

تخمین فاصله انفجار ایمن ستون فولادی

از طریق تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها

محمدعلی هادیانفرد^{۱*}، سینا ملک‌پور^۲

۱- دانشیار، ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شیراز

(دریافت: ۹۵/۰۷/۲۷، پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۶)

چکیده

در اکثر مطالعات انجام شده در زمینه طراحی سازه‌ها در مقابل انفجار، عدم قطعیت‌های موجود در بارگذاری انفجار به طور مستقیم لحاظ نشده است. با در نظر گرفتن مستقیم این عدم قطعیت‌ها از طریق آنالیز قابلیت اعتماد می‌توان به تخمین دقیق‌تر و منطقی‌تری از ایمنی سازه و احتمال خرابی آن رسید. در این مقاله 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 محاسبه شده و حداقل فاصله حفاظتی مورد نیاز برای جلوگیری از خسارت قابل توجه به سازه تعیین شده است. جهت تحلیل سازه از روش‌های سامانه یک درجه آزادی معادل و شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده شده است. 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 پیشنهاد گردیده است.

کلید واژه‌ها: بار انفجار، تحلیل قابلیت اعتماد، سامانه یک درجه آزادی، ستون فولادی، شبیه‌سازی مونت کارلو

Evaluation of Explosion Safe Distance of Steel Column Via Structural Reliability Analysis

M. A. Hadianfard*, S. Malekpour

Shiraz University of Technology

(Received: 18/10/2016; Accepted: 04/02/2017)

Abstract

In most studies done in the field of design of structures against explosion, uncertainties in explosive loading are not directly considered. By considering these uncertainties and using reliability analysis, more accurate and reasonable estimation of structural safety and probability of failure can be reached. In this paper, using Monte-Carlo simulation method and considering uncertainties associated with blast loading, the probability of failure of steel columns under different blast loads is calculated. Then, the minimum required protective distance is determined to prevent significant damage of structure. The single degree of freedom and finite element simulation methods are utilized for structural analysis. Finally, safe protective distances are proposed as 4.5, 9.5, 12 and 14 meters for charge weights of 30, 200, 400 and 600 kg TNT, respectively.

Keywords: Blast Load, Reliability Analysis, Single Degree of Freedom System, Steel Column, Monte Carlo Simulation

۱. مقدمه

سامانه‌های قاب خمشی ویژه، مهاربند هم محور و مهاربند برون محور، تحت اثر بار انفجار بررسی کردند. بر اساس پژوهش این محققان سامانه مهاربند برون محور نسبت به سایر سامانه‌ها عملکرد بهتری در برابر بارهای ناشی از انفجار از خود نشان می‌دهد. هادیان فرد و همکاران [۷] در پژوهشی رفتار ستون‌های فولادی را با مقاطع عرضی مختلف و شرایط مرزی گیردار و مفصلی، تحت زوایای انفجار صفر و ۴۵ درجه بررسی کردند.

