



Evaluation Performance of a Reinforced Concrete Column Subjected to Explosion Using Incremental Explosive Analysis

A. Seifinia, M. R. Mohammadiezhadeh*

Department of Civil Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

ABSTRACT: To protect citizens and infrastructures in modern society, the safe design of structures against accidental explosion is a particular importance. In this study, the aim is to evaluate the performance of a reinforced concrete column using incremental explosive analysis (IEA), which is inspired by the method of incremental dynamic analysis. In order to achieve this goal, the concrete moment frame is designed for dead, live, and earthquake loads based on Iranian national regulations codes in Etabs software. Then, an exterior designed column related to the RC moment frame is analyzed under different ground blast intensities (hemispherical explosions at the ground level) at the stand of distances 3, 5, 7, 10, 12, 15, 17 and 20 meters. Eulerian-Lagrangian coupling method has been used to obtain the dynamic response of the structure against rapid explosion load in Autodyn. After completing the analysis and obtaining the structural response, the IEA Curves are drawn as a structural response in terms of the explosion intensity. Fragility curves also are obtained to determine the probability of exceeding each limit state. The results show that the probability of exceeding the limit state Ls-1 for intensity measure $\frac{1}{7}$ equals to 1 approximately equals to 80%, for the Ls-2 is about 60% and for the Ls-3 is 40%. Finally, the pressure-impulse diagram on a logarithmic scale is obtained as the combination of pressures and impulses which produce the column response in the three considered limit states. The results show that fragility curves and pressure-impulse diagrams, along with IEA curves provide useful information to design.

Review History:

Received: Jan. 29, 2021
Revised: Aug. 01, 2021
Accepted: Aug. 22, 2021
Available Online: Sep. 02, 2021

Keywords:

Incremental explosion analysis
Incremental dynamic analysis
Performance
Fragility curve
IEA diagrams, P-I diagram

1- Introduction

Today, with the increasing number of terrorist incidents around the world, and considering the explosive uncertainties such as the amount of charge, the distance of the explosion from the structure and the type of explosive, the design of the members of the structure for a particular explosion does not seem to be conservative. Therefore, the purpose of this study is to evaluate the performance of a reinforced concrete column (RC Column) against different blast intensities using Incremental Explosive Analysis (IEA) [1]. In order to achieve this goal, the concrete moment frame is designed for dead, live, and earthquake loads based on Iranian national regulations codes in Etabs software. Then, an exterior designed column related to the RC moment frame is analyzed under different ground blast intensity (hemispherical explosions at the ground level) at stand of distance 3, 5, 7, 10, 12, 15, 17 and 20 meters. Eulerian-Lagrangian coupling method has been used to obtain the dynamic response of the structure against rapid explosion load in Autodyn 3D. After completing the analysis and obtaining the structural response, the IEA Curve is drawn as a structural response in terms of the explosion intensity.

Fragility curves also are obtained to determine the probability of exceeding each limit states

2- IEA Analysis

Incremental explosive analysis method inspired by Incremental dynamic analysis [2] method, used in order to determine the level of structural performance, estimate the full range of the structure response accurately (from elastic to yield and then nonlinear phase and finally general instability of the structure) by performing a series of nonlinear dynamic analysis for different explosion intensities. To use this method numerically, the following steps should be considered: 1. Numerical modeling and validation, 2. Selection of two appropriate parameters for intensity measure (IM) and damage measure (DM), 3. Drawing and summarizing IEA curves based on performing a series of nonlinear dynamic analyses for different explosion intensities, 4. Drawing fragility curves. In this study, the inverse of the scaled distance is considered as an intensity measure and a maximum support rotation as a demand parameter based on the ASCE code [3].

*Corresponding author's email: mrz_mohammadizadeh@hormozgan.ac.ir



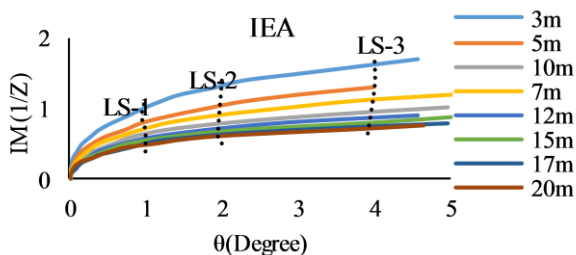


Fig. 1. IEA Curves

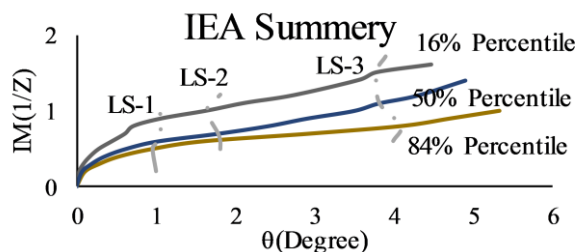


Fig. 2. IEA Summary

3- Numerical Modeling

3- 1- Model parts

The designed column for this study has dimensions of 300*300 mm² and a height of 3 meters. The Eulerian-Lagrangian method was used to obtain the column response to the explosion in Autodyn 3D. Concrete was modeled using Lagrange processor, while reinforcement was modeled using Beam sub-grid. The air around the column and the explosive were modeled using Euler sub-grid. A mesh size of 10mm was selected for the model. To reduce computation time, for different stand-off distances, the explosion is first performed in one dimension; then it is transferred to three dimensions using mapping technology. Also, in order to experience the column deformation behavior similar to reality, a contact algorithm based on body interaction (The bond of concrete and reinforcement without a slip) has been considered.

3- 2- Constitutive material models

In Autodyn hydrocode, by solving three equations of conservation of mass, momentum and energy, the structural response subjected to the impact of the explosion is obtained. Five variables are needed to solve these equations. Since the number of existing equations (three conservation equations) is less than the number of unknowns, two more equations are needed to solve the problem. The fourth equation is the material equation of state (EOS), which shows the behavior of matter (gas or solid) in an explosion simulation. The fifth equation is the known one of the variables [4]. In this study, the Jones-Walkins-Lee (JWL) equation of state and ideal gas EOS have been used for explosion and air. The JWL equation can accurately describe the state of explosion products in many explosives. The JWL EOS is used for describing the pressure, volume, and energy of explosives used in many hydro codes [5]. To investigate the effect of air compression and its temperature increase under the explosion, Ideal gas EOS for Eulerian air domain needs to be defined [6]. In addition, designing structures to withstand the effects of explosions requires knowledge and understanding of the dynamic properties of materials. In this study, the Johnson-Cook strength model has been selected to investigate the dynamic stresses in reinforcements. The Johnson-cook equation expresses the hydrostatic stress in material as

a function of strain rate and temperature [7]. To obtain an accurate prediction of concrete response under blast loads, a proper strength model which reflects the characteristics of the concrete material behavior at a high strain rate is needed. Therefore, The RHT material model is adopted. RHT model uses three limited-surface, namely, an elastic-limit surface, a failure surface, and the remaining strength surface, to describe the behavior of concrete under high-pressures, high strain-rates and complex stress conditions [8].

4- Result and Discussion

By keeping the different stand of distance constant and increasing the weight of the explosion with increased parameter Δ and performing nonlinear dynamic analysis for each blast intensity, the displacement in the middle of the column is obtained. Then Equation 1 is used to calculate the support rotation of the column.

$$\theta = \tan^{-1}(y/L/2) \tag{1}$$

After obtaining the support rotation for each blast intensity, the IEA diagram is drawn in Figure 1.

IEA diagrams are also summarized in 16%, 50% and 84% percentiles. These percentiles are based on the normal distribution of the values obtained. Figure 2 shows a summary of the IEA curve for the 16th, 50th and 84th percentiles, along with the three limit states considered. In addition to the IEA curve and the results obtained from its summarization, for designing or evaluating the performance of structures against explosions, the fragility curve can be drawn. After initial analysis and access to IEA data, fragility curves can be extracted. From fragility curves, it is possible to predict the percentage of probability of exceeding each limit state (Figure 3).

5- Conclusions

In this study, the results of IEA curves for different explosions (0.02 to 3400 kg at stand-of distances of 3 to 20 meters) have been obtained and summarized. By using IEA diagrams, the minimum protection distance of the structure

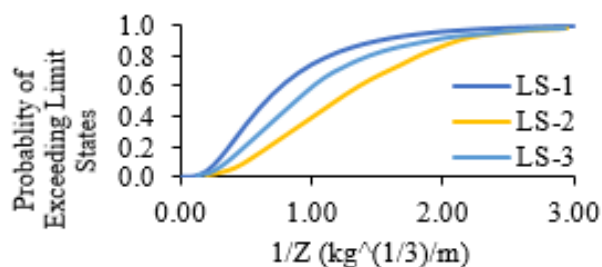


Fig. 3. Fragility Curve

or structural elements against different explosion weight can be calculated. After drawing the fragility curves obtained from the IEA data, the results show that the probability of exceeding the limit state Ls-1 for intensity measure $1/Z$ equals to 1 approximately equals to 80%, for the Ls-2 is about 60% and for the Ls-3 is 40%. Finally, the pressure-impulse diagram on a logarithmic scale is obtained as a combination of pressures and impulses that produce the column response in the three considered limit states. The results show that fragility curves and pressure-impulse diagrams along with IEA curves provide useful information to design. However, the use of the Eulerian-Lagrangian coupling method is more complex and its calculations require special hardware, but it gives a better understanding of structural behavior (interaction of fluid (explosion) and structure).

References

- [1] M. Biglarkhani, K. Sadeghi, Incremental explosive analysis and its application to performance-based assessment of stiffened and unstiffened cylindrical shells subjected to underwater explosion, *Shock and Vibration*, (2017).
- [2] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, Incremental dynamic analysis, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(3) (2002) 491-514.
- [3] ASCE, Blast protection of buildings, in, American Society of Civil Engineers, (2011).
- [4] P. Sherkar, Modeling the effects of detonations of high explosives to inform blast-resistant design, State University of New York at Buffalo, (2010).
- [5] W. Wang, D. Zhang, F. Lu, S.-c. Wang, F. Tang, Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion, *Engineering Failure Analysis*, 27 (2013) 41-51.
- [6] X. Cao, Q. Xu, J. Chen, J. Li, Damage prediction for an AP1000 nuclear island subjected to a contact explosion, *Structural Engineering International*, 28(4) (2018) 526-534.
- [7] D. Forni, B. Chiaia, E. Cadoni, Strain rate behaviour in tension of S355 steel: Base for progressive collapse analysis, *Engineering Structures*, 119 (2016) 164-173.
- [8] W. Riedel, 10 years RHT: A review of concrete modelling and hydrocode applications, *Predictive modeling of dynamic processes*, (2009) 143-165.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Seifinia, M. R. Mohammadzadeh, Evaluation Performance of a Reinforced Concrete Column Subjected to Explosion Using Incremental Explosive Analysis, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(4) (2022) 285-288.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19569.7202





ارزیابی عملکرد یک ستون بتن مسلح در برابر بار انفجار با استفاده از روش تحلیل انفجاری نموی

علی سیفی‌نیا، محمدرضا محمدی زاده*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۰
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۳۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۱۱

کلمات کلیدی:

تحلیل انفجاری نموی
تحلیل دینامیکی افزاینده
عملکرد
منحنی شکنندگی
نمودارهای IEA
فشار-ضربه

خلاصه: برای جامعه‌ی مدرن به منظور محافظت و امنیت شهروندان خود، طراحی ایمن سازه‌ها در برابر بارهای انفجار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از آنجا که اعتبارسنجی و بهینه‌سازی سازه‌های محافظ در برابر بارهای انفجار با استفاده از تست‌های تجربی در مقیاس واقعی، یک چالش به حساب می‌آید. لذا بایستی از ابزارهای عددی پیشرفته مانند روش المان محدود، حجم محدود و تقاض محدود در این خصوص استفاده نمود. در این مطالعه، هدف ارزیابی عملکرد یک ستون بتن مسلح با استفاده از روش آماری تحلیل انفجاری نموی که الهام گرفته از روش تحلیل دینامیکی نموی است، می‌باشد. به منظور رسیدن به این هدف یک ستون بتنی در نرم‌افزار AUTODYN در فواصل مختلف به صورت افزایشی در معرض بار انفجار نیم‌کره در سطح زمین به صورت شبیه‌سازی روش همبستگی‌اولری-لاگرانژی قرار می‌گیرد. سپس با انتخاب شاخص مناسب خرابی و حدود عملکرد چرخش تکیه‌گاهی اعضای فشاری بر اساس مبحث ۲۱ از مجموعه مقررات ملی ایران و ASCE/SEI 59-11 نمودارهای IEA ترسیم و خلاصه‌سازی می‌شوند. در پایان، منحنی شکنندگی و نمودارهای فشار-ضربه برای سازه ستون به منظور تعیین سطح عملکرد از تحلیل IEA به دست می‌آید. نتایج نشان می‌دهد احتمال فراگذشت از حالت حدی $\theta = 1^\circ$ (درج (میزان خرابی کم) برای مقیاس شدت برابر با یک $(IM = (1/Z) = 1)$ به طور تقریبی برابر ۸۰٪، برای حالت حدی $\theta = 2^\circ$ (خرابی متوسط) حدود ۶۰٪ و حالت خرابی زیاد $\theta = 4^\circ$ ۴۰٪ است.

