسی آسیب پذیری اتصالات ستون های فولادی پر شده با بتن در برابر سناریوهای مختلف انفجار

امیر علی اکبری^۱، سید امیرحسین هاشمی^۲، یحیی نصیرا^۳، مسعود ضیائی^{۳*}

۱-دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد زنجان، زنجان، ایران

۲-دانشکده مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

۳-دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۴

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۲۶

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۱۰

کلمات کلیدی:

اتصالات تیر به ستون فولادی پر شده با

بتن

انفجار

شبیه سازی اجزای محدود

تحلیل دینامیکی غیرخطی

آسیب پذیری

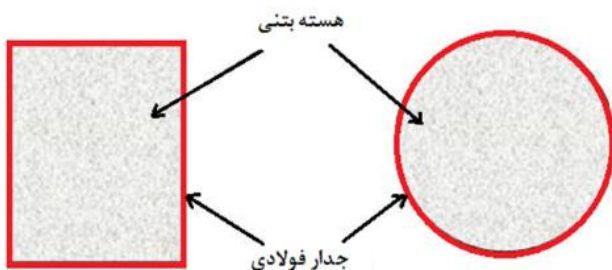
خلاصه: با توجه به افزایش بی سابقه تهدیدات خصمانه و تروریستی، در نظر گرفتن پدافند غیرعامل در سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از خصوصیات مطلوب فولاد و بتن در ترکیب با هم، باعث افزایش مقاومت اعضای سازه‌ای می‌شود. ستون‌های فولادی پر شده با بتن از سال‌های قبل به عنوان یک سیستم کارآمد پیشنهاد شد. مشکل اصلی استفاده از این نوع ستون، نحوه اتصال تیر به چنین ستونی بوده است که تحقیقات گسترده‌ای در خصوص عملکرد اتصالات این نوع ستون تحت بار لرزه‌ای انجام شده است. با این حال، تاکنون تحقیق جامعی در خصوص عملکرد اتصالات تیر به ستون فولادی پر شده با بتن تحت بار انفجار انجام نشده است. در این مقاله رفتار سه نوع اتصال گیردار تیر به ستون فولادی پر شده با بتن، تحت ۵ سناریوی بار انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام تحقیق از شبیه‌سازی اجزای محدود با استفاده از نرم افزار اباکوس استفاده شده است. برای اطمینان از دقت مدل‌ها، اعتبار سنجی با استفاده از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی انجام شد و انطباق مناسبی میان نتایج مشاهده شد. در ادامه رفتار اتصالات مذکور تحت بار انفجار با استفاده از ۱۵ مدل متفاوت و استفاده از تحلیل دینامیکی صریح غیرخطی انجام شد. نتایج در قالب کانتورهای تنش، کرنش و آسیب در بتن و نیز نمودارهای نیرو، جذب انرژی، تغییر مکان، دوران و پیچش استخراج و با هم مقایسه شد. مشاهده شد که حالت بهینه اتصال، اتصال سوم است که در آن اتصال با امتداد دادن تیر در داخل ستون انجام شده است. در این حالت تمام قسمت‌های ستون در محدوده اتصال در باربری و جذب انرژی مشارکت می‌کنند و رفتار بسیار مناسبی مشاهده شد. در این حالت مفصل پلاستیک در تیر از بر ستون فاصله گرفته است.

داشت که استفاده از ستون‌های فولادی پر شده با بتن، به دلیل محصور شدگی بتن و جلوگیری از کمناش موضعی جدار فولادی،

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با گسترش تهدیدات تروریستی و خصمانه در سراسر جهان، ملاحظات پدافند غیرعامل در ساخت و مقاوم‌سازی سازه‌های مسکونی، اداری تجاری، و بالاص سازه‌های نظامی مورد توجه زیادی قرار گرفته است تا از آسیب‌پذیری این سازه‌ها در برابر بار انفجار کاسته شود. بررسی رفتار سازه‌های مختلف تحت بارگذاری انفجار می‌تواند به تحقق این هدف و کاهش خسارات جانی و مالی کمک شایانی نماید.

سازه‌های مرکب فولاد-بتن از دهه‌های قبل به دلیل همکاری مناسب این دو ماده در تامین مقاومت کششی و فشاری مورد نیاز اعضای سازه‌ای مورد توجه بوده‌اند. یکی از انواع اعضای مرکب ستون‌های فولادی پر شده با بتن هستند (شکل ۱). می‌توان انتظار



شکل ۱. سطح مقطع ستون فولادی پر شده با بتن با سطح مقطع مستطیلی و دایروی

Fig. 1. Cross section of concrete filled steel tube column with rectangular and circle section

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: masoudziaei1@gmail.co





شکل ۲. استفاده از ستون‌ها فولادی پر شده با بتن در پایه پل‌ها (پل اومالی) [۱]

Fig. 2. The use of concrete filled steel tube columns in bridge piers (O'Malley Bridge)



شکل ۳. اتصالات تیر فولادی به ستون فولادی پر شده با بتن (دو و همکاران ۲۰۱۷) [۶]

Fig. 3. Connections between steel beam and concrete filled steel tube (Dou et al. 2017)

به دلیل رفتار مطلوب لرزه‌ای، در پایه پل‌ها و ساختمان‌های بلند مرتبه کاربرد فراوانی دارند و استفاده از آن‌ها در سازه‌های با اهمیت بالا مرسوم است (شکل ۲). اتصالات تیر فولادی به ستون جدار فولادی پر شده با بتن می‌تواند به صورت مفصلی یا گیردار باشد (شکل ۳). از آنجایی که رفتار اتصالات در سازه از اهمیت فراوانی برخوردار است و رفتار کلی سازه را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد، اتصالات تیرهای فولادی به چنین ستون‌هایی توسط محققین زیادی تحت بارگذاری زلزله

خسارات ناشی از بروز انفجار در مجاورت سازه را تا حدودی کاهش دهد.

در این ستون‌ها، جدار فولادی نقش میلگردهای طولی و خاموت‌ها را ایفا کرده و نیز محصور شدگی مطلوبی برای هسته بتنی فراهم می‌نماید. هسته بتنی نیز تغییر شکل خمشی و کمانش جدار فولادی را به تاخیر می‌اندازد. در نتیجه، این ستون‌ها دارای سختی، مقاومت و شکل‌پذیری بالا هستند که همگی این عوامل برای کاهش آسیب‌پذیری سازه تحت بار انفجار بسیار مطلوب است. این ستون‌ها

را تنها به جدار فولادی ستون منتقل می‌کنند. در اتصالات دسته دوم، اعوجاج شدید در جدار فولادی ستون در ناحیه اتصال مشاهده شد و این اعوجاج، مانع از شکل‌گیری کامل مفصل پلاستیک خمشی در تیر گردید. رفتار مناسب‌تر اتصالات دسته اول به نوع اجزای اتصالی که در داخل هسته بتنی نفوذ می‌کنند، بستگی دارد. اتصالاتی که در آن‌ها تیر در داخل ستون مرکب امتداد پیدا می‌کند بهترین رفتار را به عنوان اتصال گیردار داشته‌اند [۸].

الاستاد و اشنایدر در سال ۱۹۹۸ رفتار اتصالات تیر به ستون‌های فولادی پر شده با بتن را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. شش نمونه آزمایشگاهی از اتصال با مقیاس بزرگ تا هنگام بروز خرابی تحت بارگذاری شبه استاتیکی آزمایش شد. جوش نمونه‌های ساخته شده در کارخانه انجام شد و در محل آزمایشگاه اتصالات پیچی انجام شد. نتایج آزمایشات نشان داد که جوش دادن مستقیم تیر به جدار فولادی ستون باعث ایجاد نیاز تغییر شکل بالا در تیوب فولادی خواهد شد. اعوجاجات گسترده در جدار فولادی، احتمال بروز شکست در بال تیر، جوش بال و جداره فولادی را افزایش می‌دهد. رفتار چرخه‌ای غیرارتجاعی وقتی دیافراگم خارجی برای توزیع نیروهای بال تیر در اطراف ستون مورد استفاده قرار گرفته، بهبود یافته است. در این حالت اتصال توانسته امکان استفاده از مقاومت خمشی تیر کامل تیر را فراهم نماید. با استفاده از اعضای مدفون در بتن ستون برای توزیع نیروی بال تیر به هسته بتنی، تمرکز تنش در جدار تیوب به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. رفتار اتصال به نوع این المان مدفون حساسیت زیادی داشته است. میله‌های تغییر شکل یافته جوش شده به بال تیر و مدفون شده در داخل هسته بتنی مقاومت اتصال را تا ۱/۵ برابر مقاومت خمشی پلاستیک تیر افزایش داده است و تا زمان بروز خرابی، چرخه‌های هیستریزس پایداری را فراهم نموده است. همچنین مشاهده شد که امتداد دادن تیر در داخل هسته بتنی ستون می‌تواند استفاده از مقاومت خمشی پلاستیک کامل تیر را فراهم نماید و رفتار چرخه‌ای غیرارتجاعی مناسبی را سبب شود [۹].

وو^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۵ رفتار اتصالات پیچی تیر به ستون فولادی پر شده با بتن را به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. مشاهده شد که این نوع اتصالات پیچی می‌تواند تا دریافت ۷۷٪ طبقه پایداری قاب را تامین نمایند [۱۰].

مورد بررسی قرار گرفته است [۵-۲]. با این حال، رفتار اتصالات این نوع ستون تحت بارگذاری انفجار کمتر مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است. با توجه به این مسئله و نیز با توجه به اهمیت ویژه اتصالات در رفتار کلی سازه، در این تحقیق رفتار اتصالات تیر فولادی به ستون فولادی پر شده با بتن با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته تا آسیب‌پذیری و پاسخ اتصالات متداول در برابر بار انفجار تعیین و مقایسه شود.

با توجه به اینکه در بارگذاری انفجار و در فاز ارتعاش اجباری پاسخ سازه به صورت موضعی و در ناحیه نزدیک به انفجار است [۷]، آسیب‌پذیری با استفاده از کنترل میزان کرنش پلاستیک معادل در فولاد و آسیب‌کششی و فشاری در بتن مورد قضاوت قرار می‌گیرد. در فاز ارتعاش آزاد که پاسخ سازه به صورت پاسخ تغییر مکان است [۷]، آسیب‌پذیری سازه با توجه به میزان دوران تیر و تغییر مکان انتهای آن و نیز تغییر شکل اعضای اتصال مورد قضاوت قرار می‌گیرد.

۲- مرور ادبیات موضوع

تحقیقات در زمینه رفتار لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون فولادی پر شده با بتن در اوایل دهه ۹۰ میلادی آغاز شد. الاستاد^۱ و اشنایدر^۲ در سال ۱۹۹۶ رفتار لرزه‌ای این اتصالات را با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه بعدی با استفاده از نرم افزار اباکوس مورد بررسی قرار دادند. از آنجایی که اتصالات تیر به ستون استوانه‌ای مشکلات بیشتری نسبت به اتصال به ستون مستطیلی شکل دارد، ستون استوانه‌ای شکل برای انجام تحقیق در نظر گرفته شد. شش نوع متفاوت اتصال مورد بررسی قرار گرفت. المان‌های پوسته‌ای سه بعدی برای شبیه‌سازی جدار فولادی و المان‌های سه بعدی ۲۰ گرهی برای شبیه‌سازی هسته بتنی مورد استفاده قرار گرفت. غیرخطی شدن ماده و غیرخطی شدن هندسی در انجام تحقیق لحاظ گردید. برای اطمینان از نتایج مدل‌سازی عددی، اعتبارسنجی مدل با استفاده از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی انجام شد. متغیرهای در نظر گرفته شده شامل نسبت قطر به ضخامت تیوب فولادی، بار محوری ستون و نسبت لنگر به برش تیر بوده است. نتایج این تحقیق نشان داد که اتصالاتی که بار را از تیر به هسته بتنی منتقل می‌کنند عملکرد لرزه‌ای مناسب‌تر و مقاومت و سختی بالاتری نسبت به اتصالاتی دارند که بار

1 Alostaz

2 Schneider

لیو^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۷ رفتار اتصالات تیر فولادی به ستون فولادی پر شده با بتن را تحت بارگذاری چرخه‌ای به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. مشاهده شد که در نمونه با دیافراگم خارجی، مود خرابی اتصال خرابی برشی پانل زون اتصال است. استفاده از دیافراگم‌های خارجی باعث تشکیل مفصل پلاستیک در تیر فولادی شده و به طور موثری نیروهای داخلی تیر فولادی را به ناحیه پانلی منتقل می‌کند [۱۵].

خو و همکاران در سال ۲۰۱۸ رفتار اتصالات پیچی ستون‌های CFST با پیکربندی‌های متفاوت را در سناریوی حذف ستون مورد بررسی قرار دادند. اتصالات شامل اتصال صفحه انتهایی، صفحه انتهایی توسعه یافته و نبشی سخت شده بود. تحقیق بر مودهای خرابی، تشکیل و توسعه عمل زنجیره‌ای و ظرفیت تغییر شکل متمرکز شده بود. نتایج نشان داد که ضخامت صفحه و قطر پیچ‌ها نقش مهمی در عملکرد اتصال دارند. اتصال صفحه انتهایی رفتار زنجیره‌ای مناسب‌تری نسبت به اتصال صفحه انتهایی توسعه یافته داشته است [۱۶].

لی^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۹ رفتار ستون‌های CFST تحت بارگذاری انفجار را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. سه نمونه ستون CFST با مقیاس کامل تحت سناریوهای مختلف انفجار قرار داده شد. مدل‌های عددی ساخته شده با استفاده از نرم افزار LS-DYNA [۱۸] با استفاده از نتایج مدل‌های آزمایشگاهی صحت سنجی شد. در گام بعد رفتار دینامیکی، جذب انرژی و مکانیزم‌های آسیب این نوع ستون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در صورتی که ماده منفجره به ستون نزدیک باشد، خرابی رخ داده در ستون در قالب اعوجاج‌های محلی در نزدیکی مرکز ماده منفجره در جدار فولادی رخ می‌دهد. هسته بتنی به شدت دچار آسیب دیدگی شده در حالی که جداره فولادی به جز در ناحیه نزدیک به ماده منفجره آسیب چندانی ندیده است [۱۷].