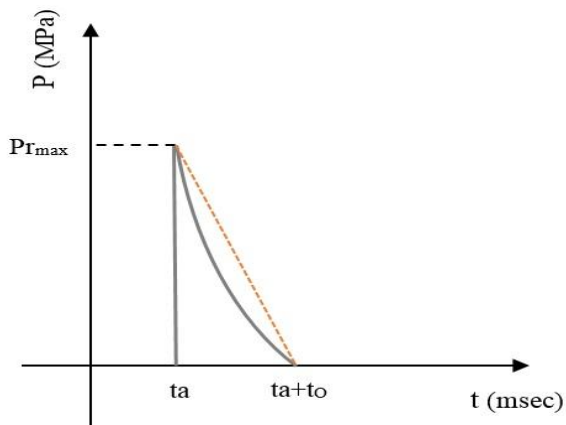
همچنین تعدادی پژوهش در زمینه کاربرد نظریه قابلیت اعتماد در تحلیل و طراحی سازه‌های بتنی تحت اثر بار انفجار از سال ۲۰۰۰ به بعد انجام شده است. لو و هاو [۸] به تحلیل قابلیت اعتماد دال‌های بتن مسلح تحت اثر بار انفجار پرداختند. در این پژوهش از مدل سامانه یک درجه آزادی معادل برای شبیه‌سازی استفاده شده است. های چنگ و بینگ لی [۹] در پژوهشی اختلاف جابه‌جایی به‌دست آمده از روش تحلیل دینامیکی غیر خطی سامانه یک درجه آزادی معادل با پاسخ واقعی اعضای بتن مسلح را محاسبه کردند. هونگ هاو و همکاران [۱۰] تحلیل قابلیت اعتماد ستون‌های بتن مسلح تحت اثر بار انفجار را ارائه دادند. این محققان نشان دادند که در نظر نگرفتن متغیرهایی همچون خصوصیات مقاومتی و ابعاد ستون به صورت متغیر تصادفی تأثیر اندکی در پیش‌بینی احتمال خرابی خواهد داشت و این در حالی است که چشم‌پوشی از ماهیت تصادفی متغیرهای مربوط به بارگذاری انفجار منجر به پیش‌بینی احتمال خرابی ستون به صورت نادرست خواهد شد. ندرتون و استورت [۱۱] به شناسایی متغیرهای تأثیرگذار جهت برآورد عدم قطعیت مربوط به بارگذاری انفجار پرداختند. یوفانگ شی و استورت [۱۲] احتمال خرابی ستون‌های بتن مسلح با تعریف تابع شرایط حدی بر اساس ظرفیت باقیمانده از طریق مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزای محدود LS-DYNA را ارائه کردند. در این مطالعه علاوه بر پارامترهای بارگذاری انفجار، پارامترهای مربوط به مقاومت مصالح و ابعاد و اندازه‌ها به صورت متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده‌اند.

عمده مطالعات انجام شده در زمینه کاربرد نظریه قابلیت اعتماد در طراحی سازه‌های تحت بار انفجار مربوط به سازه‌های بتنی است و اغلب از سامانه یک درجه آزادی معادل برای تحلیل اعضای استفاده شده است. در این پژوهش از دو روش سامانه یک درجه آزادی و تحلیل اجزای محدود برای بررسی ستون‌های فولادی تحت اثر بار انفجار استفاده شده است و برای اولین بار حداقل فاصله حفاظتی ایمن در اطراف ساختمان برای انفجارهای مختلف با استفاده از روش آنالیز قابلیت اعتماد محاسبه و پیشنهاد گردیده است. برای جلوگیری از خسارت سازه‌ای بر ساختمان‌هایی که ممکن است تحت اثر انفجار تروریستی قرار

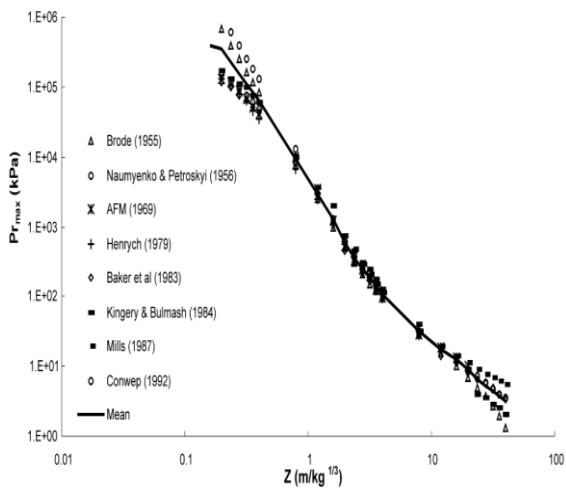
در روش رایج طراحی ساختمان‌ها، نیروهای در نظر گرفته شده در فرایند طراحی محدود به بارهای ثقلی، زلزله و باد می‌شود. با توجه به گسترش حملات تروریستی در سال‌های اخیر اهمیت در نظر گرفتن اثرات ناشی از بار انفجار بر سازه‌ها افزایش یافته است. انفجارها از نظر موقعیتشان نسبت به سازه به دو نوع کلی انفجار داخلی و انفجار خارجی تقسیم‌بندی می‌شوند. انفجارهای خارجی بر اساس موقعیتشان نسبت به زمین شامل انفجار در هوا، انفجار در سطح زمین و انفجار در داخل زمین هستند. انفجارهای تروریستی اغلب از نوع انفجار خارجی و سطحی دسته‌بندی می‌شوند، زیرا پدیده انفجار در فضای اطراف ساختمان و بسیار نزدیک به سطح زمین رخ می‌دهد. هنگام رخداد انفجار در مجاورت یک ساختمان، نزدیک‌ترین اعضا نسبت به محل انفجار تحت بارگذاری بسیار شدیدتری نسبت به اعضای دورتر قرار می‌گیرند در نتیجه تخریب ساختمان‌ها در اثر انفجار اغلب به دلیل آسیب شدید موضعی به اعضای باربر اصلی سازه مانند ستون‌های طبقه همکف رخ می‌دهد. به همین دلیل بخش قابل توجهی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه طراحی سازه‌ها تحت بارگذاری انفجار مربوط به اثر انفجار بر ستون‌های سازه است. در روش‌های پیشنهادی در آیین‌نامه‌ها و کتاب‌ها [۱ و ۲] جهت تحلیل و طراحی اعضای تحت اثر بار انفجار، عدم قطعیت‌های موجود در بارگذاری انفجار به صورت مستقیم لحاظ نشده است. در این حالت تخمین میزان ایمنی سازه یا احتمال خرابی آن به صورت دقیق میسر نیست.