۱- مقدمه

بمب‌گذاری احتمالی گروه‌های تروریستی هستند و در صورت وقوع می‌توانند خسارت‌های جبران ناپذیری را به وجود آورند. از آنجایی که بیشتر سازه‌های عمرانی برای بار زلزله طراحی می‌شوند و در برابر بارهای ناگهانی مانند انفجار آسیب‌پذیر هستند. لذا بایستی تحقیقات بیشتری انجام و آیین‌نامه‌های بیشتری برای طراحی و ساخت تدوین شود. مسئله مقاومت سازه در مقابل بار انفجار در جنگ جهانی دوم توسط ارتش‌های جهان مورد بررسی قرار گرفته است. آیین‌نامه TM 5-1300 حاصل بررسی سازه‌های تخریب شده ناشی از انفجار در جنگ جهانی دوم است [۲]. این آیین‌نامه بعداً به نام UFC 3-340-02 تغییر نام داد و مورد دسترسی عموم قرار گرفت [۳]. همچنین برخی از اسناد و مدارک که امکان پیش‌بینی اثرات انفجار را فراهم می‌آورد، برای استفاده مهندسان طراح سازه در دسترس است. ایمنی در برابر انفجار یکی از مؤلفه‌های مهم در حوزه‌ی عمومی پیشگیری و پدافند غیرعامل است و تاکنون طراحی مقاوم در برابر انفجار به صورت سنتی با استفاده از

با هدف ایجاد تلفات جمعی، تخریب بصری چشمگیر، پس لرزه‌های چشمگیر اقتصادی و ترس در میان جمعیت، زیرساخت‌های عمرانی به تدریج تبدیل به اهداف حمله بالقوه در فعالیت‌های تروریستی مدرن شده‌اند. در چند دهه گذشته، بسیاری از حملات تروریستی و انفجارهای تصادفی منجر به سقوط کامل یا جزئی از ساختمان‌ها شده که منجر به تلفات زیاد و از بین رفتن سرمایه شده است. به عنوان مثال، در طول ۸۰ سال به ویژه در سال‌های ۱۹۲۰ تا ۲۰۰۰ میلادی، تقریباً ۹۰۰ حمله تروریستی در اثر انفجار مربوط به سیستم حمل و نقل زمینی رخ داده است [۱]. پس از وقایع حادثه یازده سپتامبر ۲۰۰۱ (میلادی) که منجر به فروپاشی مرکز تجارت جهانی در نیویورک شد، نکته‌ای که بیشتر مورد توجه قرار گرفت این بود که ساختمان‌های غیرنظامی و دولتی و همچنین مناطقی با تمرکز زیاد مردم (ایستگاه‌های مترو و قطار، وسایل حمل و نقل با ازدحام زیاد، استادیوم‌ها) در حال تبدیل شدن به اهداف

1 Unified Facility Criteria

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mrz_mohammadizadeh@hormozgan.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



مطالعه دیگری که توسط عابدینی و همکاران^۴ [۷] انجام گردید، پارامترهای بار انفجار برای طراحی ستون‌های بتن مسلح مقاوم در برابر انفجار مورد بررسی قرار گرفت. در این شبیه‌سازی، انفجار با استفاده از روش تحلیل المان محدود با تغییر پارامترهای انفجار، اثرات فاصله‌های مختلف مقیاس شده بر رفتار غیرخطی ستون‌های بتن مسلح مورد مطالعه قرار گرفت. طبق نتایج شبیه‌سازی، افزایش عرض ستون بتنی و میلگردهای طولی باعث افزایش ظرفیت مقاومت فشاری باقی مانده ستون می‌شود. همچنین، بدون تغییر در فاصله مقیاس شده^۵، افزایش وزن ماده منفجره یا فاصله سرد (فاصله‌ی نقطه شروع انفجار تا سازه هدف)^۶ کمتر باعث آسیب بیشتر به ستون بتنی می‌شود. در مطالعه دیگری آبلادی و برایماه^۷ [۸] بررسی عددی اثر انفجار نزدیک بر ستون‌های بتنی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد ستون‌هایی که برای زلزله‌های شدید طراحی شده‌اند در اثر قرار گرفتن تحت بار انفجار مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. در این پژوهش ستون‌ها در نرم‌افزار AUTODYN و از دیدگاه لاگرانژی مدل‌سازی شدند. نوزاده و همکاران^۸ [۹] اثر $P - \delta$ در ساختمان ۱۰ طبقه بتن مسلح در برابر بار انفجار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تغییر شکل‌های جانبی به وجود آمده توسط بارگذاری انفجار به طور قابل توجهی بزرگ‌تر از تغییر شکل‌های جانبی لرزه‌ای است. نتایج این تحقیق نشان داد که در نظر گرفتن پاسخ کلی یک ساختمان به بارهای انفجار مهم است و باید پاسخ سازه مانند تغییر شکل‌های جانبی و جابه‌جایی سقف، در طراحی و روش‌های ارزیابی بارگذاری انفجار مورد توجه قرار گیرند. در مطالعه دیگری که توسط دوا و همکاران^۹ [۱۰] انجام شد، اثر انفجار تماسی^{۱۰} بر ستون‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه افزایش عرض ستون (نسبت ابعاد ستون) باعث کاهش خرابی ستون بتن مسلح می‌شود، به طوری که افزایش عرض ستون با ابعاد 300×900 میلی‌متر مربع تا ۸۰٪ و ۱۴۰٪ شاخص خرابی ستون از ۱ به ترتیب به ۰/۵۵ و ۰/۴۸ کاهش می‌دهد. بیگلرخانی و صادقی [۱۱ و ۱۲] روش تحلیل انفجاری افزایشی (IEA) به عنوان یک روش کاربردی برای ارزیابی مبتنی بر عملکرد پوسته‌های استوانه‌ای و ورق‌های تقویت شده^{۱۱} که در معرض بارگذاری انفجار زیر آب قرار دارند را ارائه نمودند.

روش‌های ساده انجام شده است. متداول‌ترین روش بدین صورت است که اعضای باربر سازه‌ای مانند ستون‌ها و تیرها به عنوان سیستم‌های یک درجه آزادی (SDOF^۱) مدل‌سازی شده و بار انفجار با استفاده از فشار بیشینه و بازتاب یافته و ضربه منعکس شده به سازه یک درجه آزادی وارد می‌شود. به طوری که هر دو فشار بیشینه مبنای انفجار و بازتاب با استفاده از نمودارهای تجربی ارائه شده در آیین‌نامه انفجار UFC-3-340-02 به دست می‌آید. علاوه بر این، در نمودارهای ارائه شده در این آیین‌نامه، فرض بر کروی بودن ماده منفجره (انفجار در هوا) یا نیم‌کره بودن آن انفجار (انفجار بر روی سطح زمین) لحاظ می‌شود و تغییرات در شکل ماده منفجره، جهت شارژ و نقطه انفجار درون بار را در نظر نمی‌گیرند [۴]. مدل‌سازی انفجار به دلیل تهدیدات ناشی از حمله تروریستی ضروری است. امروزه استفاده از تکنولوژی جدید باعث شده است که شبیه‌سازی رایانه‌ای ارزان‌تر از آزمایش‌های تجربی باشد. تاکنون تحقیقات عددی و آزمایشگاهی متعددی توسط محققین برای یافتن تاثیر انفجار بر سازه‌های بتنی انجام شده است. جلال و همکاران^{۱۲} [۵] به بررسی تحلیل خرابی پیش‌رونده ساختمان کامپوزیت فولادی-بتنی سه بعدی تحت اثر بار انفجار شدید با شبیه‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS پرداختند. در این تحقیق با استفاده از آنالیز سه مرحله‌ای، ابتدا در مرحله اول تعدادی از ستون‌هایی که احتمالاً در اثر فروریزش تدریجی حذف می‌شوند، نادیده در نظر گرفته شد و آنالیز فروریزش کل ساختمان در مرحله دوم انجام گردید. در نهایت نتایج با استفاده از آنالیز دینامیکی غیرخطی با روش بار جایگزین، مقایسه شده است. همچنین در این تحقیق مدل‌سازی‌های عددی با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی اعتبارسنجی شده است. در تحقیق دیگری که توسط ابراهیم و همکاران^۳ [۶] انجام گردید به بررسی عددی قاب بتن مسلح شش طبقه به روش اجزا محدود سه بعدی پرداخته شد. مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS انجام و پاسخ سازه تحت بارهای انفجار بررسی گردید. ساختمان در نظر گرفته شده یک ساختمان اداری است که برای بارهای مرده، زنده، باد و زلزله طراحی شده است. برای مدل‌سازی عناصر بتنی از مدل پلاستیسیته غیرخطی بتن استفاده شده است. نتایج نشان داد هنگامی که هدف طراحی، سازه مقاوم در برابر انفجار باشد، طراحی سازه برای مقاومت در برابر بارهای جانبی مانند باد یا زلزله می‌تواند نتایج رضایت بخشی را در برداشته باشد. با این حال، این طراحی ممکن است برای مقاومت در برابر انفجار با بار زیاد مواد منفجره در فاصله کوچک کافی نباشد. در

4 Abedini et.al.
5 Scale Distance
6 Stand of Distance
7 Abladey & Braima
8 Nourzadeh
9 Dua et.al.
10 Contact Explosion
11 Stiffened plates

1 Single Degree of freedom
2 Galal et.al.
3 Ebrahim et.al.

در نهایت، فواصل حفاظتی ایمن، برای مقادیر ماده منفجره ۳۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم TNT به ترتیب برابر با ۴/۵، ۹/۵، ۱۲ و ۱۴ متر گزارش شده است.

۲- بیان مسئله

امروزه با شدت یافتن حوادث تروریستی در سراسر جهان و همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های انفجار مانند میزان خرج، فاصله انفجار از سازه و نوع ماده منفجره، طراحی اعضای سازه‌ای برای یک انفجار خاص محافظه کارانه به نظر نمی‌رسد. بنابراین رفتار کلی سازه در مقابل شدت‌های مختلف و فاصله‌های انفجار مختلف باید بررسی گردد. با توجه به اینکه کارهای انجام شده در خصوص ارزیابی سازه‌ها تحت اثر بار انفجار به روش افزایشی فقط بر روی سازه‌های قرار گرفته در زیر آب انجام شده است، لذا هدف از این مطالعه، ارزیابی عملکرد یک ستون بتن مسلح در برابر انفجار بر روی زمین با استفاده از روش تحلیل انفجاری افزایشی است. برای این منظور ابتدا یک سازه یک طبقه بتن مسلح به ابعاد 15×20 (دو دهانه $7/5$ متری در جهت X و سه دهانه ۵ متری در جهت Y) برای بارهای مرده، زنده و زلزله بر اساس مجموعه مقررات ملی ایران طراحی می‌شود. سپس ابعاد ستون به دست آمده در نرم‌افزار AUTODYN برای شبیه‌سازی انفجار استفاده می‌شود. تاکنون بیشترین تعداد انفجار ناشی از حملات تروریستی در دهه اخیر براساس تحلیل ریسک در سه فاصله ۵، ۱۰ و ۱۵ متری انجام شده است [۱۶]. با ثابت در نظر گرفتن فاصله سرد و افزایش مقدار ماده منفجره به صورت نموی می‌توان تخمین دقیق محدوده کامل پاسخ سازه (از مرحله الاستیک تا حد تسلیم و سپس مرحله غیرخطی و در نهایت ناپایداری کلی سازه) با انجام یک سری تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی برای بارگذاری انفجار در هیدروکود اتوداین انجام شود. در واقع یک سری تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی برای بارگذاری انفجار که هر بارگذاری به چندین سطح شدت مقیاس شده است و به صورت گام به گام به سازه اعمال می‌شود. در مرحله‌ی بعد نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها پردازش شده و منحنی‌های IEA و منحنی‌های شکنندگی ترسیم می‌شود. در پایان منحنی‌های فشار-ضربه برای جابه‌جایی‌های مشخص آیین‌نامه به دست می‌آید. این اطلاعات ارزشمند کم هزینه‌تر از روش‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی سازه در برابر بار انفجار می‌باشند.