۳- انفجار و معادلات حاکم

وقوع انفجار باعث تولید موج شوک می‌گردد که فشار این جبهه با دور شدن از محل انفجار به تدریج کاسته می‌شود. در شکل ۴ موج شوک انفجار قابل مشاهده است. شکل عمومی تاریخچه فشار- زمان مربوط به موج شوک یک انفجار هوایی در هوای آزاد در شکل ۵

فوجیکارا^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۷ رفتار ستون فولادی پر شده با بتن در پایه‌های پل تحت بارگذاری انفجار را مورد بررسی قرار دادند. در آزمایشات انجام شده ملاحظه گردید نمونه‌های با مقیاس ۱/۴ تحت بارگذاری انفجار رفتار شکل‌پذیری دارند. همچنین مشاهده شد که اتصال ستون به پی در رفتار ستون تحت بارگذاری انفجار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۱].

صدرنژاد و ضیایی در سال ۱۳۹۲ عملکرد اتصالات پیچی تیر به ستون تحت بارگذاری انفجار را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که انفجار باعث بروز پیچش در تیر می‌گردد. در اتصال گیردار، ناحیه بحرانی شامل بخش پایینی ورق انتهایی در مجاورت پایین‌ترین ردیف پیچ‌ها و نیز محل اتصال بال پایینی تیر به ورق انتهایی است. مشاهده شد که اتصال با تعداد پیچ بیشتر عملکرد مناسب‌تری در برابر انفجار دارد [۱۲].

ژانگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۵ رفتار ستون‌های مربعی فولادی دو لایه پر شده با بتن را تحت بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار دادند. برای انجام مطالعه از روش عددی استفاده شد. متغیرهای مورد بررسی شدت انفجار، ضخامت جدار فولادی و میزان بار محوری ستون بوده است. متغیر مورد بررسی تاریخچه تغییر مکان در وسط ارتفاع ستون‌ها بوده است. مشاهده شد که ضخامت بخش فولادی تاثیر قابل توجهی بر رفتار ستون دارد. همچنین مشاهده شد که اثر بار محوری بر رفتار ستون جدار فولادی پر شده با بتن چندان قابل توجه نیست [۱۳].

خو^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۶ رفتار اتصالات تی شکل تیر به ستون جدار فولادی پر شده با بتن را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نمونه‌ها تحت سه نوع بارگذاری شامل کشش محوری، کشش با خروج از مرکزیت و خمشی داخل صفحه مورد بررسی قرار گرفتند. نسبت قطر به ضخامت جدار فولادی در نمونه‌ها بین ۴۸ تا ۷۵ در تغییر بوده است. مشاهده شد که گسیختگی برشی پانچ در جدار فولادی مود اصلی گسیختگی نمونه‌ها بوده است. مطابق نتایج توصیه شد که مشارکت بتن در طراحی در نظر گرفته شود، زیرا می‌تواند به طور موثری تغییر مکان جداره فولادی را مقید نماید [۱۴].

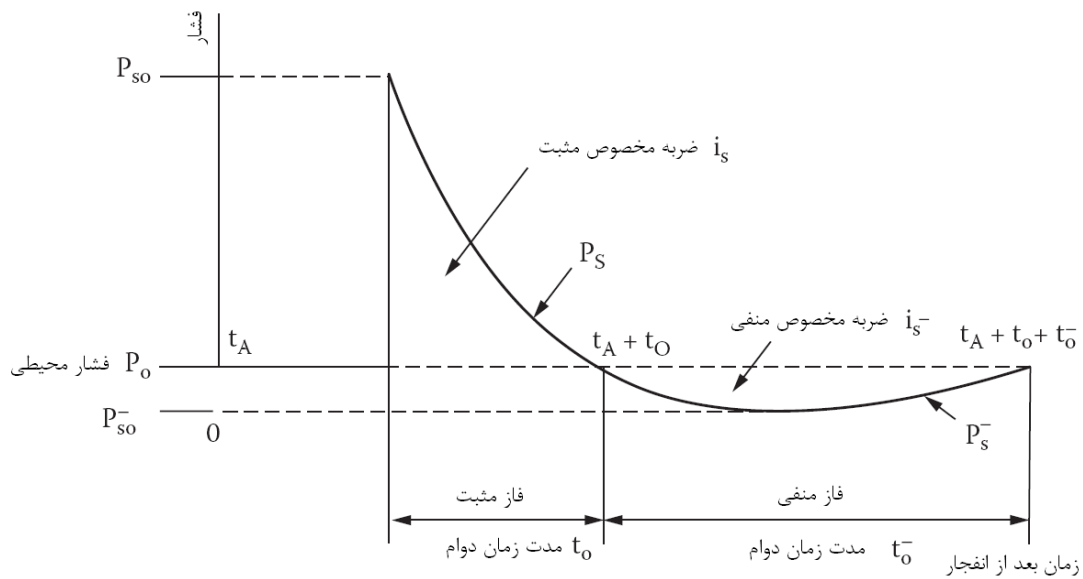
- 1 Fujikara
- 2 Zhang
- 3 Xu

4 Liu
5 Li



شکل ۴. موج شوک انفجار [۱۹]

Fig. 4. Blast shock wave [19]



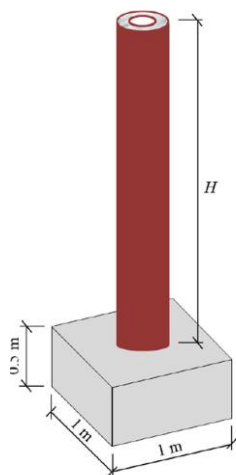
شکل ۵. تغییرات فشار- زمان در محیط باز [۲۰]

Fig. 5. Pressure-time variation in free air [20]

هدف و وقوع فشار حداکثر، t_p ، بسیار کوتاه است، می‌توان فرض کرد که رسیدن به مقدار فشار حداکثر به صورت آنی بعد از رسیدن جبهه شوک اتفاق می‌افتد. فشار حداکثر P_{so} در مدت زمان t_o افت نموده و برابر با فشار اولیه محیط می‌شود که این فاصله به عنوان فاز مثبت ضربه فشار تعریف می‌گردد. بعد از این مرحله، فاز منفی اتفاق می‌افتد که به مدت ادامه خواهد داشت و در این فاصله میزان فشار از میزان فشار اولیه محیط کمتر خواهد بود و مسیر باد (حرکت ذرات) معکوس خواهد شد. فاز منفی در طراحی اهمیت چندانی ندارد و معمولاً از آن صرف نظر می‌شود. مقدار ضربه‌ای که در اثر موج انفجار به هدف وارد

نشان داده شده است. جبهه موج به دلیل افزایش ناگهانی فشار ناشی از وقوع انفجار لزوماً عمودی است. فشار حداکثر ناشی از انفجار در انتهای این فاز اولیه قرار دارد. فشار ناشی از وقوع انفجار فشاری است که بر سطح موازی با جهت انتشار وارد می‌شود. سرعت انتشار با زمان و فاصله کاهش می‌یابد، ولی معمولاً از مقدار سرعت صوت در محیط بیشتر است.

جبهه شوک در زمان t_A به هدف می‌رسد. بعد از گذشت t_p ثانیه از زمان رسیدن به هدف یعنی t_A ، فشار به میزان حداکثر خود یعنی P_{so} خواهد رسید. از آنجایی که فاصله زمانی مابین رسیدن جبهه شوک به



شکل ۶. ابعاد نمونه آزمایشگاهی ستون تحت بار انفجار [۱۷]

Fig. 6. Size of the column specimen under blast [17]

جدول ۱. مشخصات فولاد گزارش شده در آزمایش برحسب MPa برای تنش [۱۷]

Table 1. The reported steel material properties in MPa [17]

عضو	تنش تسلیم	تنش نهایی	کرنش نهایی
جدار بیرونی ستون	۴۰۳	۴۷۳	۰/۲۴
جدار داخلی ستون	۴۲۰	۵۶۵	۰/۲۵

دوام فاز مثبت و A ضریب کاهش و T_a زمان رسیدن موج است. همچنین اثر زاویه برخورد نیز در این روش در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق از این رابطه که در نرم افزار اجزای محدود اباکوس [۲۲] تحت عنوان CON-WEP یاد شده برای شبیه‌سازی بار انفجار استفاده خواهد شد.

۴- شبیه‌سازی اجزای محدود

در این بخش با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود پاسخ سه نوع اتصال تحت ۵ سناریوی انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا اعتبارسنجی مدل‌سازی با استفاده از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی انجام شده است.

۴-۱- اعتبارسنجی مدل اجزای محدود

برای انجام شبیه‌سازی، در ابتدا لازم است تا با استفاده از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی و مدل‌سازی آن، دقت پیش‌بینی مدل‌های اجزای

می‌گردد برابر مساحت زیر منحنی فاز مثبت منحنی فشار- زمان است و با \dot{t}_s نمایش داده می‌شود.

کینگری و بولماش [۲۱] بر پایه آزمایشات انجام شده معادلاتی را برای پیش‌بینی پارامترهای انفجار در هوا ناشی از خرج کروی و نیم کروی ارائه دادند. محدوده آزمایشات مورد استفاده از ۱ کیلوگرم تا ۴۰۰ تن تی تی ان تی بوده است. این معادلات به طور گسترده مورد توجه واقع شد. در این روش از ساده‌سازی به صورت مثلث استفاده نمی‌شود و فشار انفجار به صورت نمایی مطابق رابطه (۱) کاهش می‌یابد.

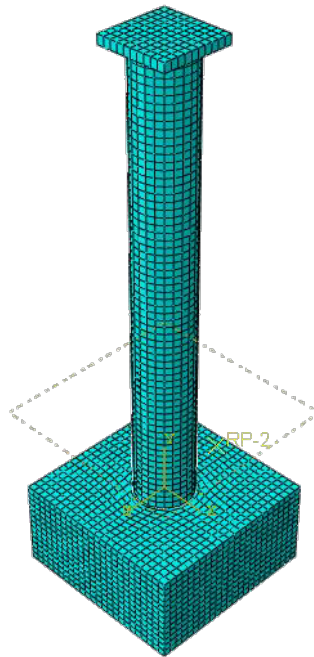
$$P(t) = P_{s0} \left[1 - \frac{t-T_a}{T_0} \right] e^{\left[\frac{-A(t-T_a)}{T_0} \right]} \quad (1)$$

در این رابطه $P(t)$ فشار در زمان t ، P_{s0} فشار برخورد حداکثر، T_0 مدت

جدول ۱. مشخصات فولاد گزارش شده در آزمایش برحسب MPa برای تنش [۱۷]

Table 1. The reported steel material properties in MPa [17]

پارامتر ویسکوزیته	k	fb0/fc0	خروج از مرکزیت	زاویه اتساع	مقاومت کششی	مقاومت فشاری
۰/۰۱	۰/۶۶۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۸	۳/۱۵ Mpa	۳۳ Mpa



شکل ۷. مدل اجزای محدود نمونه آزمایشگاهی ستون CFST

Fig. 7. Finite element model of CFST column

نهایی مورد استفاده برای فولاد ارائه شده است. رفتار بتن با استفاده از مدل پلاستیسیته آسیب دیده بتن تعریف شد. این مدل برای بارگذاری‌های مختلف کاربرد داشته و با بیان رفتار مجزای بتن در فشار و کشش رفتار بتن را به صورت واقعی شبیه‌سازی می‌کند. در این مدل حالت‌های آسیب توسط یک متغیر عددی به نام آسیب (D) تعریف می‌شود.

این مدل از مفهوم آسیب دیدگی همسانگرد در محدوده خطی و با ترکیب کشش ایزوتروپیک و فشار پلاستیک جهت نمایش رفتار غیرخطی بتن استفاده می‌کند. از این مدل رفتاری می‌توان در شرایط بارگذاری متفاوت مانند بارگذاری چرخه‌ای استفاده کرد و کاهش سختی الاستیک با در نظر گرفتن کرنش پلاستیک هم در کشش و هم در فشار در نظر گرفته می‌شود. در این مدل دو مکانیسم گسیختگی

محدود بررسی شود. برای انجام این کار، آزمایش انجام شده توسط لی^۱ و همکاران [۱۷] انتخاب شده است. در این آزمایش، بررسی عددی و آزمایشگاهی در خصوص رفتار ستون‌های جدار فولادی پر شده با بتن (CFST)^۲ تحت تاثیر انفجار انجام شده است. ابعاد نمونه آزمایشگاهی در شکل ۶ قابل مشاهده است.

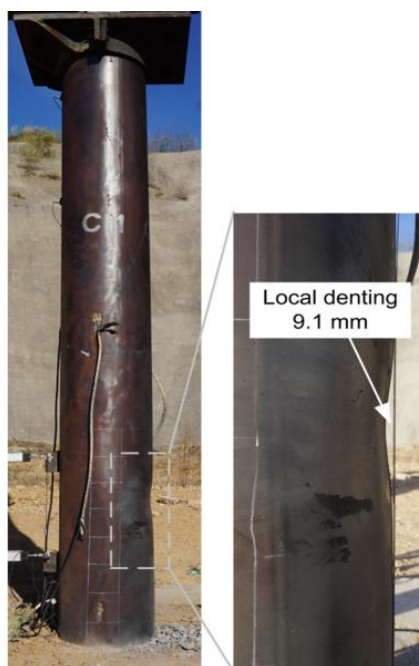
مدل اجزای محدود با استفاده از نرم افزار اباکوس و مطابق مقادیر گزارش شده در آزمایش ساخته شد. برای شبیه‌سازی نمونه از المان‌های سه بعدی هشت گرهی C3D8R استفاده گردید. رفتار فولاد با مدل دو خطی با تعریف تنش تسلیم و تنش نهایی تعریف گردید. در جدول ۱ مشخصات تنش تسلیم، تنش نهایی و کرنش

- 1 Li
- 2 Concrete Filled Steel Tube

جدول ۳. نتایج تحلیل حساسیت مش

Table 3. Mesh sensitivity analysis results

اندازه مش (mm)	حداکثر تغییر مکان (mm)	تغییر مکان ماندگار (mm)
۱۰	۸	۴
۸	۱۱	۵.۸
۶	۱۲.۳	۷.۳
۵	۱۴	۹.۸
۴	۱۳.۶	۱۰



شکل ۸. تغییر شکل مشاهده شده در نمونه آزمایشگاهی [۱۷]

Fig. 8. Deformation observed in experimental specimen [17]

جدار فولادی، اندرکنش بین بتن و فولاد به صورت مقید تعریف شد. مدل اجزای محدود نمونه آزمایشگاهی در شکل ۷ قابل مشاهده است. برای شبیه‌سازی بار انفجار از روش CONWEP استفاده شده است. در این روش مرکز ماده منفجره و وزن آن و نیز سطح تحت تاثیر بار انفجار در مدل تعیین می‌گردد. نمونه انتخاب شده برای اعتبارسنجی نمونه C1 است که در آن وزن ماده منفجره ۵ کیلوگرم، ارتفاع ماده منفجره ۵۰ سانتی‌متر و فاصله آن از محیط ستون ۲۰ سانتی‌متر است. تحلیل از نوع دینامیکی صریح غیرخطی است. اندازه نمونه‌های حل به صورت خودکار توسط نرم افزار انتخاب

برای بتن فرض می‌شود که عبارتند از ترک خوردگی کششی و خرد شدگی فشاری.