در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی در زمینه پاسخ اعضای تحت بارگذاری انفجار با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، تحلیل‌های اجزای محدود و استفاده از سامانه یک درجه آزادی معادل انجام شده است. هادیان فرد و همکاران [۳] پاسخ دینامیکی غیر خطی ستون‌های فولادی با مقطع‌های صلیبی، قوطی، بال پهن و دابل I را تحت انفجار نزدیک با شرایط مرزی مختلف بررسی کردند. بر اساس پژوهش این محققان، ستون با مقطع صلیبی در هر دو شرایط مرزی عملکرد بهتری نسبت به سایر مقاطع داشته است. نصر و همکاران [۴] در یک آزمایش میدانی، تعدادی ستون فولادی بال پهن را تحت انفجارها با مقدار ماده منفجره و فاصله انفجار مختلف مورد بررسی قرار دادند. در آزمایش انجام شده توسط این محققان پارامترهای موج انفجار، جابه‌جایی وسط ستون، نرخ کرنش، پیروید ارتعاش و مدهای خرابی مربوط به ستون‌ها ثبت شده است. صدرنژاد و ضیائی [۵] با انجام تحلیل دینامیکی غیر خطی بر روی یک سازه فولادی ۵ طبقه تحت اثر انفجار داخلی، عملکرد اتصالات پیچی تیر به ستون تحت انفجار را بررسی کردند. شیراوند و شعبانی [۶] رفتار سازه‌های فولادی با

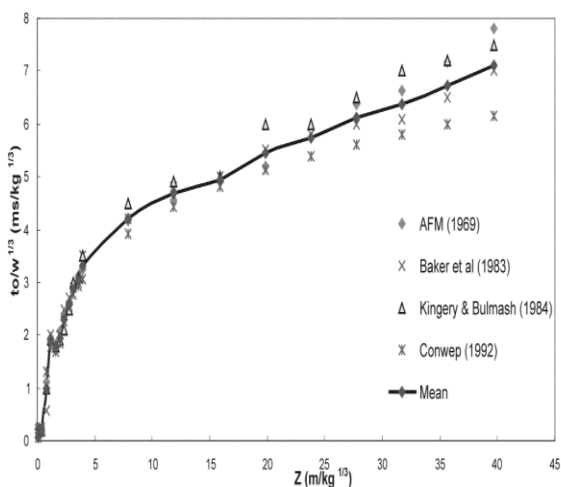
$$Pr_{\max} = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2154}{Z^3} - 0.8034 \quad \text{kPa} \quad (2)$$



شکل ۱. تاریخچه زمانی فشار انفجار



شکل ۲. فشار حداکثر انعکاسی Pr_max بر حسب فاصله مقیاس شده Z [۸]



شکل ۳. مدت زمان فاز مثبت t_o بر حسب فاصله مقیاس شده [۸]