۲-۱- روش تحلیل انفجاری نموی

در حالی که ساختمان‌ها معمولاً برای مقاومت در برابر زلزله با استفاده

در حقیقت این روش از تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA^۱) که یک روش آنالیز پارامتری شناخته شده در زمینه مهندسی زلزله است، الهام گرفته شده است [۱۳]. در این تحقیق با استفاده از روش IEA^۲ به بررسی انفجار در زیر آب (UNDEX)^۳ به منظور برآورد پاسخ پوسته‌ها در حالت‌های مختلف و ارزیابی عملکرد آن‌ها، با توجه به عدم قطعیت‌های شرایط بارگذاری، پرداخته شده است. حالت‌های حدی بر اساس آیین‌نامه UFC-3-340-02 برای محاسبه عملکرد تعریف شده است. فاصله‌های مختلف انفجار تا سازه و پارامتر عمق آب به صورت ترکیبی به عنوان شرایط بارگذاری در نظر گرفته شده است. شدت بار انفجاری در چندین سطح مشخص شده و مقیاس‌بندی می‌شود تا سازه را در طیف وسیعی از رفتار خود بررسی نماید. نتایج به صورت اندازه‌گیری آسیب (DM^۴) در مقابل اندازه‌گیری شدت انتخاب شده (IM^۵) ترسیم شده است. در مرحله بعد با استفاده از بررسی‌های آماری منحنی‌های چنک IEA برای جمع‌بندی نتایج به دست آمده و سرانجام، منحنی شکنندگی به عنوان شاخص‌های احتمال آسیب پوسته در بارگذاری انفجار زیر آب استخراج می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که IEA یک روش مفید برای ارزیابی مبتنی بر عملکرد پوسته‌های استوانه‌ای است که در معرض بارگذاری انفجار در زیر آب می‌باشد. همچنین خان و همکاران [۱۴] به بررسی تاثیر شکل سازه به روی عملکرد سازه در مقابل بار انفجار با استفاده از تولید منحنی شکنندگی از روش استاتیک غیرخطی پرداختند. در این تحقیق سه سازه با شکل‌های مستطیل، هرم، و نیم‌دایره در مقابل انفجارهای زمینی و هوایی در فاصله‌های مشخص ۵ و ۱۵ متر مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این تحقیق گزارش شده است برخورد موج انفجار با گوشه یک ساختمان به دلیل کاهش بار انفجار از اهمیت کمتری برخوردار است، همچنین ساختمان هرمی کمترین احتمال خرابی را دارد، یعنی در مقاومت در برابر انفجار نسبت به ساختمان‌های نیم‌دایره و منظم کارآمدتر است. عهدیان فرد و ملک پور [۱۵] با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به بارگذاری انفجار، احتمال خرابی ستون‌های فولادی تحت اثر انفجارهای مختلف و حداقل فاصله حفاظتی مورد نیاز برای جلوگیری از خسارت قابل توجه به سازه را مورد بررسی قرار دادند. جهت تحلیل سازه از روش یک درجه آزادی معادل و شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده شده است.

- 1 Incremental Dynamic Analysis
- 2 Incremental Explosive Analysis
- 3 Under Water Explosion
- 4 Damage Measure
- 5 Intensity Measure
- 6 Khan et al.

سازه، نحوه بارگذاری انفجار و در نظر گرفتن رفتار مصالح غیرخطی و اثر نرخ کرنش مصالح در انفجار در تعیین پاسخ احتمالی مدل سازه‌ای مورد بررسی، بسیار موثر است. همچنین به منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده از تحلیل عددی، صحت‌سنجی بایستی انجام پذیرد. در گام بعد پاسخ سازه‌ها به بار انفجار باید برای شدت‌های متفاوت از طریق تحلیل دینامیکی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های انفجار تعیین شود. دو شاخص اصلی مورد نیاز برای این فرایند شامل معیار شدت و معیار خسارت مهندسی است. انتخاب پارامترهای مناسب برای (IM) و (DM) در تحلیل IEA بسیار مهم است به گونه‌ای که با انتخاب مناسب (IM) بتوان ارزیابی دقیق‌تری در عملکرد لرزه‌ای انفجار سازه‌ها داشت. این پارامتر برای انتخاب یک شدت انفجار مناسب باید مقیاس پذیر باشند. پارامتر شدت (IM) با استفاده از یک الگوریتم مناسب به عنوان نماینده شدت انفجار به منظور به دست آوردن پاسخ الاستیک تا خرابی سازه مقیاس‌بندی می‌شود [۱۲ و ۱۱]. برای این منظور ابتدا لازم است یک شاخص به عنوان نماینده شدت انفجار تعریف شود. در انفجار دو شاخص مقدار ماده منفجره و فاصله سرد نقش مهمی در شدت انفجار و در تعیین شاخص‌های انفجار مانند فشار بازتاب، ضربه بازتاب، مدت زمان فاز مثبت دارند. این دو شاخص مبتنی بر یک رابطه تجربی مشهور به نام فاصله مقیاس به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1)$$

به طوری که W ، وزن ماده منفجره در واحد کیلوگرم و R فاصله مرکز انفجار تا سازه (فاصله سرد) بر حسب متر است که از مرکز خرج کروی تا سازه اندازه‌گیری می‌شود. در این مطالعه معکوس فاصله مقیاس شده به منظور بررسی شدت از کم به زیاد به عنوان پارامتر اندازه‌گیری شدت بر اساس رابطه (۲) انتخاب می‌شود:

$$IM = \frac{1}{Z} = \frac{\sqrt[3]{W}}{R} \quad (2)$$

شاخص شدت انتخاب شده ارتباط خوبی بین عدم قطعیت‌های احتمالی برای مقدار ماده منفجره و فاصله سرد و همچنین پاسخ سازه دارد. به عنوان مثال با ثابت در نظر گرفتن فاصله‌های مختلف و افزایش مقدار ماده منفجره طیفی وسیعی از پاسخ سازه با توجه به مقادیر آسیب (DM) در نظر گرفته

از تحلیل الاستیک (رفتار خطی مصالح) طراحی می‌شوند، اکثر آن‌ها تحت زمین لرزه‌های بزرگ تغییر شکل‌های قابل توجهی را تجربه می‌کنند. افزایش سرعت و دقت رایانه‌ها باعث شده است که یک حرکت رو به پیشرفت مداوم به سمت روش‌های تحلیل دقیق و در عین حال پیچیده‌تر سازه‌ها انجام شود. بنابراین، وضعیت تحلیل سازه‌ها به تدریج از تحلیل استاتیکی خطی به تحلیل دینامیکی خطی، استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی ارتقا یافته است [۱۲].

امروزه، پاسخ غیرخطی سازه‌ها در معرض مجموعه حرکات زمین لرزه ناشی از زلزله با یک رویکرد نسبتاً جدید تحلیلی دینامیکی افزاینده (IDA) قابل پیش‌بینی است [۱۳]. این روش به طور گسترده‌ای برای ارزیابی لرزه‌ای از پاسخ غیرخطی سازه‌های در معرض مجموعه حرکت شدید زمین (بار زلزله) استفاده می‌شود. IDA یکی از روش‌های شبیه‌سازی بررسی آسیب‌پذیری سازه‌ای برای زلزله‌های مختلف با شدت‌های متفاوت است. در واقع IDA یک روش تحلیل پارامتری است که به طور گسترده در ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌های مختلف بر اساس عملکرد به کار گرفته می‌شود. مدل یک سازه در روش IDA در معرض رکوردهای مختلف زلزله قرار می‌گیرد که هر کدام به شدت‌های مختلفی (از شدت کم به زیاد) مقیاس شده‌اند. مزیت اجرای روش IDA، توانایی ارزیابی پاسخ‌های سازه در کل دامنه شدت زلزله مورد بررسی با در نظر گرفتن عدم قطعیت سوابق احتمالی زلزله در آینده است. تاکنون تحقیقات فراوانی بر اساس روش IDA برای سازه‌های مختلف در برابر بار زلزله و همچنین بار باد (IWWA^۱) ارائه شده است [۱۴]. روش تحلیل انفجاری نموی نیز بر اساس روش IDA به منظور تعیین سطح عملکرد سازه در برابر انفجار، تخمین دقیق محدوده کامل پاسخ سازه (از مرحله الاستیک تا حد تسلیم و سپس مرحله غیرخطی و در نهایت ناپایداری کلی سازه) با انجام یک سری تحلیل دینامیکی غیرخطی برای بارگذاری انفجار انجام می‌شود. برای استفاده از این روش به صورت عددی^۲ باید مراحل مدل‌سازی عددی و اعتبارسنجی، انتخاب معیار شدت مناسب (IM)^۳ و معیار خسارت (DM)^۴ انفجار، ترسیم و خلاصه‌سازی منحنی‌های IEA و در ادامه ترسیم منحنی‌های شکنندگی در نظر گرفته شود. مدل‌سازی و صحت‌سنجی در اولین مرحله از اهمیت بالایی برخوردار است. زیرا پاسخ نهایی به مقدار زیادی به این مرحله بستگی دارد. مدل‌سازی

- 1 Incremental Wind Wave Analysis
- 2 Numerical Analysis
- 3 Intensity Measure
- 4 Damage Measure

جدول ۱. مقادیر حالات حدی بیشینه انحراف تکیه‌گاه

Table 1. Maximum support rotation for each limit state

حالات حدی ^۱	آسیب سطحی، (درجه) و ۱۸	آسیب متوسط، (درجه) و ۱۸	آسیب شدید، (درجه)
	[۱۷]	[۱۷]	[۱۹]
	LS-1	LS-2	LS-3
ستون تحت بار محوری و لنگر خمشی	۱°	۲°	۴°

^۱Limit State

که در این فرمول LS حالت حدی، IM پارامتر شدت و y شرط تحقق انفجار با یک شدت مشخص است. این منحنی کمک می‌کند تا احتمال فراگذشت سازه از یک حد معین خاص مانند وضعیت حد مجاز آیین‌نامه به دست آید. به طور خلاصه ارزیابی عملکرد در سه مرحله در رابطه (۴) به صورت انتگرال سه گانه زیر خلاصه می‌شوند [۲۰]:

$$\int_{im} \int_{dm} \int_{edp} G(dv / dm) dG(dm / edp) dG(edp / IM) / |d\lambda(IM)| \quad (۴)$$

که در این انتگرال dv ، dm ، edp و IM به ترتیب خسارت، خرابی، پاسخ و شدت و $G(dv / dm)$ تابع توزیع خسارت به شرط خرابی، $G(dm / edp)$ تابع توزیع خرابی به شرط پاسخ و $G(edp / IM)$ تابع توزیع پاسخ به شرط شدت را نشان می‌دهد. جواب انتگرال تابع توزیع پاسخ به شرط شدت با رابطه (۵) مشخص می‌شود:

$$F(x) = \phi \left[\frac{1}{\sigma_y} \ln \left(\frac{x}{m_x} \right) \right] \quad (۵)$$

که در آن $F(x)$ پارامتر تقاضا (تابع چگالی احتمال)، ϕ تابع توزیع نرمال استاندارد، m_x میانه متغییر تصادفی و σ_y انحراف معیار $\ln(x)$ است. بنابراین برای تولید یک منحنی شکنندگی، فرض می‌شود تابع توزیع نرمال استاندارد دارد و تنها به دو پارامتر میانه و انحراف معیار نیاز است. با توجه به اینکه داده‌های IEA نیز از توزیع نرمال پیروی می‌کنند می‌توان از روابط بالا برای به دست آوردن فراگذشت پاسخ سازه از حالات حدی

شده در پایان هر تحلیل (تاریخچه زمانی) محاسبه می‌شود. پس از آن، منحنی پاسخ (منحنی IEA) با نمایش خسارت (DM) در برابر شدت (IM) برای هر انفجار مقیاس شده، به دست می‌آید. شاخص خسارت انفجار (DM) باید بر اساس حالت‌های حدی در آیین‌نامه در نظر گرفته شوند. بر اساس آیین‌نامه انفجار ASCE دو پارامتر بیشینه انحراف تکیه‌گاهی و نسبت شکل‌پذیری برای اعضای سازه‌ای و برای قاب‌ها تغییر مکان نسبی و حداکثر تغییر زاویه تکیه‌گاهی می‌تواند به عنوان شاخص خسارت به کار رود. در این مطالعه برای یک ستون بتن مسلح، DM بیشینه انحراف تکیه‌گاه انتخاب شده است.

همچنین مقادیر بیشینه انحراف تکیه‌گاه برای حالت‌های خرابی سطحی و متوسط بر اساس آیین‌نامه ASCE/SEI 59-11 و حالت خرابی شدید بر اساس مبحث ۲۱ از مجموعه مقررات ملی ایران در جدول ۱ ارائه شده است [۱۷-۱۹].

بعد از ترسیم منحنی‌های IEA نیاز به خلاصه کردن آن‌ها می‌باشد. برای این منظور صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۰ به منظور خلاصه‌سازی منحنی IEA ترسیم می‌شود. پس از انجام آنالیزهای اولیه و دستیابی به منحنی‌های خلاصه شده، منحنی‌های شکنندگی را می‌توان استخراج نمود. با استفاده از منحنی‌های شکنندگی می‌توان به احتمال دستیابی یا فراتر رفتن از یک حالت حدی خسارت خاص تحت شدت بار انفجار یا فاصله مقیاس شده مشخص دست یافت. معادله کلی برای ترسیم منحنی شکنندگی بر اساس احتمال شرطی برای بار انفجار به صورت رابطه (۳) می‌باشد [۱۱]:

$$Fragility = P[LS / IM = y], \quad (۳)$$

استفاده نمود.