تغییر سطح تسلیم به وسیله دو پارامتر سخت شوندگی فشاری و کششی کنترل می‌شود. به این دو پارامتر اصطلاحاً کرنش‌های پلاستیک معادل فشاری و کششی گفته می‌شود. پاسخ بتن توسط پارامترهای آسیب مشخص خواهد شد. مقاومت فشاری بتن گزارش شده در آزمایش ۳۳ مگاپاسکال است. مشخصات بتن در جدول ۲ قابل مشاهده است.

با توجه به فرض وجود گل میخ‌ها برای اتصال بین هسته بتنی و

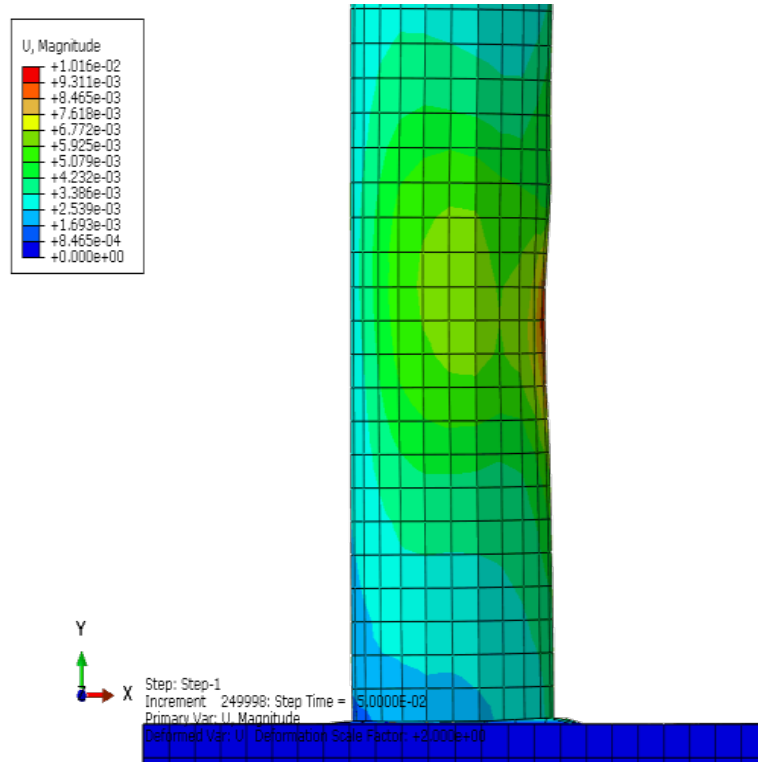


Fig. 9. Deformation observed in finite element model

شکل ۹. تغییر شکل مشاهده شده در مدل اجزای محدود

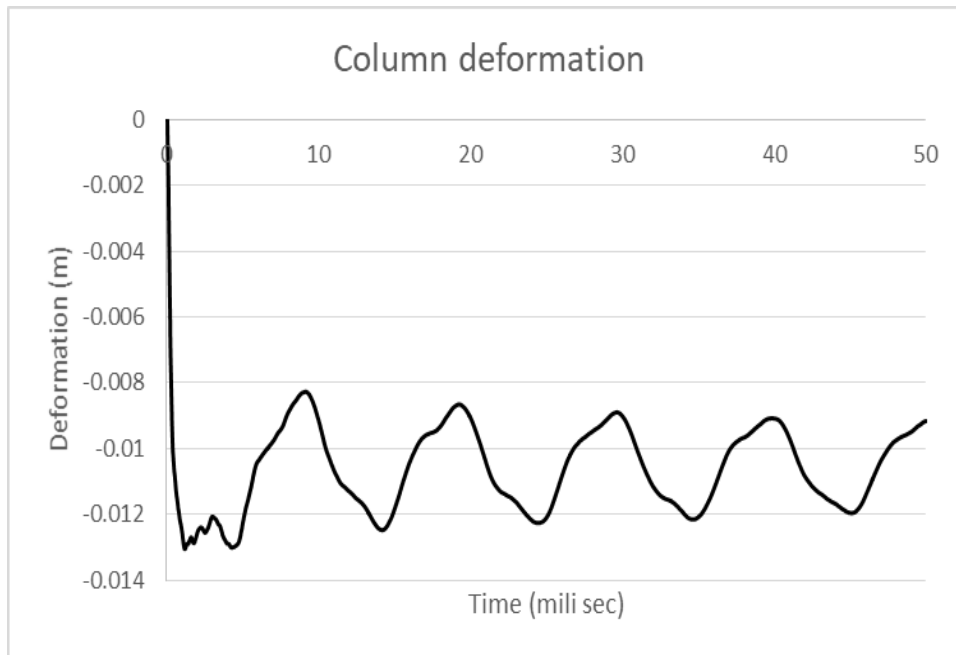
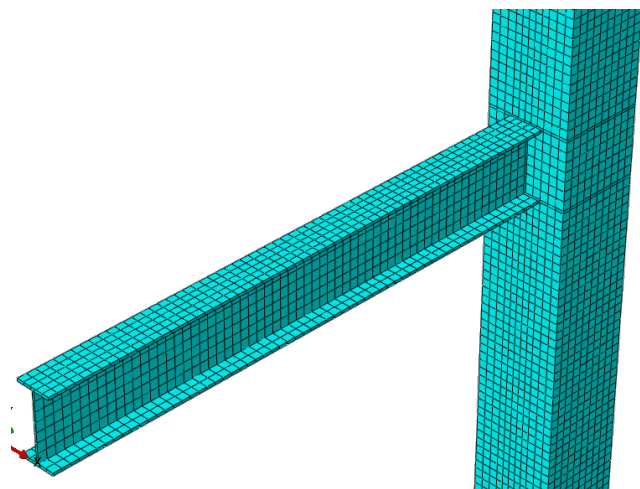


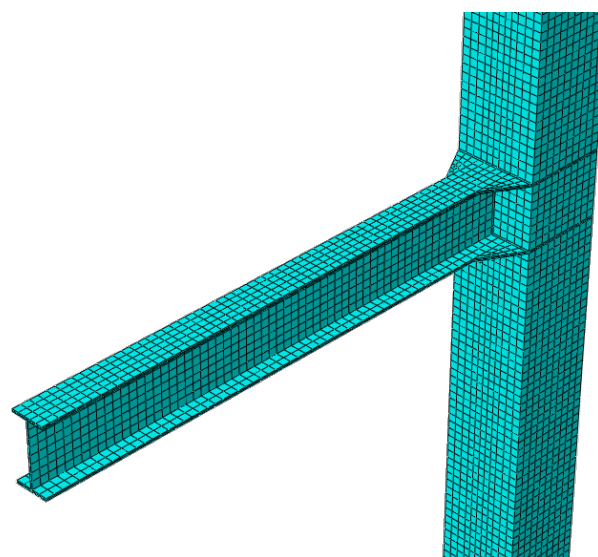
Fig. 10. Displacement history at the elevation of 50 cm from the column base

شکل ۱۰. تاریخچه تغییر شکل در ارتفاع ۵۰ سانتی متری از کف ستون



شکل ۱۱. اتصال کامل تیر به ستون به جوش نفوذی

Fig. 11. Full connection of beam to column using penetration weld



شکل ۱۲. اتصال تیر به ستون با ورق تقویتی

Fig. 12. Beam-column connection using stiffener plate

شامل حداکثر تغییر شکل ماندگار در ستون و نحوه تغییر شکل مورد مقایسه با نتایج مدل‌سازی قرار گرفته است که انطباق مناسبی در هر دو مورد مشاهده شده است. دلایل اختلاف می‌تواند صرف نظر از انعکاس‌های رخ داده از زمین، شکل ماده منفجره، تفاوت‌های مواد فولاد و بتن با مقادیر ذکر شده و نیز ساده‌سازی‌های انجام شده در شبیه‌سازی باشد.

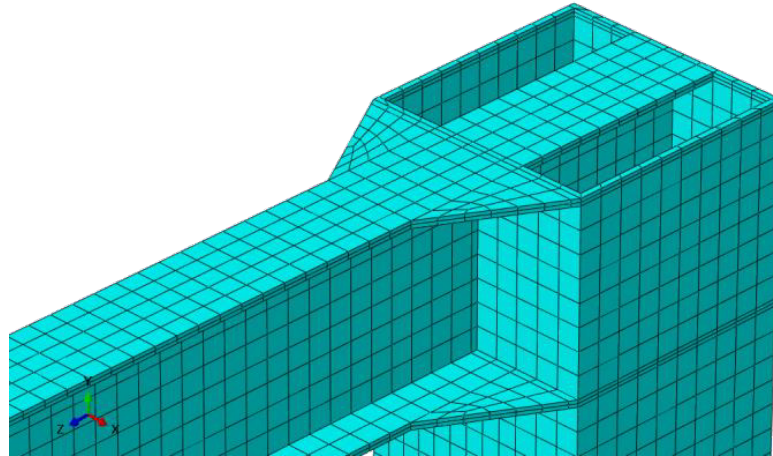
۴-۲- بررسی رفتار اتصال ستون CFST تحت سناریوهای متفاوت انفجاری

پس از اطمینان از دقت شبیه‌سازی مدل اجزای محدود به بررسی پاسخ اتصال تیر به ستون CFST گیردار تحت سناریوهای گوناگون بارگذاری انفجار پرداخته شده است. هندسه تیر و ستون از طراحی انجام شده در تحقیق لی و همکاران [۲۲] اخذ شده است. مقطع ستون باکس ۴۰ در ۴۰ سانتی‌متر با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و مقطع تیر IPE330 است. تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد برابر ۲۴۰ و ۴۰۰ مگاپاسکال است. مقاومت فشاری بتن برابر ۲۵ مگاپاسکال است. ماده جوش استفاده شده بین تیر و ستون نیز متفاوت از جنس فولاد مادر شبیه‌سازی شده است. اثر نرخ کرنش بر رفتار مصالح با در نظر گرفتن ضریب افزایش دینامیکی لحاظ شده است. ارتفاع طبقه برابر ۳/۲ متر

می‌شود. اندازه‌ها مطابق تحلیل حساسیت مش انجام شده برابر ۴ سانتی‌متر است. نتایج تحلیل حساسیت مش در جدول ۲ ارائه شده است. زمان تحلیل برابر ۵۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. اثر نرخ کرنش بر رفتار فولاد و بتن با در نظر گرفتن ضرایب مربوطه در رفتار مواد لحاظ شده است.

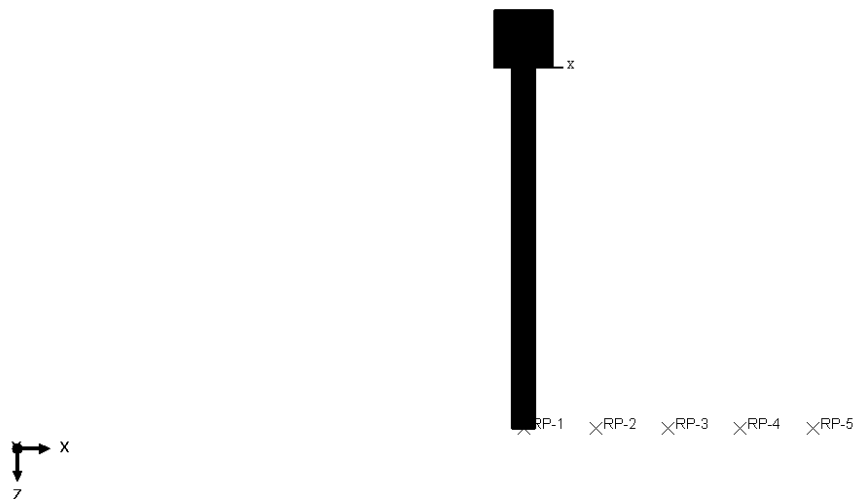
نتایج حاصل از آزمایش در شکل ۸ قابل مشاهده است. بیشترین تغییر مکان مشاهده شده در بدنه ستون ۹/۱ میلی‌متر است که در ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری از کف ستون مشاهده شده است. کانتور تغییر مکان حاصل از تحلیل مدل در شکل ۹ و تاریخچه تغییر مکان در ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری از پای ستون در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. تغییر مکان ماندگار در ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری از کف ستون برابر ۱۰ میلی‌متر است. تغییر شکل ستون آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود با هم منطبق است. میزان اختلاف تغییر شکل ماندگار در آزمایش و تحلیل عددی برابر ۱۰٪ است. با توجه به انطباق مشاهده شده و میزان اختلاف، می‌توان از دقت پیش‌بینی‌های مدل‌سازی در برآورد پاسخ سازه CFST به انفجار اطمینان داشت.