گیرند می‌توان با محدود کردن دسترسی به فضای اطراف ساختمان از طریق در نظر گرفتن تمهیداتی در محوطه‌سازی موقعیت انفجار را از سازه دور کرد. با این منطق، در این پژوهش با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد به دنبال حداقل فاصله ایمن برای انفجارهای مختلف هستیم به طوری که بر اساس معیارهای پذیرش موجود در آیین‌نامه‌ها کمترین خسارت سازه‌ای به ساختمان وارد شود. در این مقاله، ابتدا با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و از طریق سامانه یک درجه آزادی معادل، احتمال خرابی ستون‌های فولادی تحت انفجارهای مختلف محاسبه شده و حداقل فاصله ایمن برای جلوگیری از خسارت قابل توجه به ستون تعیین شده است، سپس جهت مقایسه بین نتایج حاصل از سامانه یک درجه آزادی معادل و روش شبیه‌سازی اجزای محدود، احتمال خرابی ستون‌های فولادی تحت انفجارهای مختلف در فواصل ایمن با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA محاسبه شده است.

بارگذاری انفجار: در این پژوهش انفجاری که مدنظر است از نوع انفجار سطحی است که در آن انفجار روی سطح زمین یا بسیار نزدیک به آن رخ می‌دهد و حوادث تروریستی یا بمب‌گذاری‌هایی که در مجاورت ساختمان‌ها رخ می‌دهد شامل این نوع انفجار هستند. تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار مطابق شکل (۱) به صورت مثلثی یا نمایی ساده‌سازی می‌شود. دو متغیر t_o و Pr_{\max} به ترتیب مربوط به حداکثر فشار انعکاسی و مدت زمان فاز مثبت انفجار هستند.

برای تعیین Pr_{\max} و t_o ، فرمول‌های تجربی، نمودارها و نرم‌افزارهایی همچون A.T.-Blast و ConWep ارائه شده است. فرمول‌های موجود معمولاً بر حسب فاصله مقیاس شده Z هستند که از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

در این رابطه، R فاصله ماده منفجره بر حسب متر و W جرم ماده منفجره بر حسب کیلوگرم TNT معادل است.

لو و هاو [۸] از مجموعه نتایج حاصل از نرم‌افزارها و روابط تجربی، نمودارهایی برای محاسبه میانگین Pr_{\max} و t_o بر حسب Z ارائه کرده‌اند (مطابق شکل‌های (۲) و (۳)). رابطه (۲) نیز توسط همین محققان برای محاسبه Pr_{\max} ارائه شده که در این مقاله برای تعیین تاریخچه بارگذاری انفجار از این نتایج استفاده شده است.

۰/۱۲ به دست آورده‌اند. تابع توزیع اتخاذ شده برای متغیرهای تصادفی P_{Tmax} و t_0 از نوع تابع توزیع نرمال است. متغیرهایی همچون مدول الاستیسیته فولاد، تنش تسلیم فولاد و خصوصیات هندسی را نیز می‌توان به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفت اما در پژوهش هونگ هاو و همکارانش [۱۰] نشان داده شده که در نظر نگرفتن متغیرهای همچون خصوصیات مقاومتی و ابعاد ستون به صورت متغیر تصادفی تأثیر اندکی در پیش‌بینی احتمال خرابی خواهد داشت و این در حالی است که چشم‌پوشی از ماهیت تصادفی متغیرهای مربوط به بارگذاری انفجار منجر به پیش‌بینی احتمال خرابی ستون به صورت نادرست خواهد شد. با همین استدلال در این مقاله نیز تنها متغیرهای P_{Tmax} و t_0 به صورت متغیر تصادفی در نظر گرفته شده‌اند.