و سرعت به صورت یک کمیت برداری به محیط سه بعدی منتقل می‌شود [۲۱]. هیدروکد^۴ AUTODYN با استفاده از تکنیک نگاشت و داشتن طیف وسیعی از خصوصیات مواد و با بهره گیری از روش‌های تفاضل محدود، حجم محدود و المان محدود و استفاده از آنالیز دینامیکی غیرخطی بار ضربه و انفجار دارای قابلیت حل طیف گسترده‌ای از مسائل غیرخطی در دینامیک جامدات، سیالات و محیط گازی می‌باشد. در هیدروکد اتوداین با استفاده از حل سه معادله پایداری بقای جرم، تکانه و انرژی^۵ پاسخ سازه در اثر برخورد انفجار به دست می‌آید. روابط (۶) تا (۸) به ترتیب معادلات پایداری جرم، تکانه و انرژی را نشان می‌دهد. همچنین هیدروکد اتوداین کاربر را ملزم می‌کند که خصوصیات ماده و معادلات حالت ماده (EOS^۶) را برای حل معادلات پایداری در نظر بگیرد. به بیان دیگر به منظور محاسبات تغییرات (پرش) در فشار، سرعت و چگالی در اثر حرکت جبهه موج شوک تولید شده از انفجار در یک نقطه به حل معادلات پرش رنکینگ-هگونیوت^۷ که مبتنی بر روابط قوانین پایستگی می‌باشد، نیاز است. برای حل این معادلات به پنج متغیر نیاز می‌باشد. از آنجا که تعداد معادلات موجود (سه معادله پایداری) از تعداد مجهولات کمتر است، برای حل مسئله به دو معادله دیگر نیاز است. معادله چهارم همان معادله‌ی حالت ماده می‌باشد (EOS) که نشان دهنده رفتار ماده (گاز یا جامد) در شبیه‌سازی انفجار است. معادلات حالت، رابطه فشار، P را با چگالی، ρ و انرژی کل، E از مواد مرتبط می‌کند. معادله پنجم مقدار معلوم یکی از متغیرها است [۲۳ و ۲۲].

۳- روش حل عددی

اثر انفجار بر روی سازه‌ها با بسیاری از پدیده‌های غیرخطی پیچیده مانند اثر متقابل^۱ مرز جامد سازه و محیط هوا، سرعت بارگذاری بسیار زیاد انفجار، اثرات نرخ کرنش^۲ بر رفتار مواد و تغییر شکل‌های بزرگ همراه است. بارگذاری انفجار و به دست آوردن پاسخ سازه می‌تواند با روش‌های عددی مختلفی مانند روش بالن، استفاده از نمودار فشار-زمان به صورت اجزا محدود، شبیه‌سازی سه بعدی اویلری لاگرانژی و یا استفاده از تکنولوژی نگاشت در شبیه‌سازی اویلری-لاگرانژی انجام پذیرد. شبیه‌سازی اجزا محدود یا حجم محدود برای مدل‌سازی کوپل اویلری-لاگرانژی انفجار به صورت جامد یا گاز نیازمند المان‌بندی دقیق با ابعاد ریز برای انفجار و سازه‌ی در تماس با انفجار است. سازه‌ها ممکن است از منبع مواد منفجره فاصله داشته باشند و این اغلب منجر به ایجاد شبکه‌های بسیار بزرگ با المان‌های زیاد می‌شود. از طرف دیگر، گزینه بزرگ بودن المان‌های محیط اویلری به نتایج دقیقی منجر نمی‌شود. برای غلبه بر این مشکل راهکارهای متفاوتی وجود دارد. روش اول استفاده از تابع فشار-زمان است. استفاده از یک تابع فشار زمان بر روی سازه‌ها باعث کاهش هزینه‌های محاسباتی و افزایش سرعت می‌شود. اما اغلب به خصوص هنگام بررسی بازتاب موج انفجار کاربرد ندارد. روش دوم، استفاده از مدل بالن فشرده می‌باشد که در بعضی از موارد جواب نسبتاً خوبی حاصل می‌شود. برای این منظور یک بالن تحت فشار زیاد، استفاده می‌شود که با آزاد شدن فشار، موج فشاری تولید می‌شود که به نوعی شبیه به موج انفجار است. روش سوم، استفاده از یک مدل سه بعدی بزرگ و استفاده از معادلات حالت JWL^۳ می‌باشد. برای به دست آوردن جواب دقیق و کم هزینه در این روش، استفاده از المان‌های کوچک‌تر به بزرگ‌تر می‌باشد که در محاسبات بایستی مدنظر قرار گیرد. زیرا با دورتر شدن فاصله انفجار، فشار انفجار کاهش می‌یابد و استفاده از مش‌های ریز فقط حجم محاسبات را افزایش می‌دهد. علاوه بر روش‌های ذکر شده، نگاشت انفجار می‌تواند به عنوان یک روش بسیار کلی‌تر دیده شود. هنگامی که فشار به سطح اول بازتاب می‌رسد، یک شبیه‌سازی انفجار در مدل یک بعدی می‌تواند به صورت سه بعدی نگاشت شود. در واقع با استفاده از تکنیک نگاشت، فشار و چگالی ماده در محیط اویلری به صورت یک کمیت اسکالر

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot v) = 0 \quad (۶)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u v) + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) + \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w v) + \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (۷)$$

4 Hydrocode
5 Conservation Equation: mass, momentum and energy
6 Equations of state
7 Rankine-Hugoniot Jump Equation

1 Interaction
2 Strain Rate
3 Jones-Wilkins-Lee

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho'}{\rho_0} E'' \quad (11)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot ((E + P)v) = 0 \quad (8)$$

در AUTODYN، یک معادله حالت گاز ایده آل برای تعریف دامنه هوای اطراف ستون بتنی به صورت اویلری می‌تواند مستقیماً با استفاده از معادله بالا و جایگزاری مقادیر E'' و γ مشخص شود. که در آن E'' انرژی ویژه برای هوای استاندارد ($\frac{kJ}{m^3}$)، ۲۵۳.۵، γ نسبت فشار ثابت به گرمای ویژه حجم ثابت (برابر ۱/۴ برای هوا) است.

۳-۲- معادله حالت JWL

معادله حالت جونز-والکینز-لی، (JWL) با دقت می‌تواند حالت محصولات انفجار در بسیاری از مواد منفجره را توصیف کند. معادله حالت JWL یک معادله حالت استاندارد برای توصیف فشار، حجم و انرژی مواد منفجره است که در بسیاری از هیدروکدها مورد استفاده قرار گرفته است. معادله حالت JWL، یک رابطه تجربی است. این رابطه توسط لی به صورت رابطه (۱۲) بیان شده است [۲۳ و ۲۲]:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v'}\right) e^{-R_1 v'} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v'}\right) e^{-R_2 v'} + \frac{\omega E'''}{v'} \quad (12)$$

که در آن P فشار انفجار v' حجم مخصوص محصولات انفجار در یک حجم واکنش نداده انفجار، E''' انرژی مخصوص داخلی است. همچنین پارامترهای A, B, R_1, R_2, ω ثابت‌های این معادله حالت بوده و از مشخصات ماده منفجره است. ثابت‌های معادله JWL برای مواد منفجره TNT مورد استفاده در این مطالعه از کتابخانه نرم‌افزار برداشت شده که در جدول ۲ بیان شده است. همچنین شعاع خرج کروی شکل R_E با داشتن چگالی ماده منفجره ρ_0''' و وزن ماده منفجره W برای انفجار یک بعدی در محیط اویلری از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$R_E = \sqrt[3]{\frac{3 \times W}{4 \times \pi \times \rho_0'''}} \quad (13)$$

در این روابط ρ چگالی، v سرعت، P فشار، u, v, w اجزا سرعت در جهت‌های x, y و z در مختصات کارتزین و E انرژی کل در واحد حجم که از رابطه (۹) به دست می‌آید که در این رابطه e_1 بیانگر انرژی داخلی ویژه است.

$$E = \rho(e_1 + \frac{\|v\|^2}{2}) \quad (9)$$

۳-۱- معادله حالت هوا

برخلاف انفجارهای هسته‌ای که هوای اطراف مواد منفجره و محصولات انفجار در دمای بسیار بالا گرم می‌شود (۱۰۰۰۰۰۰ کیلو کالری)، انفجارهای شیمیایی معمولاً فقط هوای اطراف را به درجه حرارت بسیار پایین‌تر (۳۰۰۰ کیلو کالری) گرم می‌کنند و از این رو تفکیک مولکول‌های O_2 و N_2 در هوا رخ نمی‌دهد. بنابراین مرسوم است که آنالیز عددی برای رفتار هوای اطراف یک انفجار شیمیایی به عنوان یک گاز ایده آل با یک نسبت حرارت ثابت در نظر گرفته شود. معادله حالت پلی تروپیک^۱ یک معادله حالت عمومی با تغییر خطی در انرژی داخلی است و توسط وودرف^۲ در رابطه (۱۰) ارائه شده است [۲۴]:

$$P = C_0 + \mu C_1 + \mu^2 C_2 + \mu^3 C_3 + E(C_4 + \mu C_5 + \mu^2 C_6) \quad (10)$$

که در آن $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ ثابت هستند و $\mu = \frac{\rho'}{\rho_0'} - 1$ ، که ρ' چگالی فعلی و ρ_0' چگالی اولیه هوا برابر با $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6$ است. با قرار دادن $1.225 \times 10^{-7} \frac{g}{cm^3}$ برابر با صفر و $C_4 = C_5$ برابر با $\gamma - 1$ می‌توان از معادله حالت پلی تروپیک برای نشان دادن یک معادله حالت گاز ایده آل استفاده کرد. با جایگذاری این مقادیر، معادله حالت برای گاز ایده آل به صورت رابطه (۱۱) می‌باشد:

1 Polytropic Equation of State
2 Woodruff

جدول ۲. ثابت‌های معادله JWL

Table 2. JWL Equation's Constants

ماده منفجره	ρ_0^m (g/cm^3)	ω	R_2	R_1	B (GPa)	A (GPa)
TNT	۱/۶۳	۰/۳۵	۰/۹	۴/۱۵	۳/۷۴	۳۷۳/۷

در این رابطه σ تنش جریان، ϵ_p کرنش پلاستیک، $\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0}$ نرخ کرنش پلاستیک نرمال، T دما، T_{melt} دمای ذوب ماده و T_{room} دمای محیط است. ضرایب m ، n ، B' ، C' ، A' ثابت‌های ماده می‌باشند. پارامتر C' نشان دهنده وابستگی به نرخ کرنش است. این ضرایب به صورت تجربی در آزمایش تست فشار میله هاپکینسون^۲ (یا تست کشش میله هاپکینسون) به دست می‌آید [۲۷]. ضریب m از انجام آزمایش در دماهای مختلف محاسبه می‌شود. ثابت‌های معادله جانسون-کوک در جدول ۳ بیان شده است.

۳-۲-۳ مدل مقاومت RHT-Concrete

مدل رفتاری RHT به طور گسترده‌ای برای به دست آوردن پاسخ دینامیکی سازه‌های بتنی تحت بارهای ضربه‌ای و بارگذاری انفجار مورد استفاده قرار می‌گیرد. توسعه این مدل برای بتن به منظور استفاده در هیدروکدها در سال ۱۹۹۷ توسط ریدل، هیرمایر و توما^۳ آغاز شد. در آن زمان دانش قابل توجهی در مورد جنبه‌های مختلف رفتار مکانیکی بتن در دسترس بود. با این حال یک مدل کلی برای بررسی رفتار بتن در مقابل موج شوک در استفاده در هیدروکدها وجود نداشت. مدل‌های کلاسیک مهندسی عمران، تنش واقع در یک سطح را برای خرابی عمدتاً تحت بارهای یک محوره و یا دو محوره نشان می‌دهند. با این وجود، حالت‌های بررسی تنش سه محوری در هیدروکدها برای روش المان محدود تحت بارهای دینامیکی لازم بود. مدل مواد RHT برای توصیف رفتار بتن در معرض فشارهای زیاد، سرعت کرنش زیاد و شرایط تنش پیچیده مناسب است. سه سطح محدود وابسته به فشار سطح گسیختگی^۴، سطح الاستیک^۵ و سطح مقاومت پسماند^۶ در

۳-۳-۳ مدل مواد

طراحی سازه‌ها برای مقاومت در برابر اثرات انفجار نیاز به دانش و درک خواص دینامیکی مواد دارد. مواد به بارهای دینامیکی تولید شده توسط انفجار نسبت به بارهای معمولی استاتیکی به دلیل سرعت بارگذاری واکنش نشان می‌دهند و یک افزایش مقاومت حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد مقاومت اولیه را تجربه می‌کنند. سازه‌های تحت بار انفجار به طور معمول مجاز به تغییر شکل پلاستیک (دائمی) برای جذب انرژی انفجار هستند. در حالی که در پاسخ به بارهای متداول استاتیکی معمولاً لازم است تا در محدوده الاستیک باقی بماند. بارهای متعارف مانند بارهای باد و زنده نسبتاً آهسته روی سازه اعمال می‌شوند. اما سازه‌های در معرض بار انفجار بار به سرعت به سازه اعمال شده و در پی آن افزایش سریع تنش در مدت زمان کوتاهی (میلی ثانیه) اتفاق می‌افتد. بنابراین پیش‌بینی پاسخ دینامیکی مواد نسبت به بار انفجار نیازمند تعریف دقیق مدل رفتاری ماده است.