در تحقیق آزمایشگاهی مورد استفاده تنها مقدار تغییر شکل حداکثر در ستون و محل و شکل وقوع آن گزارش شده که این عوامل



شکل ۱۳. اتصال با امتداد تیر در داخل ستون (بخش بالایی ستون برای نشان دادن محتویات داخلی نشان داده نشده است)

Fig. 13. Connection by continuing the beam in the column (top section of the column is not shown to make the of internal parts visible)



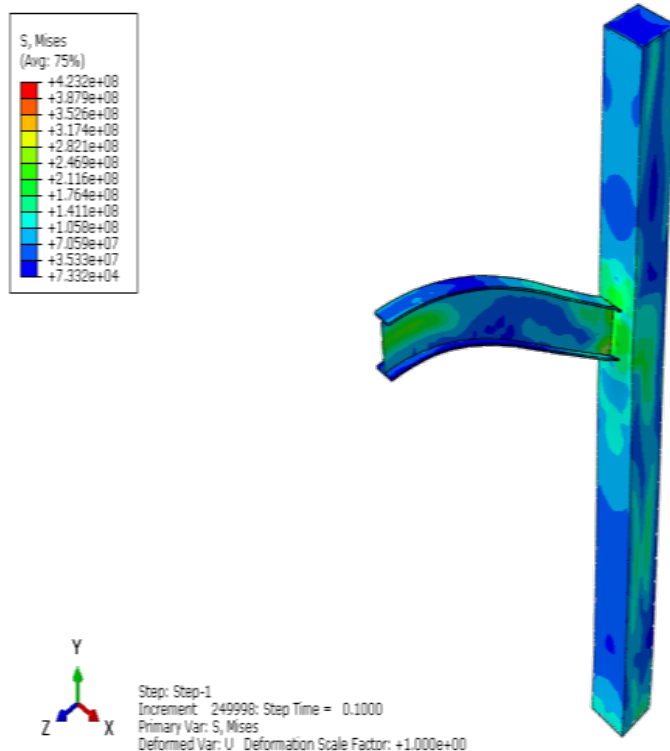
شکل ۱۴. مرکز مواد منفجره در سناریوهای انفجار (نمای از بالای سازه)

Fig. 14. Explosive charge center in blast scenarios (top view of the structure)

جدول ۴. مشخصات ماده جوش [۲۴]

Table 4. Weld material properties [24]

فولاد	تنش تسلیم	تنش نهایی	کرنش نهایی
A36 weld	۳۶۰	۵۱۵	۰/۰۹



شکل ۱۵. تغییر شکل قاب ۱۰۰ میلی ثانیه بعد از بروز انفجار در سناریوی اول انفجار

Fig. 15. Frame deformation 100 milliseconds after the blast in the first blast scenario

سازه تحلیل شده است. در سناریوی اول، ماده منفجره بر روی زمین و دقیقاً در راستای وسط تیر در زیر آن در نظر گرفته شده است. در سناریوهای بعدی، فاصله در راستای خارج از صفحه قاب بر روی زمین ۰/۵ متر در هر سناریو افزایش داده شده تا تاثیر محل بروز انفجار نیز مورد بررسی قرار گیرد (شکل ۱۴).

پای ستون به صورت گیردار و با مقید کردن تمامی درجات آزادی انتقالی تعریف شده است. با توجه به وجود تقارن در سازه با توجه به فرض وقوع انفجار در راستای وسط تیر، نیمی از تیر شبیه‌سازی شده و در انتهای نیمه مدل شده، شرایط تکیه‌گاهی به صورت تقارن و با مقید کردن انتقال در جهت محوری تیر و دوران در راستای عمود بر محور تیر تعریف شده است. در ستون طبقه بالا که با فرض وقوع نقطه عطف خمشی در وسط ارتفاع ستون، نیمی از آن مدل شده، شرایط تکیه‌گاهی به صورت مفصلی تعریف شده است.

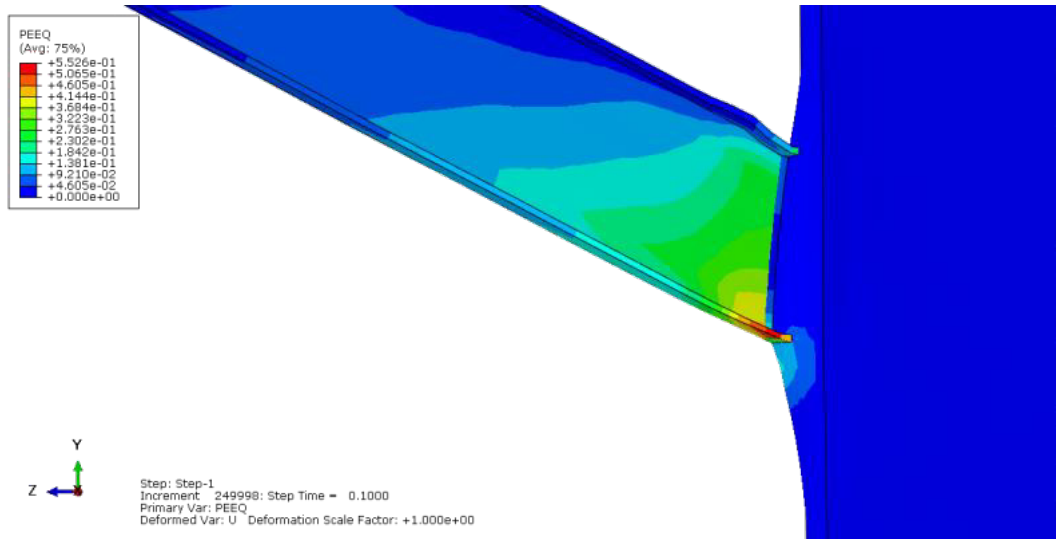
مشخصات ماده جوش که در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است

و طول دهانه ۵ متر است که به دلیل وجود تقارن نیمی از دهانه شبیه‌سازی شده است.

در انجام تحقیق فرض شده است که دیوار و سقف سازه در اثر انفجار در لحظات اولیه تخریب شده‌اند و انتقال فشار انفجار به تیر و ستون و اتصال به صورت مستقیم انجام می‌شود. مطابق جدول ارائه شده در FEMA-453 [۲۳] وزن ماده منفجره برابر ۴۵۴ کیلوگرم تی ان تی در نظر گرفته شده است.

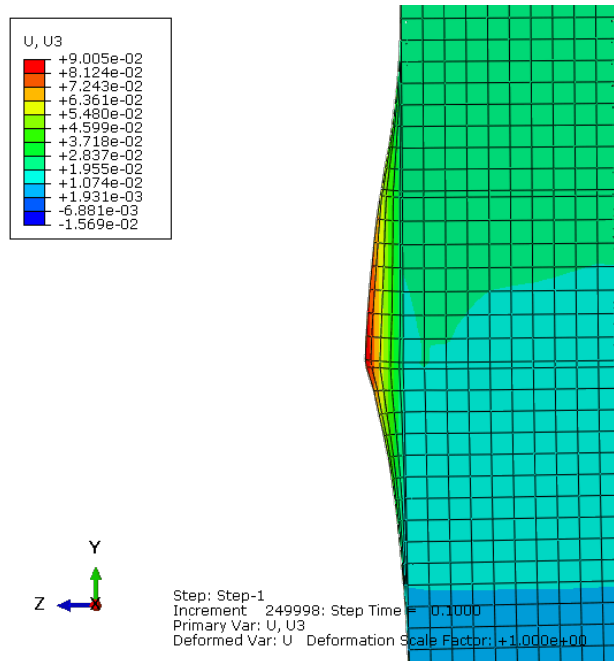
سه نمونه اتصال برای انجام تحقیق در نظر گرفته شده است که عبارتند از اتصال تیر به ستون با جوش نفوذی کامل، اتصال با ورق تقویتی و اتصال با امتداد تیر در داخل ستون. اتصال سوم در مرور ادبیات موضوع به عنوان اتصالی با رفتار بسیار مناسب در برابر بار لرزه‌ای پیشنهاد شده بود [۲]. مدل اجزای محدود سه اتصال در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ قابل مشاهده است.

هر سه اتصال تحت پنج سناریوی انفجار با فواصل متفاوت از



شکل ۱۶. کرنش پلاستیک معادل در محل اتصال تیر به ستون

Fig. 16. Equivalent plastic strain in beam-column connection

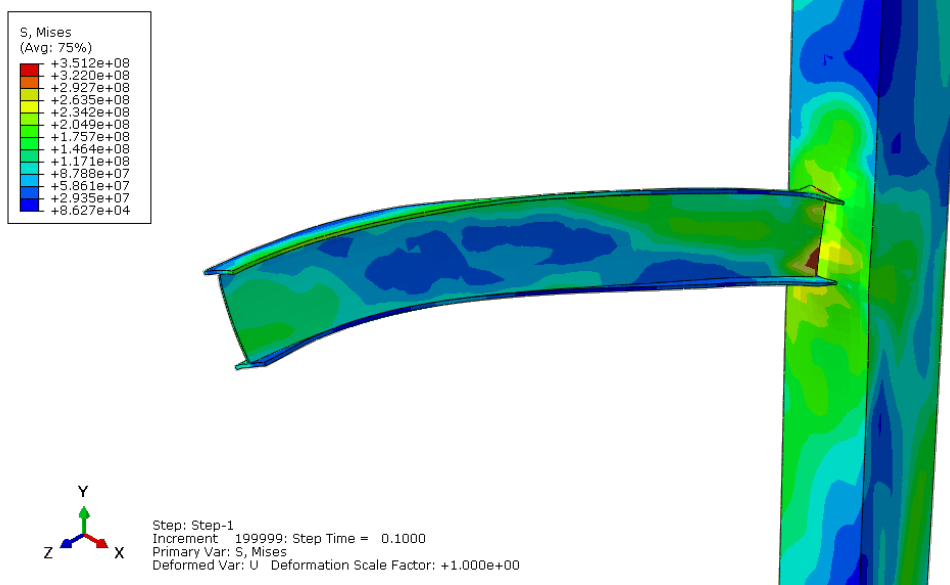


شکل ۱۷. تغییر شکل جدار فلزی ستون در محل اتصال به تیر ۱۰۰ میلی ثانیه بعد از بروز انفجار در سناریوی اول انفجار

Fig. 17. Deformation of steel tube of column in connection to beam 100 milliseconds after the blast occurrence in the first blast scenario

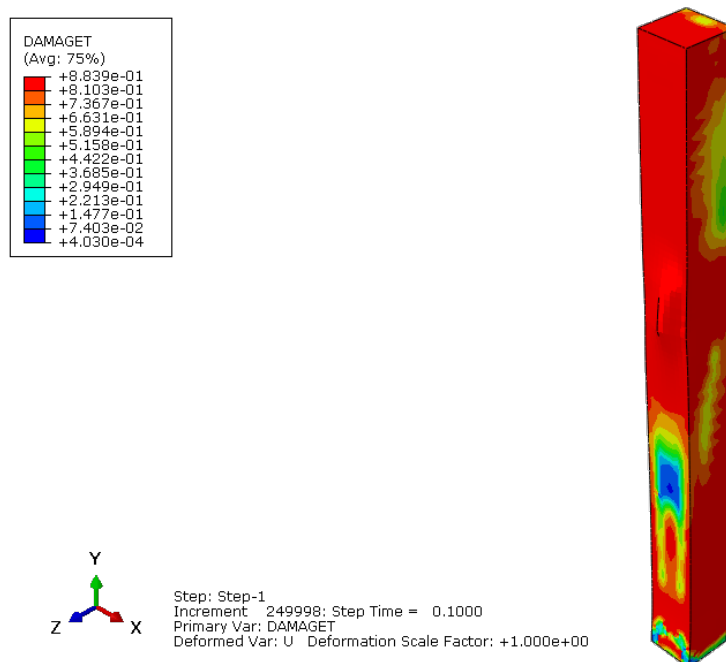
گرفته شده است. در خصوص فولاد، کنترل خرابی با استفاده از مقدار کرنش پلاستیک معادل انجام شده است. خرابی عمومی اعضا با استفاده از شکل نمودار تغییر مکان زمان انجام

در جدول ۳ ارائه شده است. برای بررسی خرابی محلی لازم است خرابی مصالح در نقاط متفاوت سازه کنترل شود. خرابی بتن با در نظر گرفتن مدل رفتار پلاستیسیته آسیب دیده با توجه به مقدار کرنش غیرارتجاعی در نظر



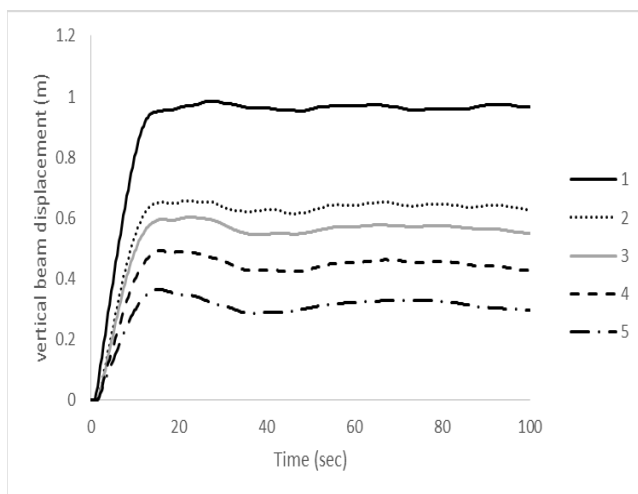
شکل ۱۸. بروز پیچش در تیر در سناریوی دوم انفجار

Fig. 18. Torsion occurrence in beam in the second blast scenario



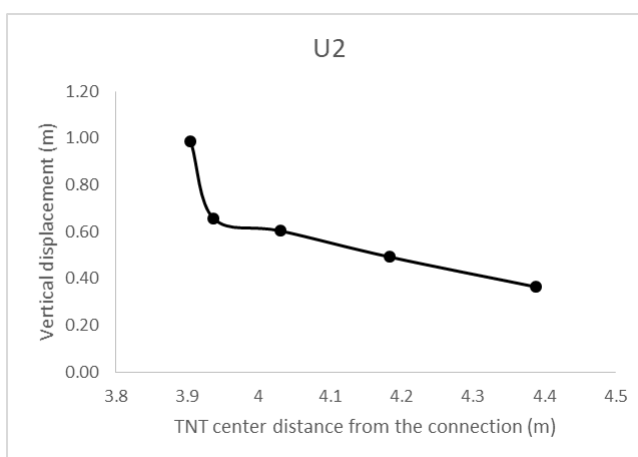
شکل ۱۹. آسیب کششی در هسته بتنی ستون در انتهای سناریوی اول انفجار

Fig. 19. Tensile damage in concrete core of the column at the end of the first blast scenario



شکل ۲۰. مقایسه تاریخچه تغییر مکان عمودی انتهای تیر در پنج سناریوی در نظر گرفته شده

Fig. 20. Comparison of vertical displacement history in the five different considered scenarios



شکل ۲۱. مقایسه حداکثر تغییر مکان عمودی انتهای تیر در پنج سناریوی در نظر گرفته شده

Fig. 21. Comparison of the maximum vertical displacement of the beam end in the five considered scenarios

ارتعاش می‌کند. در رژیم سوم، بعد از رسیدن به تغییر مکان مشخص، نمودار تغییر

می‌شود که در این رابطه چهار رژیم قابل مشاهده است، رژیم الاستیک، رژیم رفت و برگشتی در محدوده پلاستیک، رژیم آستانه خرابی و رژیم خرابی. در رژیم اول تغییر مکان ماندگار سیستم برابر صفر است. در رژیم دوم تغییر مکان حول مقدار مشخصی که تغییر مکان ماندگار سیستم است

۴-۲- رفتار اتصال با جوش نفوذی کامل

همانطور که قبلاً ذکر شد، ۵ سناریوی انفجار با وزن ثابت و مرکز متفاوت برای هر اتصال در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۵ کانتور تنش فون میزس و تغییر شکل قاب ۱۰۰ میلی ثانیه پس از بروز انفجار در سناریوی اول انفجار قابل مشاهده است. کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در شکل ۱۶ قابل مشاهده است.