۲. روش‌های مدل‌سازی

مدل سامانه یک درجه آزادی معادل: مدل تحلیلی رایج در آیین‌نامه‌ها و کتب برای طراحی اعضای تحت اثر بار انفجار، سامانه یک درجه آزادی معادل است. در این روش می‌توان یک عضو از سازه تحت بارگذاری را با استفاده از ضرایب تبدیل بار و جرم به یک سامانه یک درجه آزادی شامل جرم، فنر و نیرو تبدیل کرد. ضرایب تبدیل وابسته به شرایط مرزی، نوع بارگذاری و محدوده کرنش (الاستیک، الاستوپلاستیک و پلاستیک) محاسبه می‌شوند. ضرایب تبدیل بار و جرم مربوط به سامانه یک درجه آزادی اولین بار توسط بیگز [۱۵] محاسبه شده است. در آیین‌نامه‌های [۱] و [۱۶] مربوط به طراحی اعضای تحت بار انفجار نیز از ضرایب محاسبه شده توسط بیگز استفاده شده است. تغییر مکان، سرعت و شتاب به دست آمده از سامانه یک درجه آزادی معادل برابر با پاسخ نقاط کنترلی بر روی سازه اصلی است. نقاط کنترلی معمولاً بیشترین پاسخ سازه‌ای را بر روی سازه اصلی دارند. در پژوهش حاضر که عضو مورد مطالعه یک ستون فولادی است، نقطه کنترلی وسط ارتفاع ستون است، در نتیجه جابه‌جایی وسط ستون با جابه‌جایی به دست آمده از مدل یک درجه آزادی معادل برابر است. معادله حرکت کلی مربوط به سامانه یک درجه آزادی معادل تحت بار دینامیکی مطابق رابطه (۳) است.

$$K_M M \ddot{y} + K_L R(y) = K_L F(t) \quad (3)$$

در این رابطه، M جرم عضو، K_M ضریب جرم، K_L ضریب بار، $R(y)$ مقاومت سامانه و $F(t)$ تابع نیروی برآیند وارد بر عضو است که از حاصل ضرب نیروی گسترده وارد بر عضو $P(t)$ در طول عضو (L) به دست می‌آید (شکل (۴)). در اعضای تحت فشار انفجار، نیروی گسترده وارد بر عضو در هر زمان از حاصل ضرب فشار ناشی از انفجار در عرض بارگیر عضو محاسبه می‌شود.

حالت‌های محتمل رخداد انفجارهای تروریستی در مجاورت

یک سازه: انفجارهای تروریستی که ممکن است در مجاورت سازه‌ها رخ دهند را می‌توان بر اساس فاصله انفجار تا سازه و مقدار ماده منفجره مربوط به انفجار دسته‌بندی کرد. در آیین‌نامه FEMA426 [۱۳] سناریوهای مختلف انفجار بر اساس میزان ماده منفجره قابل حمل توسط انسان و انواع خودرو (سواری، ون و کامیون) دسته‌بندی شده است. در این مقاله نیز با همین رویکرد مطابق جدول (۱) چند نوع انفجار با مقدار ماده منفجره مشخص، جهت تحلیل سازه انتخاب شده است.

جدول ۱. انفجارهای تروریستی محتمل بر اساس جرم ماده منفجره

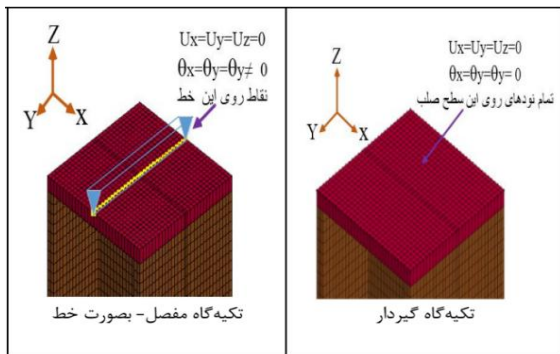
کامیونت	خودروی وانت یا ون	خودروی سواری	قابل حمل توسط انسان	انواع محموله انفجاری
۶۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۳۰	جرم ماده منفجره TNT (kg)

تحلیل قابلیت اعتماد: در روش‌های مرسوم طراحی سازه‌ها، عدم قطعیت‌های مربوط به متغیرهایی همچون بارگذاری و خصوصیات مصالح به صورت مستقیم در نظر گرفته نمی‌شود. این روش‌ها معمولاً برآورد دقیقی از سطح ایمنی سازه و احتمال خرابی آن ارائه نمی‌دهند. در سال‌های اخیر، طراحی سازه‌ها بر مبنای قابلیت اعتماد به شکل گسترده‌ای مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این روش طراحی، هدف طرح سازه‌ای است که علاوه بر اقتصادی بودن، سطح معینی از ایمنی را نیز به صورت هم‌زمان ارضاء کند. تحلیل مونت‌کارلو یکی از قوی‌ترین ابزارها جهت تحلیل آماری عدم قطعیت‌های موجود در مسائل مهندسی است که اساس آن تولید اعداد تصادفی بر اساس تابع توزیع مربوط آن متغیر است. با مشخص بودن تعریف خرابی یک سامانه، برای هر نمونه تصادفی تولید شده توسط روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، تحلیل کامل سامانه انجام شده و بررسی می‌گردد که برای آن نمونه خرابی حادث شده یا خیر، سپس با تقسیم تعداد نمونه‌های آنالیز مونت‌کارلو که در آن‌ها خرابی حادث شده به تعداد کل نمونه‌ها احتمال خرابی به دست می‌آید [۱۴].