۳-۳-۱ مدل مقاومت جانسون کوک

در این مطالعه مدل مقاومت جانسون-کوک برای بررسی تنش دینامیکی در آرماتورها انتخاب شده است. معادله جانسون-کوک تنش جریان را به صورت تابعی وابسته به نرخ کرنش^۱ و دما بر اساس رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) بیان می‌کند [۲۶ و ۲۵]:

$$\sigma = [A' + B' \epsilon_p^n] [1 + C' \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0}] (1 - T^*)^m \quad (14)$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (15)$$

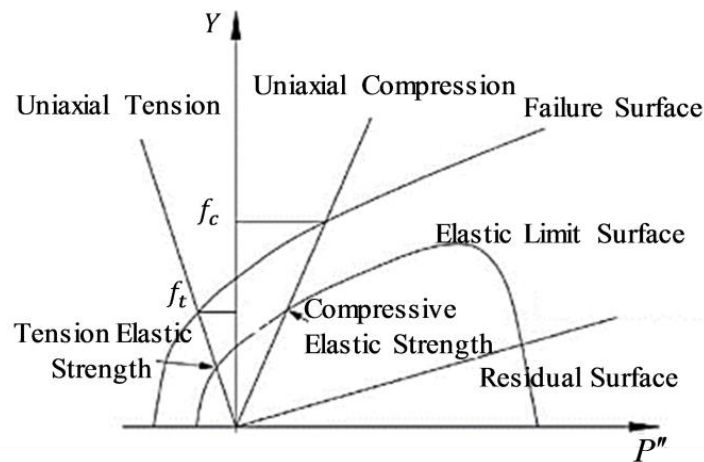
- 2 Hopkinson Pressure bart test
- 3 Riedel-Hiermaier-Thoma
- 4 Failure surface
- 5 Elastic surface
- 6 residual surface

1 Strain-rate

جدول ۳. ثابت‌های معادله جانسون-کوک [۲۷]

Table 3. Johnson-Cook equation's parameters [27]

A' (MPa)	B' (MPa)	C'	m	n	T (K)
۴۴۸	۷۸۲	۰/۰۲۴۷	۱/۰۳	۰/۵۶	۱۷۹۳



شکل ۱. سطوح حدی در مدل RHT [۲۹]

Fig. 1. Limited-surfaces of RHT model [29]

به طوری که f_c ، مقاومت فشاری تک محوری است، A ، ثابت سطح شکست و N ، توان سطح شکست است. P_{spall}^* مقاومت شکست نرمال شده ($P_{spall}^* = p^* \left(\frac{f_t}{f_c}\right)$) که در آن f_t مقاومت کششی محوری است. همچنین در رابطه (۱۶)، $r_3(\theta)$ تابعی از تغییر ناپذیرهای دوم و سوم و ψ نسبت نصف النهار بر اساس روابط (۱۸) تا (۲۰) محاسبه می‌شوند. که در این روابط J_2 و J_3 دومین و سومین تغییر ناپذیرهای تانسور تنش انحرافی هستند. همچنین Q نسبت نصف النهار کششی به فشاری و B ثابت ماده بتن می‌باشد. $F_{rate}(\dot{\epsilon})$ فاکتور سخت شونگی کرنش است و با دو شرط مختلف برای فشار و کشش در رابطه (۲۱) ارائه شده است. که در آن P'' فشار هیدرواستاتیکی α توان نرخ کرنش فشاری و δ توان نرخ کرنش کششی و $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنش اولیه است. در جدول ۴ مقادیر در نظر گرفته شده برای مدل رفتاری RHT برای بتن در مسئله مورد بررسی با مقاومت

مدل RHT وجود دارد. شکل ۱، همچنین سخت شونگی فشاری^۱، سخت شونگی کرنشی^۲ و مسیر بارگذاری را در نظر می‌گیرد [۲۸]. اولین سطح محدود، سطح گسیختگی Y_{fall} است که فشار موثر p^* ، زاویه بارگذاری θ و نرخ کرنش $\dot{\epsilon}$ را بر اساس روابط (۱۶) و (۱۷) در نظر می‌گیرد [۲۹ و ۳۰].

$$Y_{fall} = (p^*, \theta, \dot{\epsilon}) = Y_c(p^*) \times r_3(\theta) \times F_{rate}(\dot{\epsilon}) \quad (16)$$

$$Y_c(p^*) = f_c \times \left[A \times \left(p^* - P_{spall}^* \times F_{rate}(\dot{\epsilon}) \right)^N \right] \quad (17)$$

- 1 Pressure Hardening
- 2 Strain Hardening

جدول ۴. پارامترهای مدل مقاومت RHT [۳۲ و ۳۱]

Table 4. Parameters of RHT strength Model [31, 32]

مقدار	واحد	نماد	عنوان
۴۲	MPa	f_c	مقاومت فشاری
۰/۱	-	$\left(\frac{f_t}{f_c}\right)$	مقاومت کششی نرمال شده
۱/۶	-	A	ثابت سطح شکست
۰/۶۱	-	N	توان سطح شکست
۰/۰۱۰۵	-	-	ضریب انتقال تردی به شکل پذیری
۲	-	-	نسبت مدول برشی کشسان به مدول برشی کشسان خمیری
۰/۷	-	-	نسبت مقاومت کشسان به مقاومت کششی
۱/۶	-	B	ثابت مقاومت شکستگی
$۱/۶۷e^{\gamma}$	kPa	-	مدول برشی
۰/۶۸۰۵	-	Q	نسبت نصف النهار کششی به فشاری
۰/۰۳۲	=	α	توان نرخ کرنش فشاری
۰/۰۳۶	=	δ	توان نرخ کرنش کششی

فشاری ۴۲ مگاپاسکال ارائه شده است [۳۲ و ۳۱].

۴- اعتبارسنجی مدل سازی عددی

به عنوان اولین و مهم‌ترین گام در حل مسائل عددی، اعتبارسنجی روش عددی از اهمیت بالایی برخوردار است. بهترین روش برای اعتبارسنجی، حل مسائل انفجار به روش عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی است. اغلب بررسی تاثیر انفجار بر سازه‌های با مقیاس واقعی با شدت انفجار زیاد به دلیل هزینه بالا و پرخطر بودن، توسط نیروهای نظامی انجام می‌پذیرد و نتایج در دسترس عموم قرار ندارد. به همین دلیل تحقیقات آزمایشگاهی در مقیاس‌های کوچک انجام شده و نتایج معدودی از آن‌ها در دسترس می‌باشند. لازم به ذکر است که هیچ تست انفجار بر روی سازه‌های بتن مسلح با اطلاعات کافی از جمله وزن بار و سطح پیش‌تنیدگی و غیره در ادبیات فنی یافت نمی‌شود. بیلوت و همکاران [۳۳] ستون وسط یک قاب بتنی در مقیاس $1/4$ در معرض $7/1$ کیلوگرم ماده نظامی منفجره $C4$ در فاصله سرد تقریبی ۱ متر مورد بررسی قرار دادند. میزان جابه‌جایی بیشینه ستون در این تحقیق ۱۲ میلی‌متر گزارش شده است. همچنین محققان بسیاری مانند، شی و همکاران [۳۴] و موتالیب و همکاران [۳۵] برای اعتبارسنجی نتایج خود، مدل سازی عددی ستون هدف در قاب آزمایش شده در مطالعه آزمایشگاهی بیلوت و همکاران با اعمال شرایط مرزی معادل به

$$r_3(\theta) = \frac{2(1-\psi^2)\cos\theta}{4((1-\psi^2))\cos^2\theta + (1-2\psi)^2} + \frac{(2\psi-1)\sqrt{4((1-\psi^2))\cos^2\theta + 5\psi^2 - 4\psi}}{4((1-\psi^2))\cos^2\theta + (1-2\psi)^2} \quad (18)$$

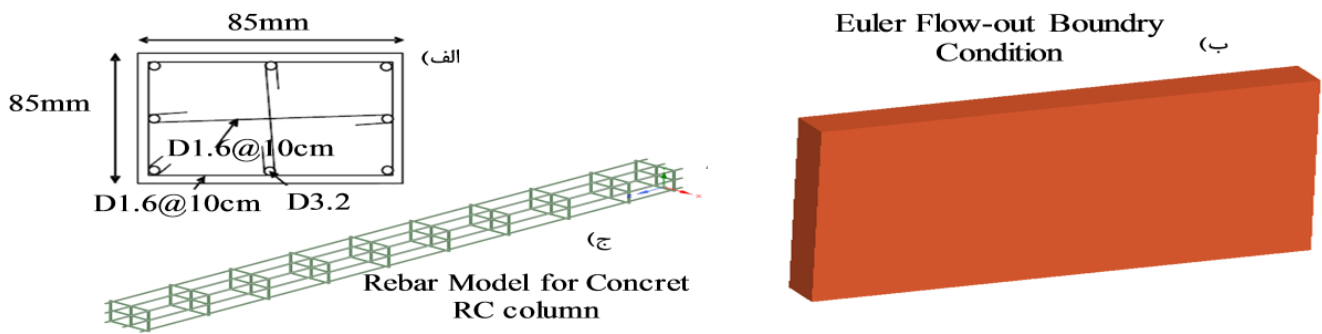
$$\cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{(J_2)^{\frac{3}{2}}} \quad (19)$$

$$\psi = \frac{r_t}{r_c} = Q + BQp^* \quad (20)$$

$$F_{rate}(\dot{\epsilon}) = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^\alpha & \text{for } P'' > 1/3f_c \quad \text{Compression,} \\ \dot{\epsilon}_0 = 30 \times 10^{-6} s^{-1} \\ \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^\delta & \text{for } P'' < 1/3f_t \quad \text{Tension,} \\ \dot{\epsilon}_0 = 30 \times 10^{-6} s^{-1} \end{cases} \quad (21)$$

1 Shi et.al

2 Mutalib et.al.

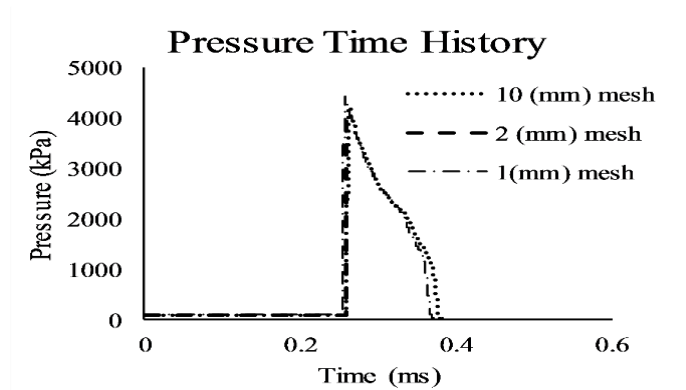


شکل ۲. الف) ابعاد مقطع ستون در آزمایش بیلوت و همکاران [۳۳] ب) شرایط مرزی Flow-out ج) مدل‌سازی میلگردها در مدل صحت‌سنجی

Fig. 2. a) Column's cross-section dimensions in the experiment of Baylot et al [33] b) Flow-out boundary condition c) Modeling of rebars in the model of validation