مکان-زمان به صورت افقی در می‌آید. در رژیم آخر، تغییر مکان به صورت اکیدا صعودی است. در ادامه نتایج حاصل از رفتار سه نوع

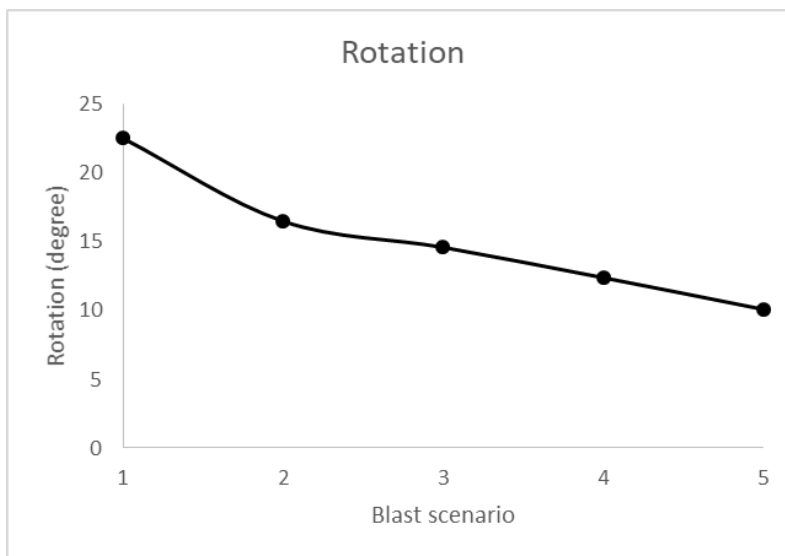
فاصله گرفتن ماده منفجره از راستای مرکز تیر، علاوه بر دوران اتفاق افتاده در تیر، پیچش قابل توجهی نیز در تیر اتفاق افتاده است (شکل ۱۸).

کانتور آسیب کششی در هسته بتنی ستون تحت اثر انفجار در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، بخش اعظم هسته بتنی ستون تحت تاثیر انفجار به شدت آسیب دیده است. با این حال به دلیل وجود جدار

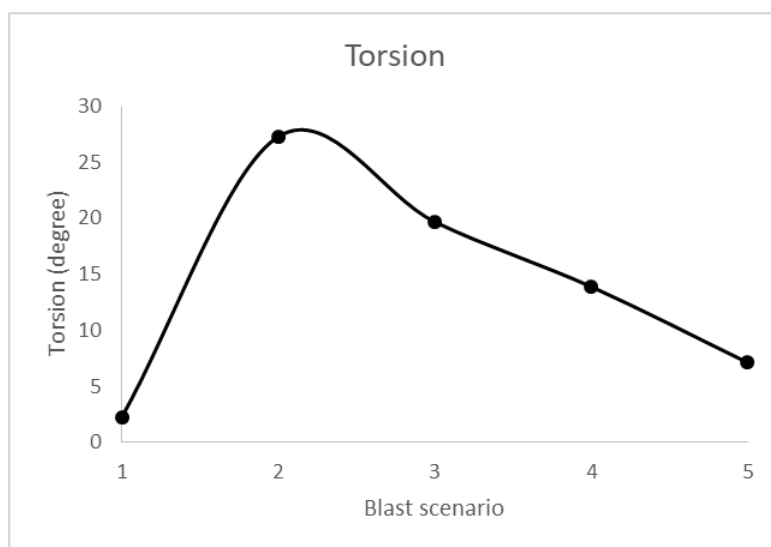
همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین پلاستیک شدگی در محل جوش بال پایینی تیر در مجاورت ستون ایجاد شده است و مقدار این کرنش قابل ملاحظه است. در محل اتصال تیر به ستون، صفحه فلزی ستون دچار تغییر شکل بالایی شده است. میزان بیرون آمدگی جدار فلزی ستون در این سناریو ۹ سانتی‌متر است.

در سناریوی اول به دلیل اینکه انفجار دقیقا در راستای مرکز تیر رخ می‌دهد، پیچشی در تیر مشاهده نشد. در سناریوهای دیگر و با



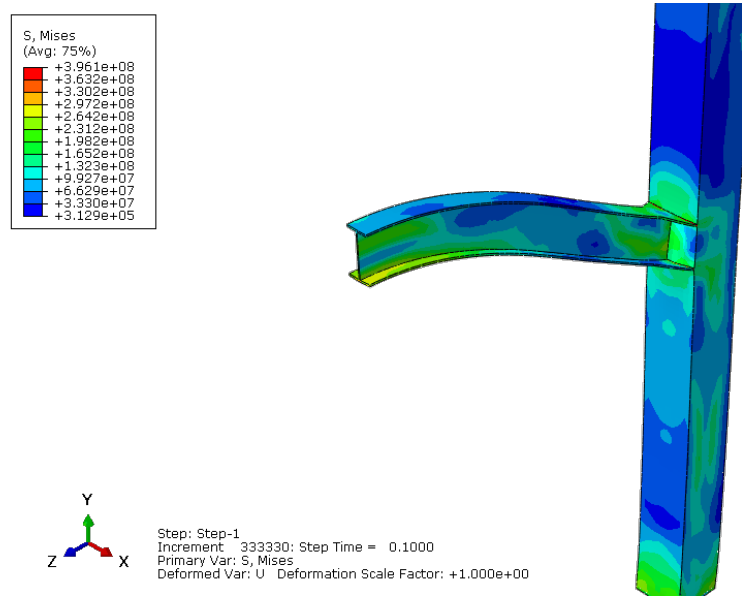
شکل ۲۲. مقایسه زاویه دوران اتصال تیر در پنج سناریوی در نظر گرفته شده

Fig. 22. Comparison of rotation angle of beam connection in the five considered scenarios



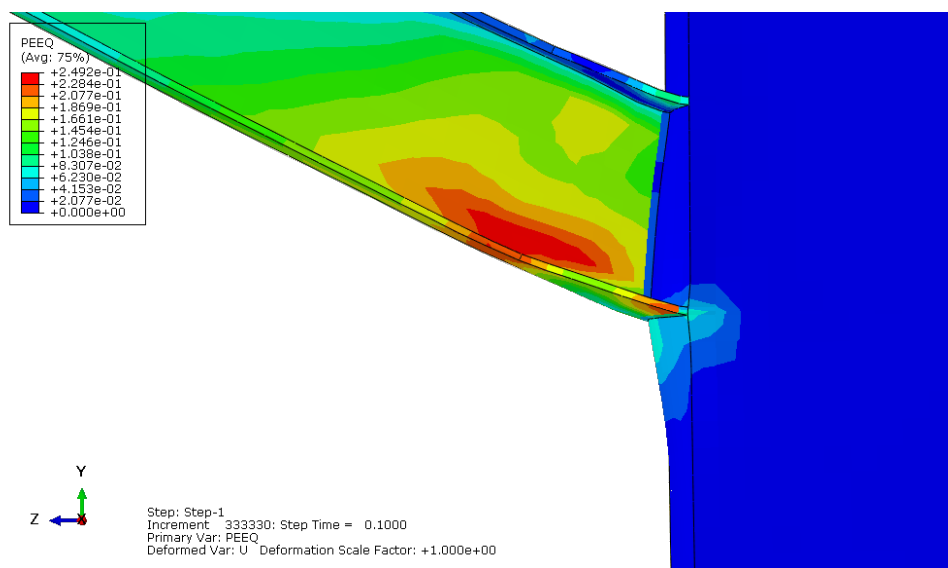
شکل ۲۳. مقایسه پیچش تیر در پنج سناریوی در نظر گرفته شده

Fig. 23. Comparison of beam torsion in the five considered scenarios



شکل ۲۴. تغییر شکل تیر با اتصال ماهیچه‌ای به ستون تحت سناریوی اول انفجار

Fig. 24. Beam deformation with haunch connection to column under the first considered scenario



شکل ۲۵. کرنش پلاستیک معادل در قاب با اتصال ماهیچه‌ای تحت سناریوی اول انفجار

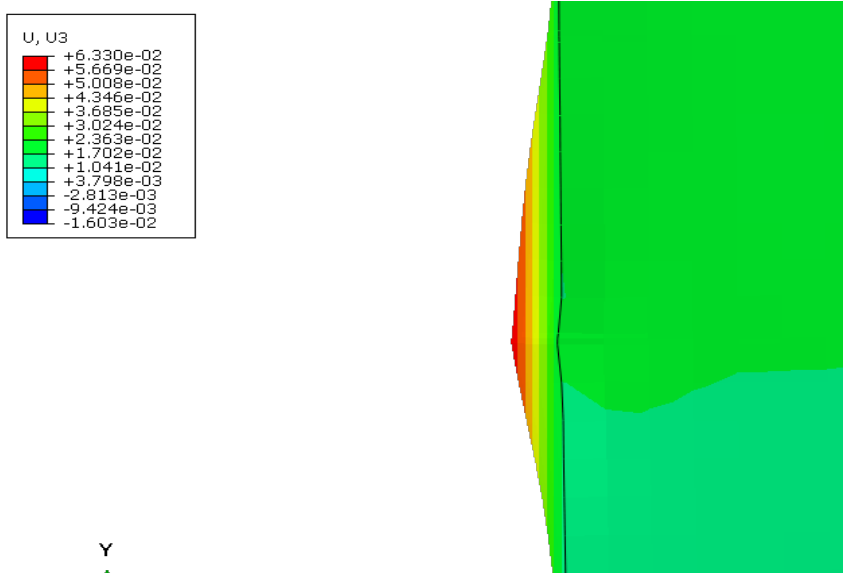
Fig. 25. Equivalent plastic strain in frame with haunch connection under the first blast scenario

مقدار حداکثر تعریف شده در مدل رفتاری بتن رخ داده است. در شکل ۲۰، تغییر مکان عمودی در وسط دهانه تیر در اثر پنج سناریوی انفجار قابل مشاهده است. با افزایش فاصله مرکز ماده منفجره از سازه، میزان تغییر مکان عمودی کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته است. در سناریوی اول چون موج انفجار با زاویه عمود به سطح زیرین تیر برخورد نموده است، میزان تغییر مکان عمودی اختلاف

فولادی اطراف و محصور شدگی هسته بتنی، تغییر شکل رخ داده در هسته بتنی قابل توجه نیست. تغییر شکل هسته بتنی در تمامی نقاط، به جز در مجاورت محل اتصال که جدار فولادی دچار تغییر شکل بالا شده است، ناچیز است. با دقت در شکل، تغییر شکل زیاد موضعی هسته بتنی در بخش بسیار کوچکی از ستون در ناحیه وسط آن قابل مشاهده است. آسیب دیدگی در محل اتصال تیر به ستون به صورت کامل و با

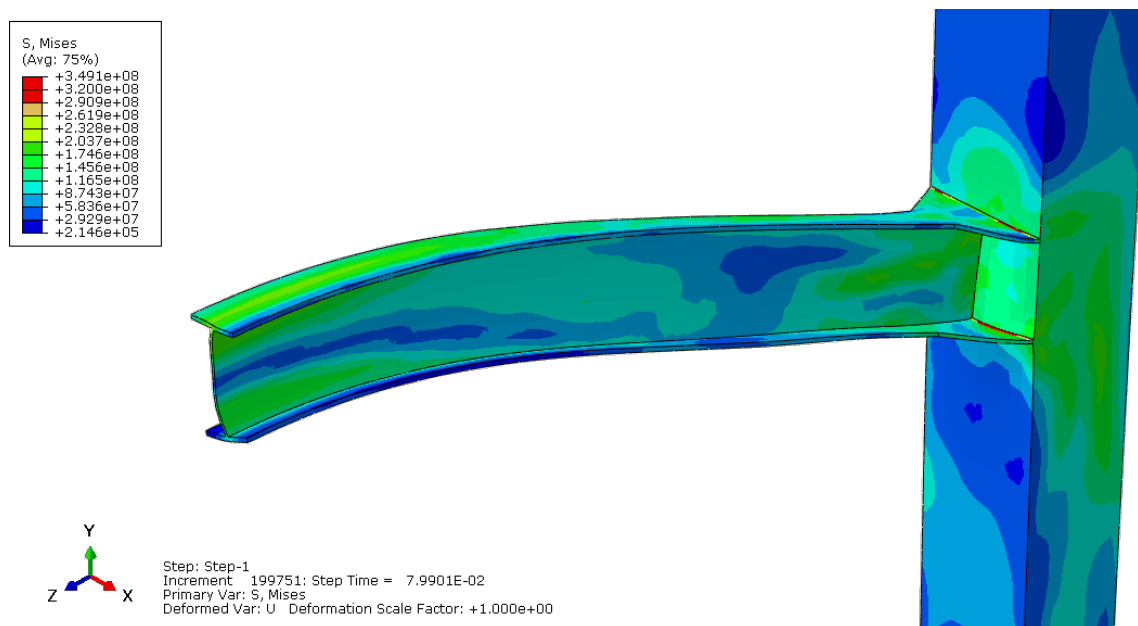
است. دلیل نشان دادن ادامه منحنی بعد از رسیدن به کرنش خرابی، مقایسه با رفتار اتصالات دیگر و سایر سناریوهای انفجاری بوده است. میزان حداکثر دوران اتصال و پیچش تیر برای ۵ سناریوی مطرح شده در اشکال ۲۲ و ۲۳ قابل مشاهده است.