با توجه به اینکه اکثر محققین پارامترهای P_{Tmax} و t_0 را به عنوان کمیت‌های تصادفی در نظر گرفته‌اند و اطلاعات آماری مربوطه بیشتری در دسترس است، در این پژوهش نیز این پارامترها به عنوان کمیت‌های تصادفی لحاظ شده‌اند [۱۰-۸].

نتایج به دست آمده از فرمول‌های تجربی، نمودارها و نرم‌افزارها برای محاسبه بارگذاری انفجار کاملاً یکسان نیستند زیرا عوامل زیادی بر پارامترهای بارگذاری انفجار تأثیرگذار هستند. لو و هاو [۸] با استفاده از مجموعه‌ی نتایج به دست آمده از روش‌های فوق مقدار ضریب تغییرات برای P_{Tmax} و t_0 را به ترتیب برابر با ۰/۳۲ و

مدل اجزای محدود: در این پژوهش برای شبیه‌سازی ستون فولادی به صورت اجزای محدود از نرم‌افزار LS-DYNA استفاده شده است. این نرم‌افزار قابلیت تحلیل مسائل دینامیکی با رفتار غیر خطی و نرخ کرنش بالا به ویژه در مسائل ضربه و انفجار را دارد. برای شبیه‌سازی ستون فولادی از المان پوسته‌ای استفاده شده است. جهت اعمال شرایط مرزی به ستون از دو ورق صلب در بالا و پایین ستون استفاده شده که برای اعمال شرایط مرزی گیردار، درجات آزادی دورانی و انتقالی نودهای ورق صلب بسته شده و شرایط مرزی مفصلی به صورت یک خط تعریف شده که درجه آزادی انتقالی نودهای روی آن بسته شده و درجه آزادی دورانی آزاد شده است (شکل ۶). جهت اعمال نیروی محوری از ورق صلب فوقانی برای جلوگیری از تمرکز تنش استفاده شده است. برای تعریف مصالح فولاد از مدل ماده MAT-PELASTIK-KINEMATIC که رفتار الاستوپلاستیک و اثر نرخ کرنش در مصالح را طبق رابطه (۸) بر اساس مدل کوپر-سیموندس در نظر می‌گیرد، استفاده شده است. ضرایب ثابت کوپر-سیموندس به پیشنهاد جونز $C=40$ و $P=5$ در نظر گرفته شده‌اند. در رابطه (۸)، DIF ضریب افزایش دینامیکی و ε نرخ کرنش را نشان می‌دهد.



شکل ۶. شرایط مرزی تعریف شده در شبیه‌سازی

$$DIF = 1 + \left(\frac{\varepsilon}{C}\right)^P \quad (8)$$

برای اعمال نیروی محوری ستون در مدل عددی در نرم‌افزار LS-DYNA، مقدار نیرو به صورت تدریجی و در مدت زمان ۵۰ میلی‌ثانیه به ستون اعمال شده است تا از این طریق نیروی محوری به ماهیت استاتیکی نزدیک شود و حالت ضربه‌ای نداشته باشد. تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار بر اساس مقادیر $P_{r_{max}}$ و t_0 و طبق رابطه فرایلدندر (رابطه ۹) به وجه بیرونی بال ستون اعمال شده است. در این رابطه t_a زمان شروع بارگذاری انفجار، t_0 مدت زمان فاز مثبت انفجار و ضریب ثابت b مربوط به پارامتر شکل است. تاریخچه زمانی مربوط به بار محوری و بارگذاری انفجار در شکل (۷) نشان داده شده است.