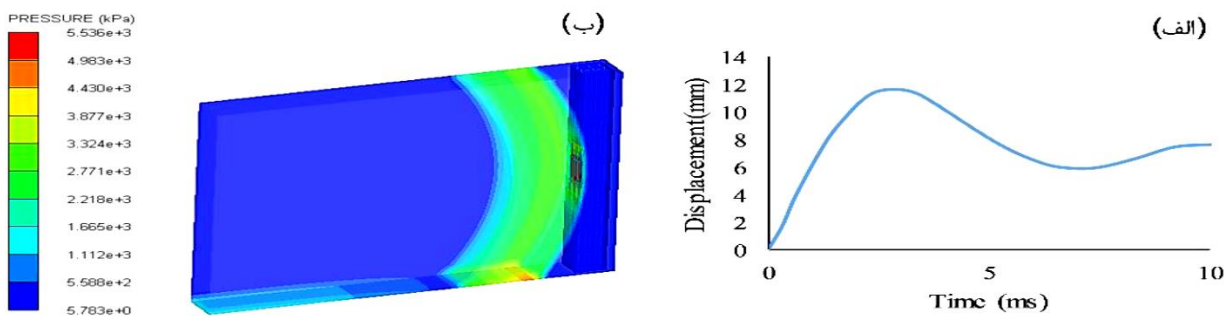
برای آرماتورها در این مطالعه برابر ۴۴۱ مگاپاسکال، از مدل مواد RHT-Concrete برای شبیه‌سازی رفتار پلاستیک ماده بتن با مقاومت فشاری ۴۲ مگاپاسکال استفاده می‌شود. این مدل ماده اثر نرخ کرنش نرم شدن و آسیب پس از خرابی را در نظر می‌گیرد. از مدل مواد با نام جانسون-کوک برای مدل‌سازی آرماتورهای طولی و عرضی استفاده می‌شود. این مدل ماده قابلیت تسلیم، سخت‌شدگی ایزوتروپیک و اثر نرخ کرنش را در نظر می‌گیرد. ثابت‌های معادله جانسون-کوک و RHT به ترتیب از جدول‌های ۳ و ۴ انتخاب شده‌اند. ستون بتن مسلح برای شبیه‌سازی آزمایش انفجار در نرم‌افزار AUTODYN مدل‌سازی می‌شود. برای بتن از المان ۸ گرهی (SOLID) و برای آرماتورهای فولادی از المان ۲ گرهی BEAM با ابعاد المان ۱۰ میلی‌متر استفاده می‌شود. پیوند و چسبندگی بین فولاد و بتن اطراف آن به صورت کامل (بدون لغزش) فرض می‌شود. لذا برای چسبندگی کامل المان‌های آرماتور طولی و عرضی در تماس با بتن برای عملکرد بهتر از الگوریتم تماس^۲ مبتنی بر body interaction تعریف شده است. برای حاصل شدن همگرایی آنالیز بایستی اندازه المان‌بندی کاهش یابد. به منظور المان‌بندی ستون از مش به اندازه ۵ میلی‌متر در مدل‌سازی استفاده می‌شود. برای شرایط مرزی، گره‌های پایین ستون گیردار فرض می‌شود در بالای ستون به جز جابه‌جایی درون صفحه، مابقی درجات آزادی تکیه‌گاهی مقید می‌باشند. برای اعمال بار انفجار به صورت کوپل اویلری-لاگرانژی به سازه، بار انفجار ابتدا به صورت یک بعدی برای ۸ کیلوگرم TNT (استفاده از

روش‌های مختلف از جمله همبستگی اویلری-لاگرانژی و لاگرانژی مورد بررسی قرار دادند. مانند این پژوهشگران در این تحقیق برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، ستون هدف آزمایش بیلوت و همکاران مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای انفجار ناشی ۷/۱ کیلوگرم C۴ با آیین‌نامه مقایسه شده است. همان‌طور که در ابتدا تشریح شد، شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN به صورت همبستگی اویلری-لاگرانژی بررسی می‌شود. زمانی که موج انفجاری از طریق محیطی مانند هوا منتشر می‌شود و به یک سطح جامد برخورد می‌کند، منعکس می‌شود و در نتیجه باعث برهم‌کنش ساختار سیال و انتقال انرژی از موج به سطح می‌شود. برای مدل‌سازی صحیح این رفتار، باید حل‌گرهای لاگرانژی و اویلری را به هم پیوند داد تا پاسخ‌های سیال و سازه را به دست آورد. در روش همبستگی اویلری-لاگرانژی، جرم، انرژی و تکانه از المان‌بندی اویلری به المان‌بندی لاگرانژی و بالعکس، به صورت شرایط مرزی منتقل می‌شود. AUTO-DYN بر اساس روش‌های عددی صریح^۱ است و به طور گسترده‌ای برای آنالیز مسائل مرتبط با پاسخ سازه با تغییر شکل‌های بزرگ مانند ضربه با سرعت بالا و بار انفجار و رفتار با نرخ کرنشی بالا از مواد استفاده می‌شود. در پژوهش بیلوت و همکاران ابعاد سطح مقطع ستون مرکزی خارجی آزمایش شده، ۸۵ میلی‌متر در ۸۵ میلی‌متر و ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. قطر آرماتورهای طولی و آرماتورهای عرضی به ترتیب ۳/۲ میلی‌متر و ۱/۶ میلی‌متر می‌باشد. تنش تسلیم در نظر گرفته شده



شکل ۳. نمودار تاریخچه فشار-زمان به دست آمده برای فشار اوج ناشی از انفجار ۸ کیلو گرم TNT در فاصله ۱ متر

Fig. 3. Pressure-time history diagram for maximum pressure due to 8 Kg TNT from stand-off distance 1 meter



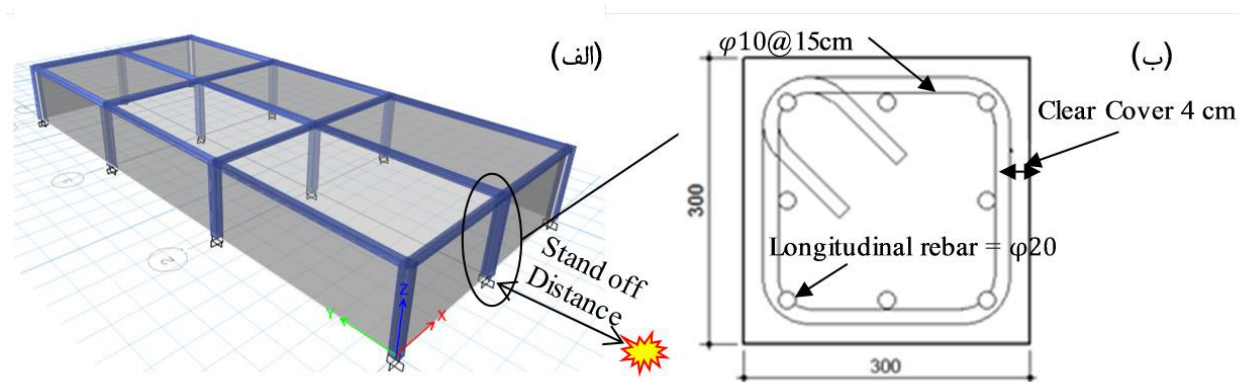
شکل ۴. الف) جابه جایی وسط ستون در شبیه سازی عددی در AUTODYN ب) برخورد موج انفجار به ستون

Fig. 4. a) diagram of Mid deflection of column in numerical analysis b) Interaction of explosion and column

اطراف ستون در نظر گرفته می شود. در AUTODYN در اثر برخورد موج انفجار با مرز محیط اویلری بازتاب می شود. برای غلبه بر این مشکل، شرایط مرزی FLOW-OUT (شکل ۳) برای جلوگیری از بازتاب امواج و فشار در مرز در نظر گرفته می شود. همچنین سنجه هایی برای اندازه گیری جابه جایی وسط ستون در نظر گرفته می شود. بعد از انجام محاسبات عددی به صورت موازی در فضای ابری^۱، میزان جابه جایی وسط ستون که از آنالیز عددی به دست می آید و برخورد موج انفجار به ستون، در شکل ۴ نمایش داده می شود. نتایج نشان می دهد استفاده از روش همبستگی اویلری

روش TNT معادل، برای ۷/۸ کیلوگرم C^4) تا اولین سطح بازتاب در فاصله سرد ۱ متر ادامه می یابد. برای در نظر گرفتن المان بندی مناسب محیط یک بعدی اویلری، آنالیز حساسیت اندازه مناسب المان بررسی می شود. برای این منظور ۳ المان بندی به اندازه های ۱mm، ۲mm و ۱۰mm در نظر گرفته می شود. بیشینه فشار اوج به دست آمده از این بررسی در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان طور که مشخص است با افزایش اندازه المان از ۱۰ به ۱ میلی متر فشار اوج به فشار اوج آیین نامه که برابر با ۴۸۷۴ کیلوپاسکال می باشد، همگرا می شود. بعد از انجام شبیه سازی یک بعدی، نتایج انفجار با اندازه المان ۱ mm به محیط سه بعدی اویلری نگاشت می شود. بعد از نگاشت به محیط اویلری حدود ۱ میلیون المان اویلری برای محیط هوای

1 Parallel Processing
2 Cloud Space



شکل ۵. الف) نمای شماتیک از سازه طراحی شده (ب) مقطع ستون بتنی به دست آمده از طراحی سازه

Fig. 5. a) Schematic view of the designed structure b) The cross section of the concrete column obtained from designing of the structure

جدول ۳. ثابت‌های معادله جانسون-کوک [۲۷]

Table 3. Johnson-Cook equation's parameters [27]

$\Delta(1/Z)$	فاصله‌های سرد
۰/۱	۳ و ۵، ۷، ۱۰
۰/۰۵	۱۲ و ۱۵، ۱۷، ۲۰

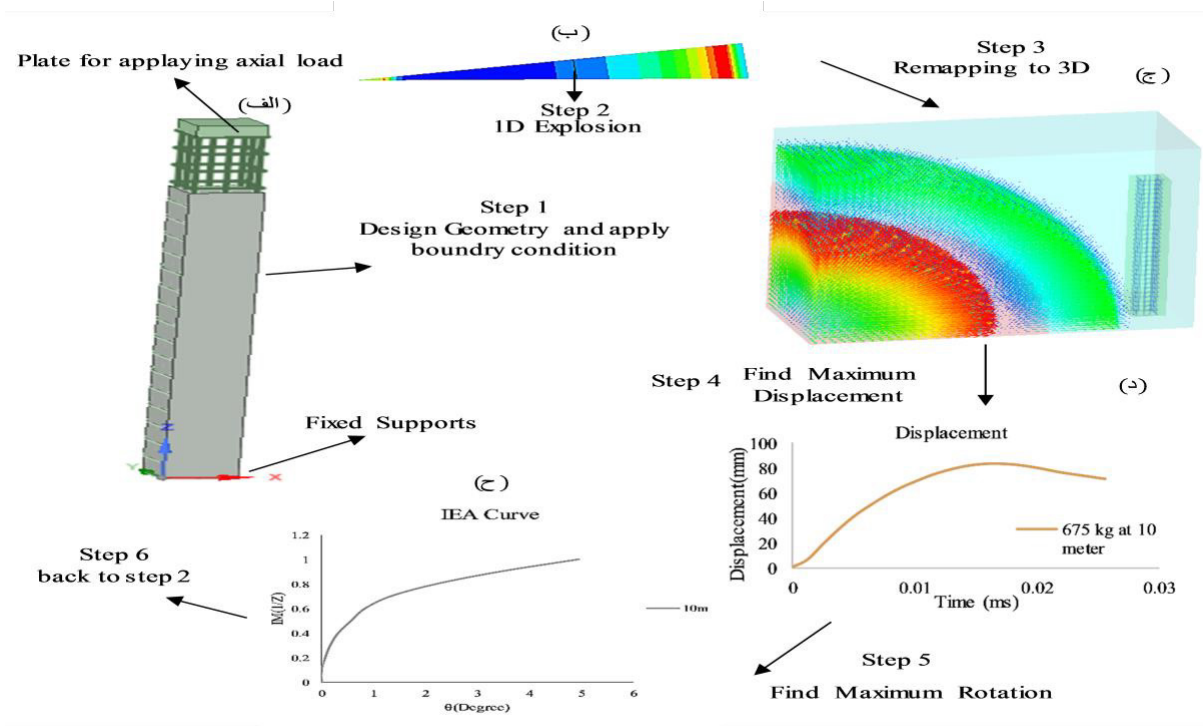
نظر گرفته شده است و مقادیر وزن انفجار با پارامتر (Δ) که برای فواصل سرد مختلف در جدول ۵ ارائه شده است، افزایش می‌یابند. باید توجه شود فاصله‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ با توجه به آنالیز ریسک انفجار برای داده‌های مختلف انفجار کتاب FEMA-427 ارائه شده‌اند [۱۶]. در حقیقت بیشترین تعداد انفجار در این فواصل رخ داده است. بعد از به دست آوردن شعاع خرج‌های متفاوت انفجار از رابطه (۱۳)، نگاشت یک بعدی با اندازه المان ۱ میلی‌متر انجام و به روی محیط اویلری سه بعدی انتقال می‌یابد. شکل ۷ لحظه برخورد جبهه موج انفجار حاصل از ۲۶۰ کیلوگرم TNT و بازتاب آن را نشان می‌دهد. انفجار در فاصله سرد ۵ متری از ستون رخ داده است. نقطه سه‌گانه محل برخورد موج جبهه موج فرودی و موج بازتاب شده در شکل ۸-ب نشان داده شده است.

لاگرنژی از دقت کافی در به دست آوردن پاسخ سازه برخوردار است.