قابل ملاحظه‌ای با سایر سناریوها دارد. در شکل ۲۱ مقدار حداکثر تغییر مکان عمودی در انتهای تیر قابل مشاهده است. اتصال امکان فراهم نمودن جابه‌جایی ۱ متر برای تیر را ندارد و با توجه به کرنش پلاستیک معادل ایجاد شده در این تغییر مکان (کرنش پلاستیک معادل برابر ۰/۵۵)، اتصال در سناریوی مربوطه دچار خرابی شده



شکل ۲۶. کشیدگی جدار فولادی ستون در محل اتصال بال تیر در سناریوی اول انفجار

Fig. 26. Tension in column steel tube at the connection to beam flange in the first scenario

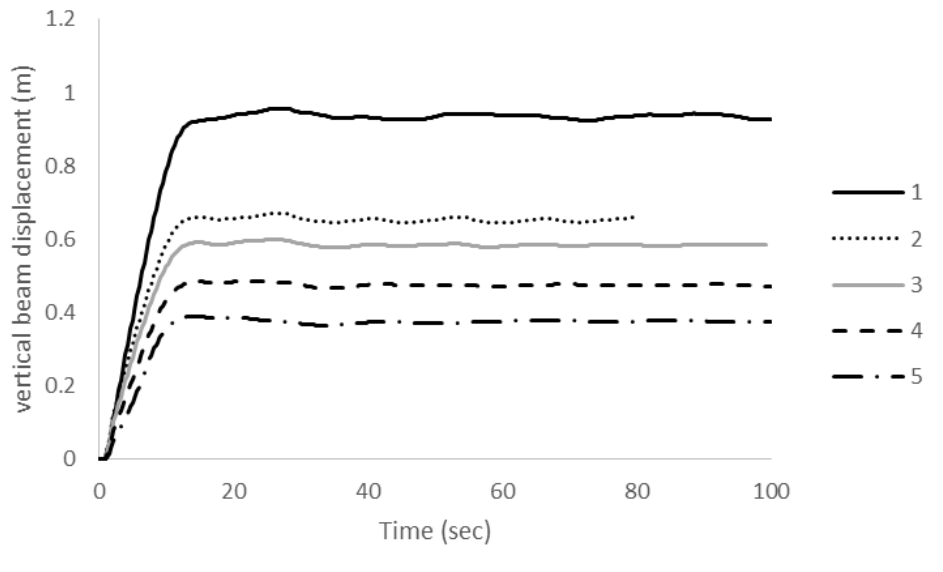


شکل ۲۷. تغییر شکل پیچشی تیر در سناریوی دوم انفجاری

Fig. 27. Torsional beam deformation in the second blast scenario

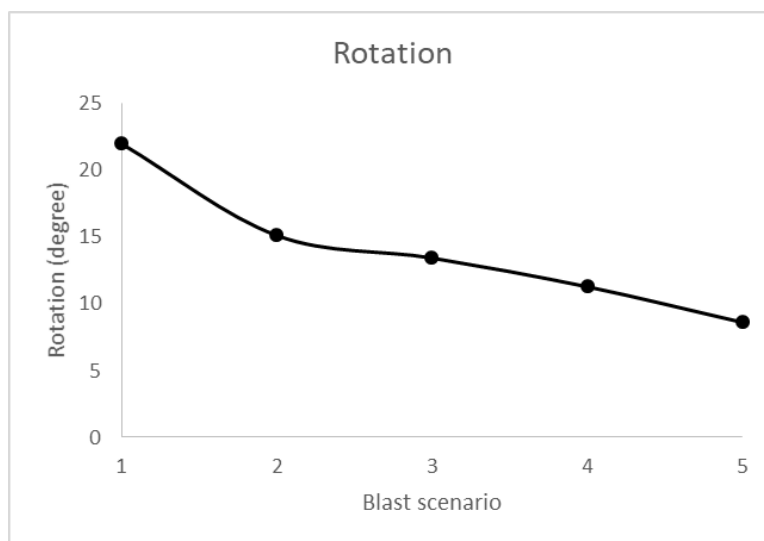
ملاحظه‌ای یافته است. با افزایش بیشتر فاصله و دور شدن مرکز ماده منفجره، میزان پیش‌گامی کاهش یافته است. با این حال مقدار پیش‌گامی روی داده در تیر مقدار بسیار قابل توجهی است که باعث تغییر شکل زیاد در محل اتصال تیر به ستون شده است.

با افزایش فاصله افقی مرکز ماده منفجره از راستای محور تیر، میزان حداکثر کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته است (حدود ۵۵٪) با افزایش ۲ متری فاصله ماده منفجره از راستای محور تیر. با این حال در سناریوی دوم که مرکز ماده منفجره ۰/۵ متر از راستای محور تیر فاصله داشته، میزان پیش‌گامی مشاهده شده در تیر افزایش قابل



شکل ۲۸. تغییر مکان عمودی وسط تیر در پنج سناریوی انفجار

Fig. 28. Vertical displacement of beam middle point in the five blast scenarios



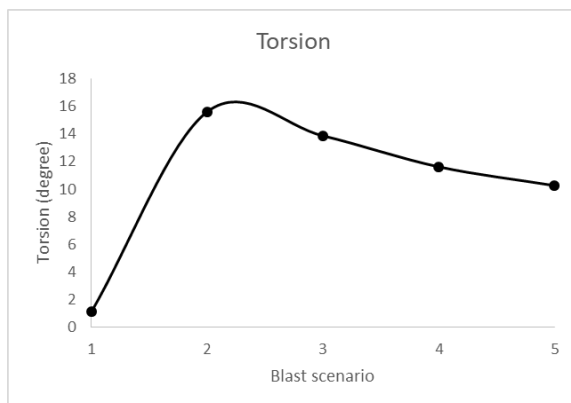
شکل ۲۹. دوران حداکثر رخ داده در تیر در سناریوهای انفجاری

Fig. 29. The maximum rotation occurred in the beam in the blast scenarios

ملاحظه است. کرنش پلاستیک معادل در سازه نیز در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان کرنش پلاستیک معادل حداکثر در سازه نسبت به حالت اتصال قبلی در حدود ۵۰٪ کاهش یافته است. همچنین محل به وجود آمدن کرنش پلاستیک معادل بالا، از وجه ستون فاصله گرفته که بسیار مطلوب است. به علاوه، کشیدگی جدار فولادی ستون در محل اتصال بال تیر نیز در این حالت به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است که در شکل

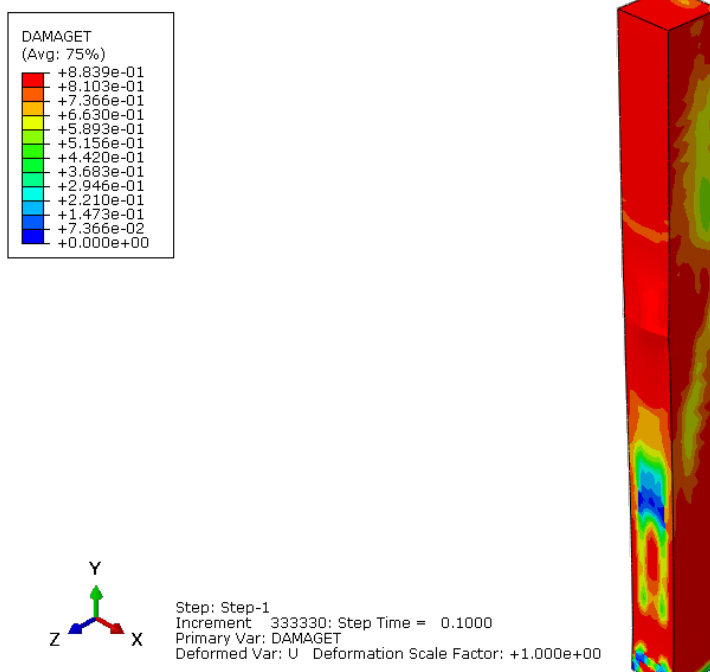
۳-۴- رفتار اتصال با صفحه ماهیچه‌ای در محل بال‌های تیر

اتصال دوم مورد بررسی، اتصال با صفحه ماهیچه‌ای در محل اتصال بال تیر به ستون است. زاویه ماهیچه مطابق توصیه‌های طراحی، ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است. ضخامت صفحه اتصال بال تیر به ستون برابر ضخامت بال تیر است. اتصال تحت پنج سناریوی مذکور شبیه‌سازی شده و نتایج مربوطه استخراج و مقایسه شده است. در شکل ۲۴ تغییر شکل قاب تحت سناریوی اول انفجار قابل



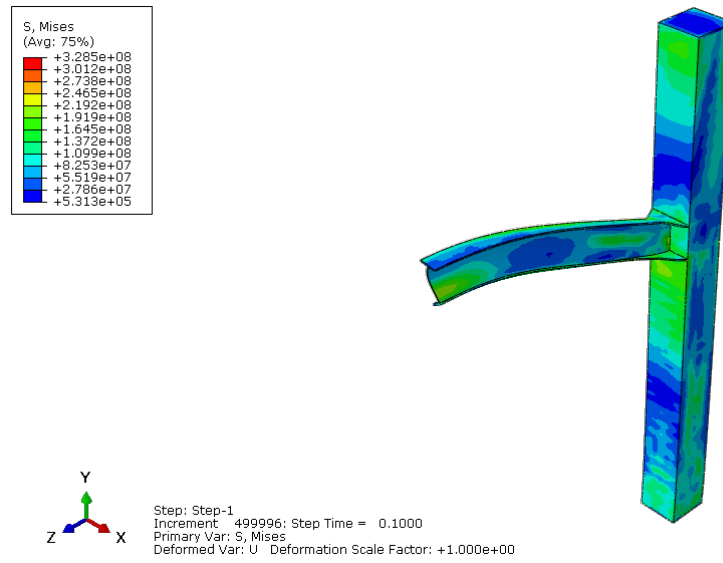
شکل ۳۰. پیش‌حداکثر تیر در پنج سناریوی انفجار

Fig. 30. The maximum beam torsion in the five blast scenarios



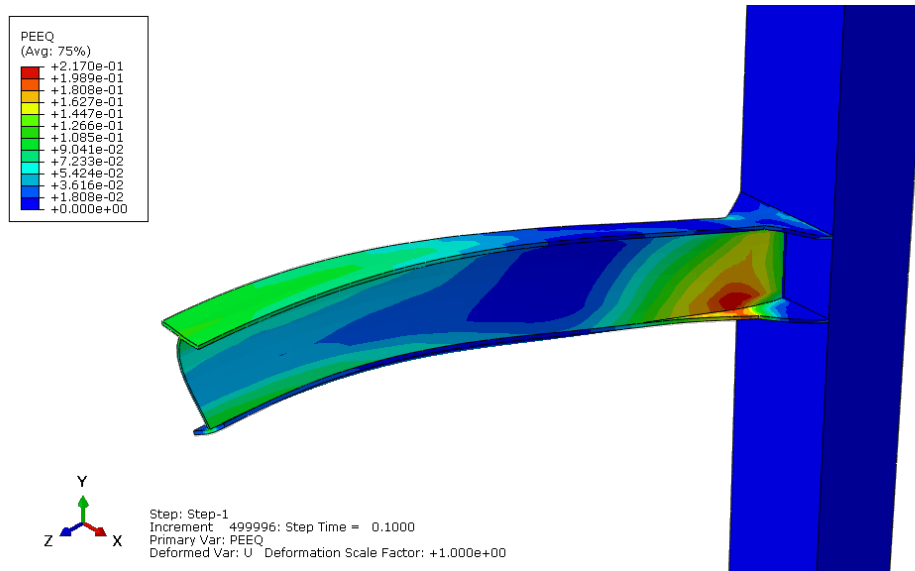
شکل ۳۱. آسیب کششی هسته بتنی ستون تحت سناریوی اول

Fig. 31. Tension damage of concrete core under the first scenario



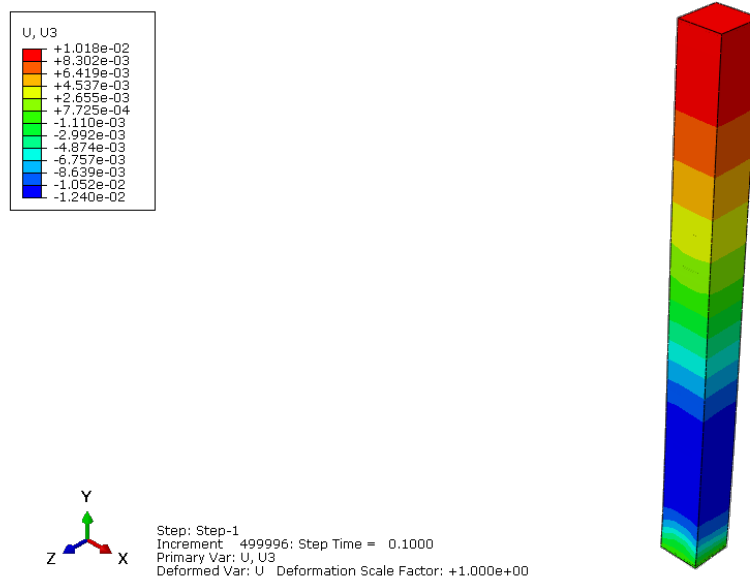
شکل ۳۲. تغییر شکل و کانتور تنش فون میزس ۱۰۰ میلی ثانیه بعد از بروز سناریوی انفجار اول

Fig. 32. Deformation and Von Mises stress contour 100 milliseconds after the occurrence of the first blast scenario



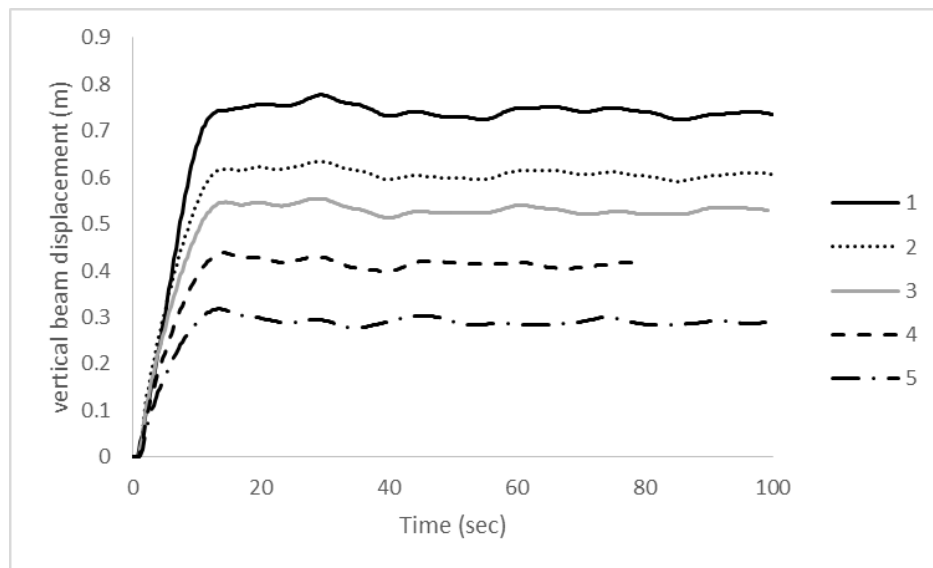
شکل ۳۳. کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب تحت سناریوی اول انفجار

Fig. 33. Equivalent plastic strain contour in frame under the first blast scenario



شکل ۳۴. تغییر مکان جانبی جدار فولادی ستون تحت سناریوی اول انفجار

Fig. 34. Horizontal displacement of the column steel tube under the first blast scenario

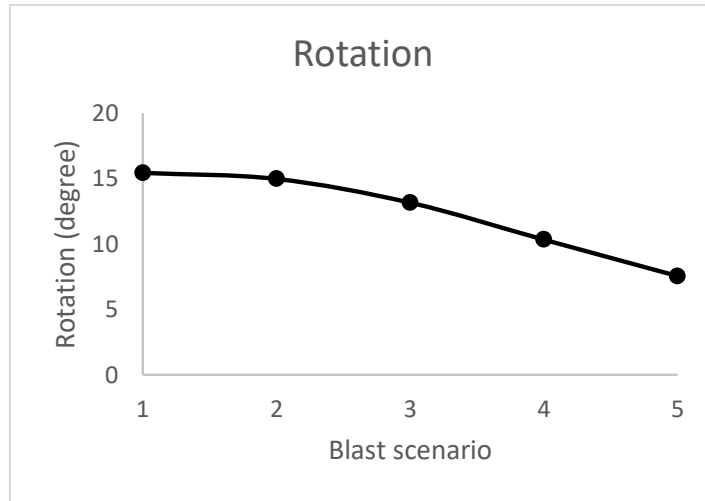


شکل ۳۵. تغییر مکان عمودی وسط تیر در پنج سناریوی انفجار

Fig. 35. Vertical displacement of beam middle point in the five blast scenarios

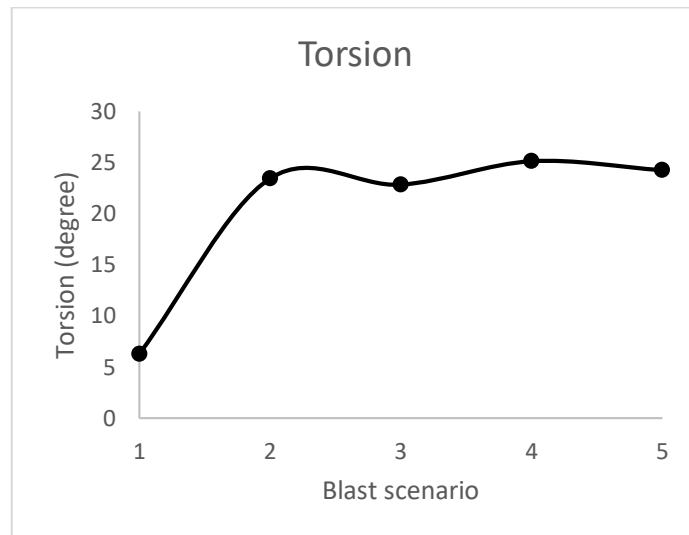
افقی نیز به تیر وارد می‌کند، پیچش مشاهده شده است. به عنوان نمونه تغییر شکل تیر در سناریوی دوم انفجار در شکل ۲۷ قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان پیچش به دلیل

۲۶ قابل مشاهده است. بیشترین میزان تغییر مکان جدار ستون در این حالت ۶/۳ سانتی‌متر است. که در حدود ۳۰٪ کاهش یافته است. در سناریوهای انفجاری دو تا پنج که در آن‌ها انفجار فشار با مولفه



شکل ۳۶. دوران حداکثر رخ داده در تیر در سناریوهای انفجاری

Fig. 36. The maximum rotation occurred in beam in the blast scenarios

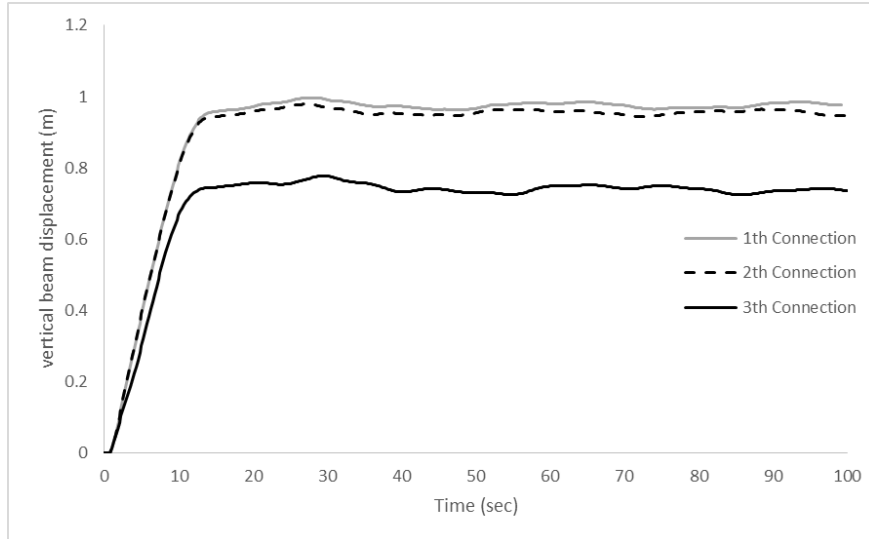


شکل ۳۷. پیچش حداکثر رخ داده در تیر در سناریوهای انفجاری

Fig. 37. The maximum rotation occurred in beam in the blast scenarios

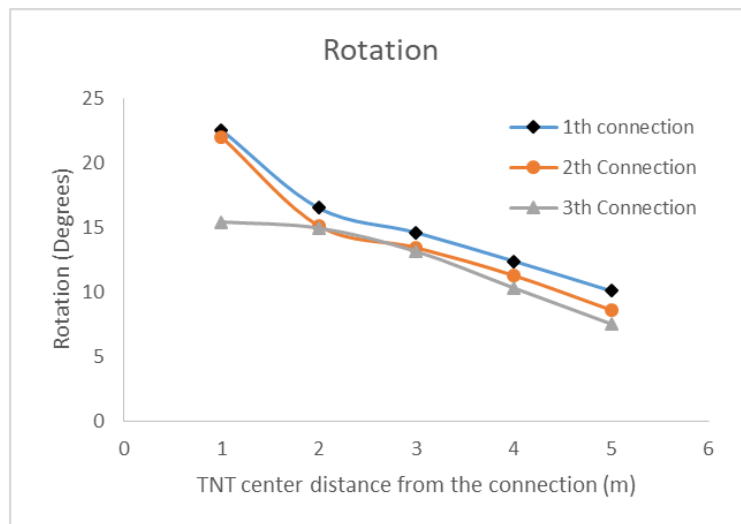
انجام شده است. دوران و پیچش حداکثر رخ داده در تیر در شکل ۲۹ و ۳۰ قابل مشاهده است. با وجود اینکه دوران اتصال در صفحه قاب تغییر چندانی نداشته، میزان پیچش رخ داده در تیر در حدود ۴۰٪ کاهش یافته است که نشان می دهد استفاده از این نوع تقویت اتصال توانسته تاثیر قابل

تقویت اتصال از حالت قبل به میزان چشمگیری کمتر است. در شکل ۲۸، تاریخچه تغییر مکان عمودی وسط تیر در پنج سناریوی مختلف با هم مقایسه شده است. میزان تغییر مکان عمودی در اتصال تقویت شده تغییر چندانی نسبت به حالت اول نداشته است، زیرا تقویت اتصال در جهت افقی



شکل ۳۸. حداکثر تغییر مکان عمودی در سه اتصال مورد بررسی

Fig. 38. the maximum torsion occurred in beam in blast scenarios



شکل ۳۹. حداکثر دوران تیر در سه اتصال مورد بررسی در سناریوهای متفاوت انفجار

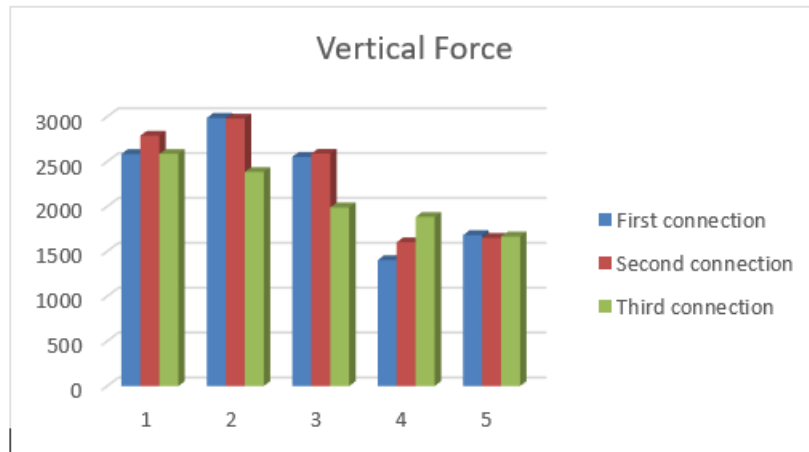
Fig. 39. The maximum vertical displacement in the three studied connections

میزان اندکی بهبود یافته است.

توجهی بر جلوگیری از پیچش تیر، که در بار زلزله و نیز در طراحی اتصال در نظر گرفته نشده است، داشته باشد.

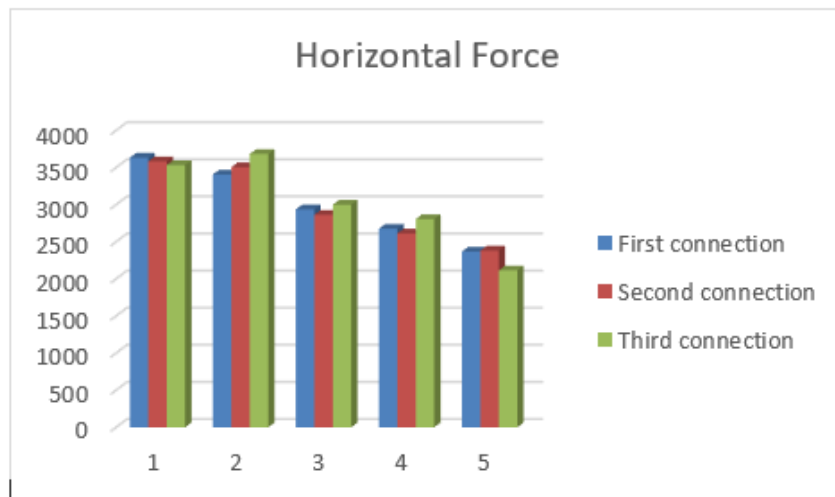
آسیب کششی در هسته بتنی ستون در شکل ۳۱ قابل مشاهده است. میزان آسیب کششی در هسته ستون نسبت به حالت قبل به

۴-۴- رفتار اتصال با صفحه ماهیچه‌ای و تیر امتداد یافته در داخل ستون مدل اجزای محدود اتصال سوم برای پنج سناریوی انفجار در نظر گرفته



شکل ۴۰. مقادیر حداکثر نیروی عمودی وارد بر سه نوع قاب تحت ۵ سناریوی انفجاری (کیلو نیوتن)

Fig. 39. The maximum beam rotation in the three studied connections in different blast scenarios

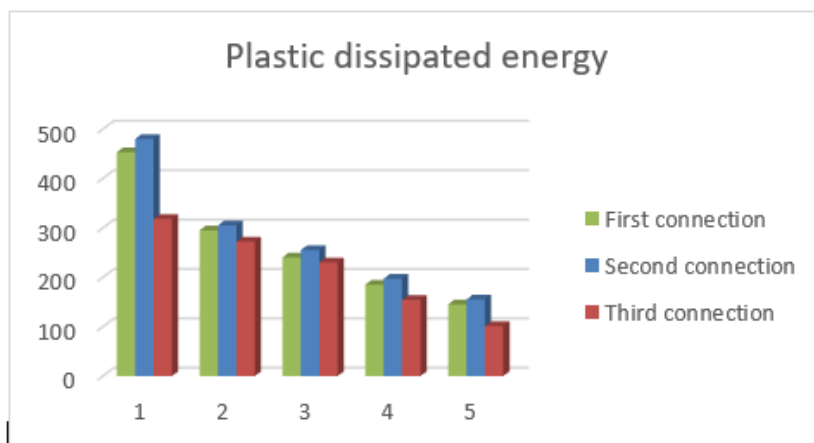


شکل ۴۱. مقادیر حداکثر نیروی افقی وارد بر سه نوع قاب تحت ۵ سناریوی انفجاری (کیلو نیوتن)

Fig. 40. The maximum values of vertical force applied on the three frame types in the five blast scenarios (kN)

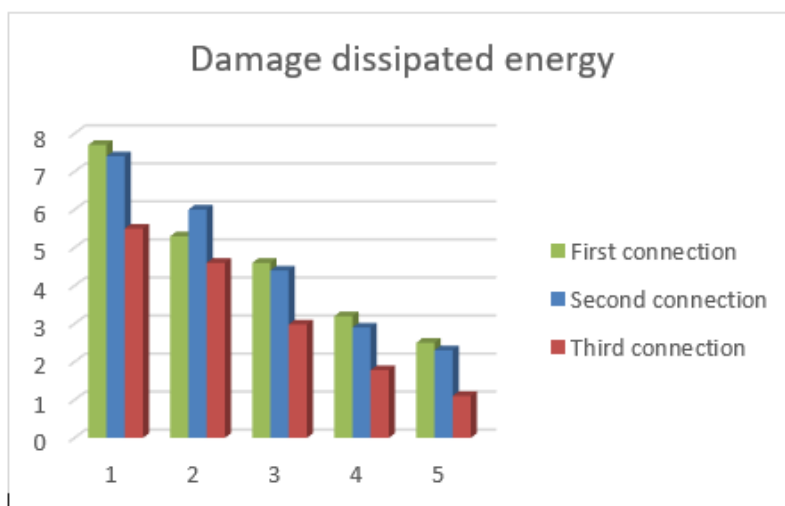
ستون در محل اتصال تیر، دچار کشیدگی نشده و سالم مانده است. در شکل ۳۵، تاریخچه تغییر مکان عمودی وسط تیر در پنج سناریوی مختلف با هم مقایسه شده است. میزان تغییر مکان عمودی در اتصال تقویت شده نسبت به حالت اول ۱۱/۵ درصد افزایش یافته است. پیچش حداکثر رخ داده در تیر در شکل ۳۶ و ۳۷ قابل مشاهده است.