۵- مسئله مورد بررسی

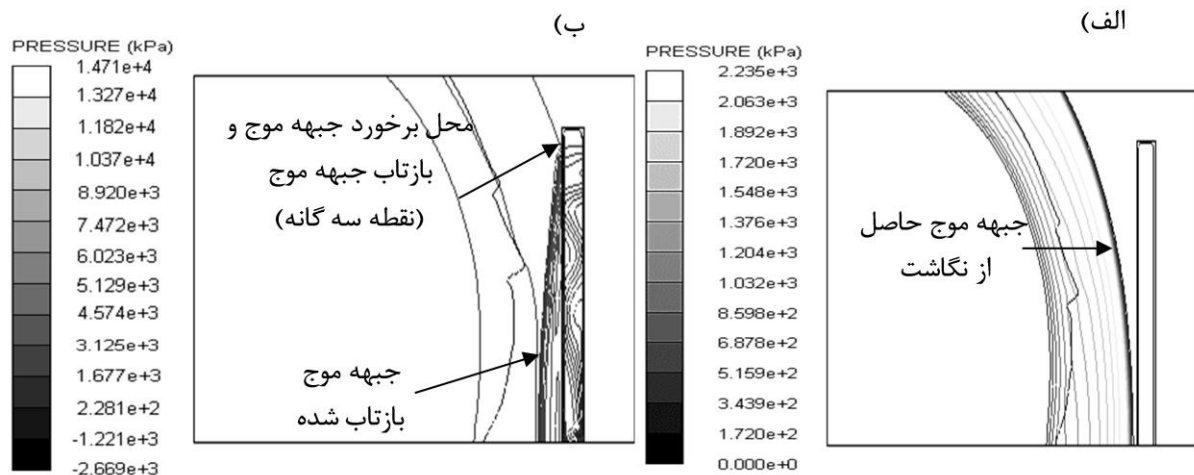
۵-۱- تحلیل IEA

شکل ۵ سازه طراحی شده و مقطع ستون در نظر گرفته شده در این مطالعه به ابعاد ۳۰۰ در ۳۰۰ میلی‌متر مربع را نشان می‌دهد. ارتفاع ستون ۳ متر می‌باشد. تمامی نقاط گرهی ورق قرار گرفته در انتهای ستون جز حرکت انتقالی در جهت γ مقید شده‌اند. پایین ستون نیز به صورت گیردار مدل‌سازی شده است. مقاومت فشاری در نظر گرفته شده برای بتن ۴۲ مگاپاسکال و مقاومت تسلیم فولاد برابر ۴۴۸ مگاپاسکال است. ثابت‌های در نظر گرفته برای مدل مقاومت جانسون-کوک و RHT بر اساس جدول ۳ و ۴ انتخاب شده‌اند. مانند قسمت صحت‌سنجی برای بتن از المان ۸ گرهی (Solid) و برای میلگردها از المان دوگره‌ای (Beam) با ابعاد ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین برای اینکه رفتار تغییر شکل ستون مشابه با واقعیت باشد از الگوریتم تماس مبتنی بر body interaction (چسبندگی بتن و میلگرد بدون لغزش) تعریف شده است. ستون در انتهای خود بار محوری به مقدار ۱۰۰ KN به عنوان بار مرده و سربار را تحمل می‌نماید. شکل ۶ نمایی شماتیک از ستون و مراحل روش IEA را نشان می‌دهد. به منظور انجام تحلیل نموی ۸ فاصله بین ۳ تا ۲۰ متر به صورت ثابت در



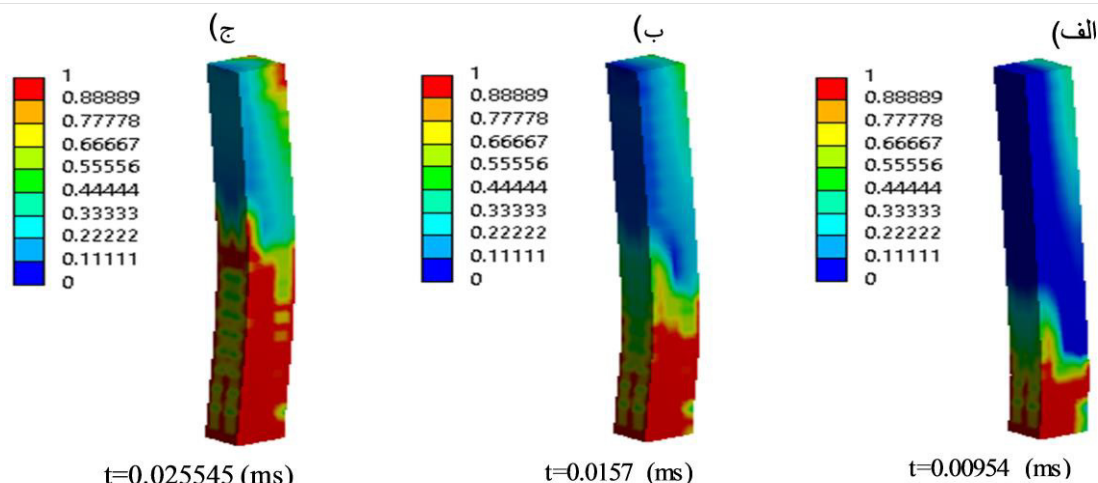
شکل ۶. الف) مدل استفاده شده برای ارزیابی عملکرد ب) شبیه‌سازی یک بعدی انفجار ج) شبیه‌سازی انفجار به روش کوپل اویلری-لاگرانژی د) پاسخ ستون ح) ترسیم منحنی IEA

Fig. 6. a) The used model to evaluate performance b) One-dimensional explosion simulation c) Eulerian-Lagrangian coupling simulation d) Column response e) Drawing the IEA curve



شکل ۷. الف) کانتور فشار مبنای انفجار حاصل از ۲۵۰ کیلوگرم TNT در زمان ۱/۹۲ میلی ثانیه در فاصله ۵ متر از ستون ب) بازتاب موج انفجار ۲۵۰ کیلوگرم TNT از ستون در لحظه ۲/۳ میلی ثانیه

Fig. 7. a) Incident Pressure Contour for 250 Kg TNT at stand-off Distance 5 meter at the moment 1.92 (ms), Reflection of explosion wave for 250 Kg TNT at stand-off Distance 5 meter at the moment 2.93 (ms)



شکل ۹. کانتور تنش (شاخص خرابی) ستون در اثر انفجار ۷۲۹ کیلوگرم در فاصله سرد ۱۰ متر (الف) $t=0.00954$ (ب) $t=0.0157$ (ج) $t=0.025545$

Fig. 9. Stress contour (damage index) of the column subjected to 729 Kg TNT at stand-off distance 10 meter a) $t=0.00954$ b) $t=0.0157$ c) $t=0.025545$

ترسیم می‌شود. نمودارهای IEA نشان داده شده در شکل ۱۰ بر حسب پارامتر تقاضای چرخش تکیه‌گاهی ترسیم شده‌اند. بعد از به دست آوردن نتایج آنالیز عددی، پاسخ‌های نمودار IEA در صدک‌های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ خلاصه می‌شوند. این صدک‌ها بر اساس توزیع نرمال مقادیر به دست آمده، حاصل می‌شوند. شکل ۱۱ خلاصه منحنی IEA برای صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد همراه سه حالت حدی در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۸. چرخش اعضا بر اساس آیین نامه UFC-3-340-02 [۳]

Fig. 8. Member rotation from UFC-3-340-02 Code [3]

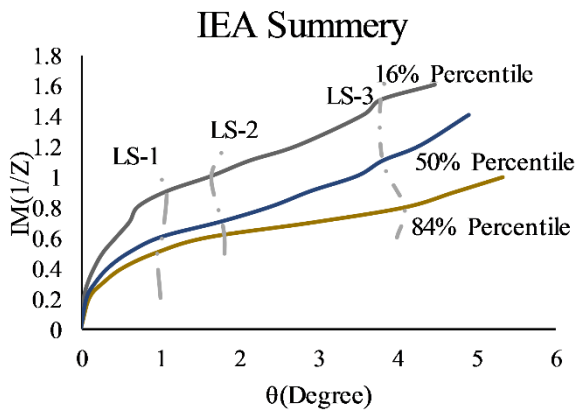
برای هر مرحله افزایش مقادیر خرج انفجار، جابه‌جایی وسط ستون (y) محاسبه می‌شود. رابطه (۲۲) برای به دست آوردن چرخش وسط تیر استفاده می‌شود. شکل ۸ چرخش ستون ناشی از بارگذاری انفجار را نشان می‌دهد.

$$\theta = \tan^{-1}(y/L/2) \quad (22)$$

مقادیر استفاده شده برای حالت‌های حدی انحراف تکیه‌گاه ستون (مقادیر حداکثر مجاز) بر اساس آیین‌نامه ASCE در جدول ۱ ارائه شده است. شکل ۹ به ترتیب لحظه برخورد فشار انفجار به سازه و کانتور تنش در نقاط مختلف ستون در اثر انفجار ۷۲۹ کیلوگرم در فاصله ۱۰ متر در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. پس از به دست آوردن داده‌های IEA نمودارهای مربوطه

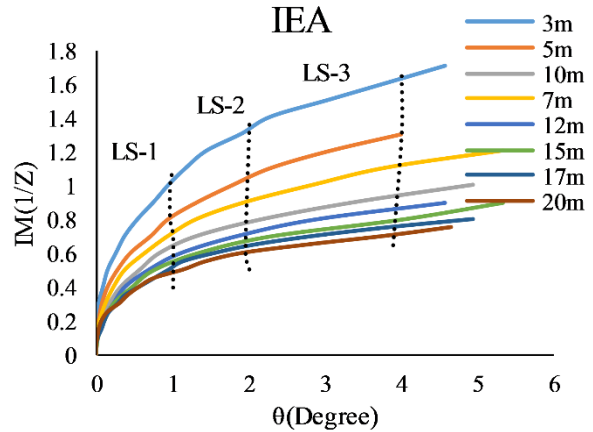
۵-۲- منحنی شکنندگی

علاوه بر منحنی IEA و نتایج به دست آمده از خلاصه‌سازی آن، یکی دیگر از نمودارهای مفید برای طراحی یا ارزیابی عملکرد سازه در برابر بار انفجارهای تصادفی، منحنی شکنندگی است [۲۶]. پس از انجام آنالیزهای اولیه و دستیابی به داده‌های IEA، می‌توان منحنی‌های شکنندگی را استخراج نمود. از منحنی‌های شکنندگی می‌توان پیش‌بینی نمود درصد احتمال فراگذشت سازه مورد نظر برای یک شدت خاص از یک حد مورد انتظار مانند حالت‌های حدی به چه میزان می‌باشد. باید به این نکته توجه داشت که داده‌های IEA از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. لذا به منظور به دست آوردن این منحنی‌ها برای IEA هایی که قبلاً مورد بحث قرار گرفت، رابطه‌ی (۲۳) به کار می‌رود [۲۰]:



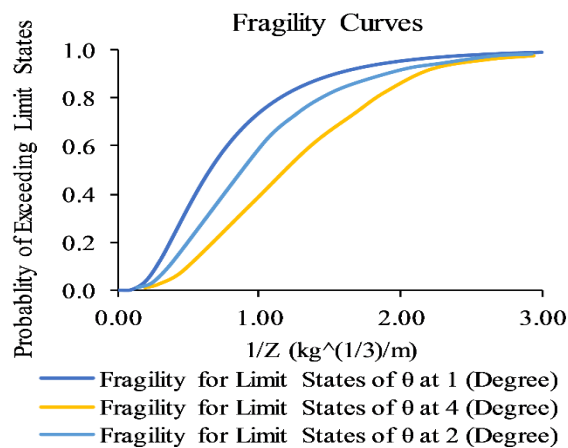
شکل ۱۱. خلاصه منحنی های IEA

Fig. 11. Summary of IEA curves



شکل ۱۰. منحنی های IEA

Fig. 10. The IEA curves



شکل ۱۲. منحنی شکنندگی برای حالت‌های حدی متفاوت

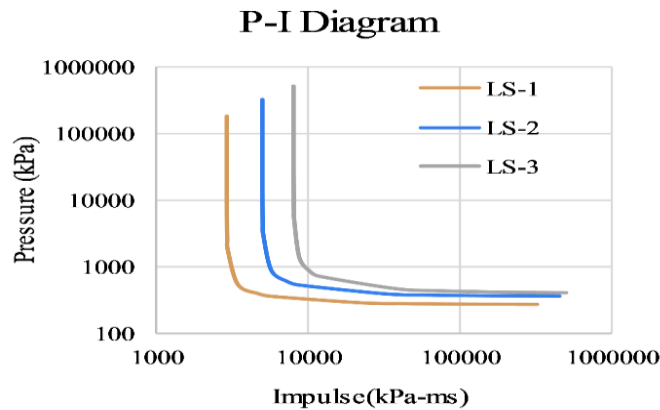
Fig. 12. Fragility curve for different limit states

۵-۳- منحنی فشار-ضربه

نمودار فشار-ضربه^۱ که متشکل از یک سری ترکیب فشار-ضربه برای رسیدن به پاسخ‌های حدی آیین‌نامه طبق جدول ۱ بر اساس تحلیل انفجاری نموی (فشار و ضربه‌های برداشت شده در مقادیر حدی آیین‌نامه) که در مقیاس لگاریتمی به دست آمده در شکل ۱۳ ارائه شده است. با ایجاد یک نمودار P-I برای یک سازه مشخص و ترسیم ترکیبات فشار و ضربه مربوط به تهدیدات مختلف انفجاری پیش‌بینی شده، عملکرد یک سازه می‌تواند به

$$f(X, \mu, \sigma_x^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-0.5) \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2 \quad (23)$$

که در آن μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف معیار داده‌های IEA است. شکل ۱۲ منحنی شکنندگی به صورت احتمال فراگذشت ستون بتنی از حالت‌های مختلف حدی در نظر گرفته شده را در مقابل پارامتر شدت (IM) نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. منحنی فشار-ضربه برای ستون بتنی مسلح