شده ساخته و تحلیل شده است. در شکل ۳۲ تغییر شکل قاب تحت سناریوی اول انفجار قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در این حالت تغییر شکل و تنش حداکثر کاهش داشته است و مقدار تنش حداکثر نسبت به اتصال اول، ۲۵٪ کاهش یافته است. به علاوه، میزان کرنش پلاستیک معادل در تیر نیز در حدود ۶۵٪ کاهش یافته و محل بروز آن نیز فاصله قابل توجهی تا بر ستون دارد و به بعد از ماهیچه اتصال منتقل شده است (شکل ۳۲). مشکل کشیدگی جدار ستون نیز در این حالت برطرف شده و جداره



شکل ۴۲. مقادیر جذب انرژی پلاستیک سه نوع قاب تحت ۵ سناریوی انفجاری (کیلوژول)

Fig. 42. The maximum values of horizontal force applied on the three frame types in the five blast scenarios (kN)



شکل ۴۳. مقادیر جذب انرژی ناشی از آسیب بتن در سه نوع قاب تحت ۵ سناریوی انفجاری (کیلوژول)

Fig. 43. Plastic dissipation energy values of the three frame types under the five blast scenarios (kJ)

نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، اتصال سوم به خصوص در مورد انفجار شدیدتر عملکرد مناسب‌تری داشته و میزان دوران در مقایسه با دو اتصال دیگر در حدود ۳۰٪ کاهش یافته است. با مقایسه حداکثر مقدار کرنش پلاستیک معادل در سه اتصال تحت شدیدترین سناریوی انفجار، ملاحظه می‌شود که از لحاظ این شاخص نیز عملکرد اتصال سوم مناسب‌تر بوده است. میزان کرنش پلاستیک معادل حداکثر در اتصال اول، دوم و سوم به ترتیب ۰/۵۵، ۰/۲۴۹ و ۰/۲۱۷ است که نشان می‌دهد تیر در اتصال اول در ناحیه

۵- ارزیابی و مقایسه نتایج تحلیل‌ها

در شکل ۳۷ مقایسه تغییر مکان عمودی وسط تیر برای سه اتصال بررسی شده تحت شدیدترین سناریوی انفجار قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود، عملکرد اتصال اول و دوم بسیار نزدیک است و اتصال سوم، رفتار بسیار بهتری نسبت به دو اتصال دیگر دارد (حداکثر و مقدار ماندگار خیز انتهای تیر در حدود ۲۳٪ کاهش یافته است).

میزان دوران اتصال در شکل ۳۸ برای سه اتصال مورد بررسی

- بخش اعظم هسته بتنی ستون تحت تاثیر انفجار به شدت آسیب دیده است. با این حال به دلیل وجود جدار فولادی اطراف و محصور شدگی هسته بتنی، تغییر شکل رخ داده در هسته بتنی قابل توجه نیست. آسیب دیدگی در محل اتصال تیر به ستون به صورت کامل و با مقدار حداکثر تعریف شده در مدل رفتاری بتن رخ داده است.

- با افزایش فاصله مرکز ماده منفجره از سازه، میزان تغییر مکان عمودی کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته است. در سناریوی اول چون موج انفجار با زاویه عمود به سطح زیرین تیر برخورد نموده است، میزان تغییر مکان عمودی اختلاف قابل ملاحظه‌ای با سایر سناریوها دارد.

- وقتی از ورق ماهیچه‌ای برای اتصال تیر به ستون استفاده شده است، میزان کرنش پلاستیک معادل حداکثر در سازه نسبت به حالت اتصال قبلی در حدود ۵۰٪ کاهش یافته است. همچنین محل به وجود آمدن کرنش پلاستیک معادل بالا، از وجه ستون فاصله گرفته که بسیار مطلوب است. به علاوه، کشیدگی جدار فولادی ستون در محل اتصال بال تیر نیز در این حالت به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است و بیشترین میزان تغییر مکان جدار ستون در این حالت ۶/۳ سانتی‌متر است که در حدود ۳۰٪ نسبت به اتصال با جوش نفوذی تنها کاهش یافته است. همچنین، میزان پیچش به دلیل تقویت اتصال از حالت قبل به میزان چشمگیری کمتر است.

- در اتصال سوم که علاوه بر استفاده از صفحات ماهیچه‌ای، تیر در داخل ستون امتداد داده شده است، تغییر شکل و تنش حداکثر کاهش داشته است و مقدار تنش حداکثر نسبت به اتصال اول، ۲۵٪ کاهش یافته است. به علاوه، میزان کرنش پلاستیک معادل در تیر نیز در حدود ۱۳٪ کاهش یافته و محل بروز آن نیز فاصله قابل توجهی تا بر ستون دارد و به بعد از ماهیچه اتصال منتقل شده است. مشکل کشیدگی جدار ستون نیز در این حالت برطرف شده و جداره ستون در محل اتصال تیر، دچار کشیدگی نشده و سالم مانده است.

- با توجه به نتایج، استفاده از ورق‌های ماهیچه‌ای و نیز امتداد دادن تیر در داخل ستون باعث شده تا مقاومت اتصال در برابر بار انفجار به شدت افزایش یابد و قاب رفتار مطلوبی تحت انفجار با وزن ۴۵۴ کیلوگرم (۱۰۰۰ پوند) تی ان تی در فاصله نزدیک که انفجاری بسیار قوی است، داشته باشد. با مقایسه حداکثر مقدار دوران و پیچش در سه اتصال تحت شدیدترین سناریوی انفجار، ملاحظه می‌شود که

اتصال بال پایین به ستون دچار خرابی شده است. در شکل ۳۹ و ۴۰ مقادیر حداکثر نیروی عمودی و افقی وارد بر سه نوع قاب تحت ۵ سناریوی انفجاری در کنار هم نشان داده شده است.

به طور کلی، با افزایش فاصله افقی محل مرکز ماده منفجره از محور تیر، مقدار نیروی وارده به قاب در جهت افقی و عمودی کاهش یافته است. تاثیر نوع اتصال بر مقدار نیروی وارده افقی و عمودی روند منظمی ندارد.

در شکل ۴۱ جذب انرژی ناشی از پلاستیک شدگی در فولاد و بتن و در شکل ۴۲ جذب انرژی ناشی از آسیب کششی و فشاری در بتن برای مدل‌ها نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله ماده منفجره از تیر، مقدار انرژی جذب شده به صورت پلاستیک شدگی و آسیب دیدگی کاهش یافته است. انرژی پلاستیک جذب شده توسط تغییر شکل‌های پلاستیک بسیار بیشتر از انرژی جذب شده توسط خرد شدگی و ترک خوردگی در هسته بتنی است. در میان سه نمونه اتصال، اتصال دوم بیشترین جذب انرژی و اتصال سوم کمترین جذب انرژی پلاستیک را داشته که نشان می‌دهد میزان و گستره پلاستیک شدگی در اتصال سوم از سایر نمونه‌ها کمتر است که بیانگر عملکرد مطلوب‌تر اتصال سوم است.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار اتصالات تیر فولادی به ستون فولادی پر شده با بتن تحت بارگذاری انفجار به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحقیق را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر بیان نمود.

- در اتصال به صورت جوش نفوذی کامل تیر، بیشترین پلاستیک شدگی در محل جوش بال پایینی تیر در مجاورت ستون ایجاد شده است و مقدار این کرنش قابل ملاحظه است. در محل اتصال تیر به ستون، صفحه فلزی ستون دچار تغییر شکل بالایی شده است.

- در سناریوی اول به دلیل اینکه انفجار دقیقاً در راستای مرکز تیر رخ می‌دهد، پیچش قابل ملاحظه‌ای در تیر مشاهده نشد. در سناریوهای دیگر و با فاصله گرفتن ماده منفجره از راستای مرکز تیر، علاوه بر دوران اتفاق افتاده در تیر، پیچش قابل توجهی نیز در تیر اتفاق افتاده است.

- [5] Ricles JM, Peng SW, Lu LW. Seismic behavior of composite concrete filled steel tube column-wide flange beam-moment connections. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 130 (2), 223–32, 2004.
- [6] Du Y., Zhihua Chen, J.Y. Richard Liew, Ming-Xiang Xiong, Rectangular concrete-filled steel tubular beam-columns using high-strength steel: Experiments and design, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 131, Pages 1-18, 2017.
- [7] Hao H., Predictions of Structural Response to Dynamic Loads of Different Loading Rates, *International Journal of Protective Structures*, Volume 6, 2015
- [8] Alostaz Y., Schneider S., Analytical behavior of connections to concrete-filled steel tubes, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 40, Issue 2, Pages 95-127, 1996.
- [9] Schneider S., Alostaz T., Experimental Behavior of Connections to Concrete-filled Steel Tubes, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 45, Issue 3, Pages 321-352, 1998.
- [10] Wu L., Chung L., Tsai Sh., Shen T., Huang G., Seismic behavior of bolted beam-to-column connections for concrete filled steel tube, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 61, Issue 10, Pages 1387-1410, 2005.
- [11] Fujikura Sh., Bruneau M., and Lopez-Garcia D., Experimental Investigation of Multihazard Resistant Bridge Piers Having Concrete-Filled Steel Tube under Blast Loading, *Journal of Bridge Engineering*, .586-594, ASCE , 2008
- [12] Sadrnejad A., Ziaei M., Behavior of the Bolted Beam-Column Connections under Blast, *Passive Defence Sci. & Tech.*, 2, 93-101, 2013 (in Farsi).
- [13] Zhang F., Wu Ch., Zhao X., Li Zh., Heidarpour A., and Wang H., Numerical Modeling of Concrete-Filled Double-Skin Steel Square Tubular Columns under Blast Loading, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Volume 29, Issue 5, 2015.
- [14] Xu F., Chen J., Jin Wei-liang, Experimental investigation of concrete-filled steel tubular longitudinal gusset plate connections, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 124, Pages 163-172, 2016 .
- [15] Liu J., Yuanlong Yang, Jiepeng Liu, Xuhong Zhou, Experimental investigation of special-shaped concrete-filled steel tubular column to steel beam connections under cyclic loading, *Engineering Structures*, Volume 151, Pages 68-84, 2017.
- [16] Xu M., Shan Gao, Sumei Zhang, Honghao Li, Experimental study on bolted CFST-column joints with different configurations in accommodating column-loss, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 151, Pages 122-131, 2018.
- [17] Li M., Zong Zh., Hao H., Zhang X., Lin J., Xie G., Experimental and numerical study on the behaviour of CFDST columns subjected to close-in blast loading, *Engineering*

اتصال سوم به خصوص در مورد انفجار شدیدتر عملکرد مناسب‌تری داشته و میزان دوران در مقایسه با دو اتصال دیگر در حدود ۳۰٪ کاهش یافته است. از لحاظ شاخص کرنش پلاستیک معادل نیز عملکرد اتصال سوم مناسب تر بوده است.

با مقایسه حداکثر مقدار کرنش پلاستیک معادل در سه اتصال تحت شدیدترین سناریوی انفجار، ملاحظه می‌شود که از لحاظ این شاخص نیز عملکرد اتصال سوم مناسب‌تر بوده است. میزان کرنش پلاستیک معادل حداکثر در اتصال اول، دوم و سوم به ترتیب ۰/۵۵، ۰/۲۴۹ و ۰/۲۱۷ است که نشان می‌دهد تیر در اتصال اول در سناریوی اول در ناحیه اتصال بال پایین به ستون دچار خرابی شده است.

- با افزایش فاصله افقی محل مرکز ماده منفجره از محور تیر، مقدار نیروی وارده به قاب در جهت افقی و عمودی کاهش یافته است. تاثیر نوع اتصال بر مقدار نیروی وارده افقی و عمودی روند منظمی ندارد.

- با افزایش فاصله ماده منفجره از تیر، مقدار انرژی جذب شده به صورت پلاستیک شدگی و آسیب دیدگی کاهش یافته است. انرژی پلاستیک جذب شده توسط تغییر شکل‌های پلاستیک بسیار بیشتر از انرژی جذب شده توسط خردشدگی و ترک خوردگی در هسته بتنی است. در میان سه نمونه اتصال، اتصال دوم بیشترین جذب انرژی و اتصال سوم کمترین جذب انرژی پلاستیک را داشته که نشان می‌دهد میزان و گستره پلاستیک شدگی در اتصال سوم از سایر نمونه‌ها کمتر است که بیانگر عملکرد مطلوب‌تر اتصال سوم است.

منابع

- [1] Brown N. K., Kowalsky M., Nau J., Strain Limits for Concrete Filled Steel Tubes in Aashto Seismic Provisions, Report prepared for Alaska Department of Transportation & Public Facilities, North Carolina State University, 2013.
- [2] Schneider SP, Alostaz YM. Experimental behavior connections to concrete-filled steel tubes, *Journal of Construction Steel Research*, 45(3): 321–52, 1998.
- [3] Kang CH, Shin KJ, Oh YS, Moon TS, Hysteresis behavior of CFT column to H-beam connections with external T-stiffeners and penetrated elements. *Engineering Structure*, 23(9):1194–201, 2001.
- [4] Cheng CT, Chung LL. Seismic performance of steel beams to concrete-filled steel tubular column connections, *Journal of Construction Steel Research*, 59(3):405–26, 2003.

- Proving Ground, MD, 1984.
- [22] Li B., Yuan-Long Yang, Yohchia-Frank Chen, Wei Cheng, Lin-Bo Zhang, Behavior of connections between square CFST columns and H-section steel beams, Journal of Constructional Steel Research, Volume 145, Pages 10-27, 2018
- [23] Design guidance for shelters and safe rooms, Risk management series, FEMA-453, 2006.
- [24] Ziaei M., Investigation on Behavior of Bolted Beam-to-Column Connections in Steel Frames under Blast Loading, Ph.D dissertation, K.N.Toosi university of Technology, Tehran, Iran, 2014.
- Structures, Volume 185, Pages 203-220, 2019 .
- [18] LS-DYNA keyword user's manual (LS-DYNA R8.0). Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2015.
- [19] <https://www.sciencealert.com/this-incredible-photoclearly-shows-an-explosion-s-shock-wave>
- [20] UFC3-340-2, UFC3-340-2, Structures to resist the effects of accidental explosions, Department of defense, United States of America, 2008.
- [21] Kingery C.N., G. Bulmash, Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst, Report ARBL-TR-02555, U.S. Army BRL, Aberdeen

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Aliakbari, S. A. Hashemi, M. Ziaei, Y. Nasira, Investigation of Vulnerability of Concrete Filled Steel Column Connections under Different Blast Scenarios, Amirkabir J. Civil Eng., 53(12) (2022) 5377-5406.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18821.6971