Fig. 13. Pressure-Impulse diagram for the concrete column

۱۶ درصد از انفجارهای در نظر گرفته شده چرخش ستون بتنی کمتر از $1/2$ درجه ($\theta \leq 1.2^\circ$)، در ۵۰ درصد انفجارها چرخش ستون کمتر از $3/8$ درجه ($\theta \leq 3.8^\circ$) و در ۸۴ درصد انفجارها چرخش کمتر از $5/5$ درجه ($\theta \leq 5.5^\circ$) به طور تقریبی حاصل می‌شود. علاوه بر منحنی IEA، نمودار شکنندگی ترسیم شده برای ستون بتنی در حالت‌های حدی متفاوت در برابر شدت، برای هر شدت مشخص، احتمال فراگذشت چرخش از حالت‌های حدی را نشان می‌دهد. برای مثال در شکل ۱۲ احتمال فراگذشت از حالت حدی LS-1 (میزان خرابی کم) برای شدت با مقیاس برابر با یک ($IM = (1/Z) = 1$) به طور تقریبی برابر ۸۰٪، برای حالت حدی LS-2 (خرابی متوسط) حدود ۶۰٪ و حالت خرابی زیاد ۴۰٪ است. برای همین شدت یعنی ($IM = (1/Z) = 1$) احتمال اینکه چرخش ستون کوچک‌تر از یک باشد، حدود ۲۰٪ است. این روش، اطلاعات مفیدی را برای طراحی سازه‌های ضد انفجار به طراحان می‌دهد. استفاده از منحنی‌های شکنندگی در انفجار، طراحان را قادر می‌سازد که درصد احتمال فراگذشت پارامتر تقاضای سازه مورد نظر از حالت‌های حدی آیین‌نامه را بر اساس پارامتر شدت به دست آورند. همچنین ترسیم منحنی فشار-ضربه می‌تواند ترکیب فشار و ضربه‌ای که پاسخ حدی را شامل شود، نشان دهد.

۷- نتیجه‌گیری

- در این مطالعه نتایج منحنی IEA برای انفجارهای مختلف از حدود $0.2/1$ تا 3400 کیلوگرم در فاصله‌های سرد ۳ تا ۲۰ متر به دست آمده

صورت گرافیکی ارزیابی شود. برای مثال در صورتی که به ستون فشار بازتاب حدود 6100 کیلو پاسکال و ضربه 3400 کیلو پاسکال - میلی ثانیه (ناشی از انفجار 100 کیلوگرم در فاصله سرد 5 متر) وارد شود، انحراف تکیه‌گاهی بیشتر از یک درجه (به طور تقریبی حدود $1/33$) را تجربه می‌کند.

۶- بحث

شکل ۱۰ میزان چرخش تکیه‌گاهی ستون بتنی در برابر شدت انفجارهای مختلف در فاصله‌های سرد متفاوت را نشان می‌دهد. برای مثال در فاصله 5 متر برای رسیدن به حالت حدی ۱، یعنی چرخش تکیه‌گاهی کمتر از یک درجه به حدود 64 کیلوگرم ماده منفجره نیاز است. برای همین چرخش تکیه‌گاهی، در فاصله 10 متر، مقدار ماده منفجره بایستی به حدود 270 کیلوگرم افزایش یابد. از این اطلاعات می‌توان برای طراحی سازه‌های ضد انفجار برای یک فاصله‌ی با مقیاس معین استفاده نمود. برای مثال اگر هدف، طراحی یک ستون اتاق کنترل باشد، آیین‌نامه ASCE حد مجاز چرخش ستون بتنی مورد نظر را کمتر از 1 درجه بیان می‌کند. اگر هدف طراحی ستون یک ساختمان مسکونی باشد، بر اساس مبحث ۲۱ (پدافند غیرعامل) برای حالت حدی با معیار متوسط، ماکزیمم چرخش تکیه‌گاهی، 2 درجه در نظر گرفته می‌شود. همچنین با خلاصه‌سازی منحنی‌های IEA برای پارامتر شدت‌های متفاوت، می‌توان احتمال فراگذشت از یک میزان خسارت خاص بر اساس صدک‌های 50 ، 16 و 84 درصد را به دست آورد. با توجه به شکل ۱۱ برای شاخص شدت برابر با 1 ($IM = (1/Z) = 1$) در

- Structures to resist the effects of accidental explosions, in, US Army Corps of Engineers and the Joint Departments of the Army, (2008).
- [4] P. Sherkar, Modeling the effects of detonations of high explosives to inform blast-resistant design, State University of New York at Buffalo, (2010).
- [5] M. Ahmed Galal, M. Bandyopadhyay, A. Krishna Banik, Progressive Collapse Analysis of Three-Dimensional Steel-Concrete Composite Building due to Extreme Blast Load, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(3) (2020).
- [6] Y.E. Ibrahim, M. Nabil, Assessment of structural response of an existing structure under blast load using finite element analysis, *Alexandria Engineering Journal*, 58(4) (2019) 1327-1338.
- [7] M. Abedini, A.A. Mutalib, J. Mehrmashhadi, S.N. Raman, R. Alipour, T. Momeni, M.H. Mussa, Large deflection behavior effect in reinforced concrete columns exposed to extreme dynamic loads, (2019).
- [8] L. Abladey, A. Braimah, Near-field explosion effects on the behaviour of reinforced concrete columns: a numerical investigation, *International Journal of Protective Structures*, 5(4) (2014) 475-499.
- [9] D.D. Nourzadeh, J. Humar, A. Braimah, Comparison of response of building structures to blast loading and seismic excitations, *Procedia engineering*, 210 (2017) 320-325.
- [10] A. Dua, A. Braimah, M. Kumar, Experimental and numerical investigation of rectangular reinforced concrete columns under contact explosion effects, *Engineering Structures*, 205 (2020) 109891.
- [11] M. Biglarkhani, K. Sadeghi, Incremental explosive analysis and its application to performance-based assessment of stiffened and unstiffened cylindrical shells subjected to underwater explosion, *Shock and Vibration*, (2017).
- [12] M. Biglarkhani, K. Sadeghi, Incremental explosive analysis and its application to performance-based assessment of stiffened and unstiffened plates, *Journal of Computational Applied Mechanics*, 48(2) (2017) 253-
- و خلاصه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد با توجه به عدم قطعیت‌های انفجار مانند میزان خرج یا فاصله روش IEA یک روش سودمند برای استخراج عملکرد سازه یا المان‌های سازه‌ای در مقابل شدت‌های مختلف انفجار در کل دامنه از حالت پایدار تا ناپایداری سازه و نشان دادن ظرفیت سازه به روشی معقول‌تر و قابل درک‌تر می‌باشد.
- منحنی‌های شکنندگی و نمودار فشار-ضربه در کنار منحنی‌های IEA اطلاعات مفیدی از جمله احتمال فراگذشت المان سازه‌ای از حالت‌های حدی در نظر گرفته شده برای فاصله مقیاس شده متفاوت را در اختیار طراحان سازه‌های ضد انفجار می‌گذارد. برای نمونه در این مطالعه احتمال فراگذشت از حالت حدی LS-1 (میزان خرابی کم) برای شدت با مقیاس برابر با $(IM = (1/Z) = 1)$ به طور تقریبی برابر ۸۰٪، برای حالت حدی LS-2 (خرابی متوسط) حدود ۶۰٪ و حالت حدی LS-3 ۴۰٪ است.
 - با استفاده از نمودارهای IEA حداقل فاصله حفاظتی از سازه یا المان‌های سازه‌ای در برابر خرج‌های مختلف انفجار محاسبه می‌شود. برای مثال برای اینکه پاسخ ستون مورد بررسی در این مطالعه در برابر انفجار ۲۱۲ کیلوگرم TNT از حالت حدی ۱ کمتر باشد، حداقل فاصله ۱۰ متر باید در نظر گرفته شود.
 - استفاده از روش همبستگی اوپلری-لاگرانژی یک روش دقیق برای تحلیل انفجار به صورت اثر متقابل سیال (انفجار) و سازه به حساب می‌آید. اگر چه این روش بسیار پیچیده‌تر و محاسبات آن نیاز به سخت افزارهای خاص دارد. اما درک بهتری از رفتار سازه و فشار بازتاب انفجار می‌دهد. با استفاده از تکنیک نگاشت برای کاهش حجم محاسبات سه بعدی انفجار (انجام محاسبات به صورت یک بعدی تا اولین سطح بازتاب)، استفاده از تقارن سازه و پردازش موازی در فضای ابری می‌توان سرعت محاسبات را به میزان قابل توجهی افزایش داد.

منابع

- [1] FEMA (Federal Emergency Management Agency), FEMA-426: Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings, in, US Department of Homeland Security Washington, DC, USA, (2003).
- [2] U.S. Army, Structures to resist the effects of accidental explosions, TM 5-1300, US Department of the Army Technical Manual, Washington, DC, (1990).
- [3] Unified Facilities Criteria (UFC), UFC 3-340-02:

- Steel Research, 136 (2017) 1-10.
- [26] D. Forni, B. Chiaia, E. Cadoni, High strain rate response of S355 at high temperatures, *Materials & Design*, 94 (2016) 467-478.
- [27] D. Forni, B. Chiaia, E. Cadoni, Strain rate behaviour in tension of S355 steel: Base for progressive collapse analysis, *Engineering Structures*, 119 (2016) 164-173.
- [28] W. Riedel, 10 years RHT: A review of concrete modelling and hydrocode applications, *Predictive modeling of dynamic processes*, (2009) 143-165.
- [29] J. Wu, Y. Zhou, R. Zhang, C. Liu, Z. Zhang, Numerical simulation of reinforced concrete slab subjected to blast loading and the structural damage assessment, *Engineering Failure Analysis*, 118 (2020).
- [30] Q. Yan, C. Liu, J. Wu, J. Wu, T. Zhuang, Experimental and numerical investigation of reinforced concrete pile subjected to near-field non-contact underwater explosion, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 20(06) (2020).
- [31] W. Wang, D. Zhang, F. Lu, S.-c. Wang, F. Tang, Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion, *Engineering Failure Analysis*, 27 (2013) 41-51.
- [32] X. Cao, Q. Xu, J. Chen, J. Li, Damage prediction for an AP1000 nuclear island subjected to a contact explosion, *Structural Engineering International*, 28(4) (2018) 526-534.
- [33] J.T. Baylot, T.L. Bevins, Effect of responding and failing structural components on the airblast pressures and loads on and inside of the structure, *Computers & structures*, 85(11-14) (2007) 891-910.
- [34] Y. Shi, H. Hao, Z.-X. Li, Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads, *International Journal of Impact Engineering*, 35(11) (2008) 1213-1227.
- [35] A.A. Mutalib, H. Hao, Development of PI diagrams for FRP strengthened RC columns, *International journal of impact engineering*, 38(5) (2011) 290-304.
- 270.
- [13] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, Incremental dynamic analysis, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(3) (2002) 491-514.
- [14] S. Khan, S.K. Saha, V.A. Matsagar, B. Hoffmeister, Fragility of steel frame buildings under blast load, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(4) (2017).
- [15] M. Hadianfard, S. Malekpour, Evaluation of Explosion Safe Distance of Steel Column Via Structural Reliability Analysis, *Advanced Defence Sci.& Tech*, 8(4) (2018) 349-359. (in Persian)
- [16] E. Hinman, *Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks*, Risk management series FEMA. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, (2003).
- [17] ASCE, *Design of blast-resistant buildings in petrochemical facilities*, in, American Society of Civil Engineers, (2010).
- [18] ASCE, *Blast protection of buildings*, in, American Society of Civil Engineers, (2011).
- [19] National Building Regulations, Topic 21 national building regulations, *Passive Defenses*, (2017). (in Persian)
- [20] T. Yang, J. Moehle, B. Stojadinovic, A. Der Kiureghian, Seismic performance evaluation of facilities: Methodology and implementation, *Journal of Structural Engineering*, 135(10) (2009) 1146-1154.
- [21] M. Larcher, F. Casadei, G. Solomos, Simulation of blast waves by using mapping technology in EUROPLEXUS, *Technical Note*, PUBSY No. JRC91102, EUR Report, 26735 (2014).
- [22] ANSYS, *Ansys Autodyn User's Manual* in, Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, (2019).
- [23] Century Dynamics, *Autodyn Theory manual*, Horsham, UK: Century Dynamics Ltd, (2003).
- [24] J. Woodruff, *KOVEC user's manual*, (1976).
- [25] D. Forni, B. Chiaia, E. Cadoni, Blast effects on steel columns under fire conditions, *Journal of Constructional*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Seifinia, M. R. Mohammadiezhadeh, *Evaluation Performance of a Reinforced Concrete Column Subjected to Explosion Using Incremental Explosive Analysis, Amirkabir J. Civil Eng., 54(4) (2022) 1441-1460.*

DOI: [10.22060/ceej.2021.19569.7202](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19569.7202)