در مسائل مربوط به بارگذاری انفجار، به دلیل مدت زمان بسیار کوتاه بار انفجار، پاسخ حداکثر عضو معمولاً در سیکل اول رخ می‌دهد و در نتیجه میرایی نیروی زیادی از عضو جذب نمی‌کند و از اثر آن صرف نظر می‌شود [۱۷]. از آنجا که عضو مورد بررسی در این مطالعه مربوط به تیر-ستون بوده که دارای نیروی محوری است، در نتیجه برای بررسی تأثیر نیروی محوری در معادله حرکت، از بار جانبی معادل استفاده شده است [۴]. بنابراین معادله حرکت تیر-ستون بر اساس رابطه (۴) ارائه شده است. در رابطه (۴) K_{LM} ضریب تبدیل بار-جرم و $\eta(t)$ بار جانبی معادل هستند که به ترتیب مطابق با رابطه (۵) و رابطه (۶) محاسبه می‌شوند.

$$K_{LM} M \ddot{y} + R(y) = F(t) + \eta(t) \quad (4)$$

$$K_{LM} = \frac{K_M}{K_L} \quad (5)$$

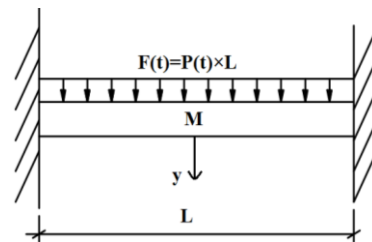
$$\eta(t) = \frac{K_G}{K_L} y(t) \quad (6)$$

در رابطه (۶)، K_G سختی هندسی سامانه است که بر اساس رابطه (۷) قابل محاسبه است. در این رابطه، N نیروی محوری و Φ' مشتق اول تابع تغییر شکل عضو است.

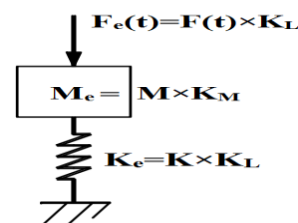
$$K_G = N \int_0^L \Phi'(x)^2 dx \quad (7)$$

در این مقاله جهت حل معادله دیفرانسیل از تحلیل عددی گام‌به‌گام و روش شتاب خطی [۱۷]، با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب نشان دهنده یک عضو تحت بارگذاری انفجار و سامانه یک درجه آزادی معادل عضو هستند.



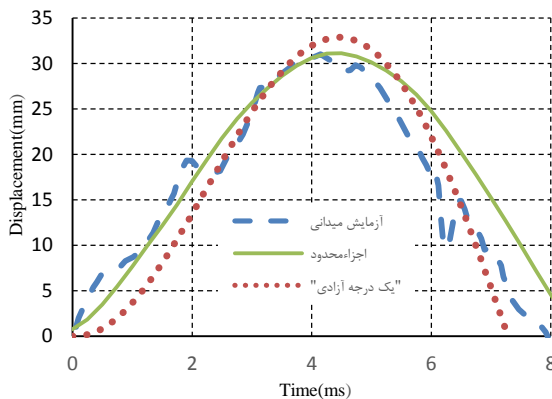
شکل ۴. عضو سازه‌ای دو سر گیردار تحت اثر بار انفجار



شکل ۵. سامانه یک درجه آزادی معادل عضو سازه‌ای

در مقیاس آزمایشگاهی برای حداکثر فشار انعکاسی Pr_{max} و مدت زمان فاز مثبت انفجار t_0 به ترتیب مقادیر ۱۵۶۰ کیلوپاسکال و ۶/۲ میلی‌ثانیه ثبت شده است. حداکثر جابه‌جایی به دست آمده از نتایج آزمایش حدود ۳۱/۵ میلی‌متر ثبت شده است.

در نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار LS-DYNA و مدل سامانه یک درجه آزادی معادل، به ترتیب ۳۱/۱ میلی‌متر و ۳۲/۹ میلی‌متر جابه‌جایی برای وسط ستون محاسبه شده که اختلاف ۱ و ۴ درصد نسبت به مدل آزمایشگاهی برای هر کدام نشان می‌دهد. شکل (۱۰) جابه‌جایی وسط ستون را برای نتایج آزمایش انجام شده توسط نصر و مدل‌سازی‌های انجام شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

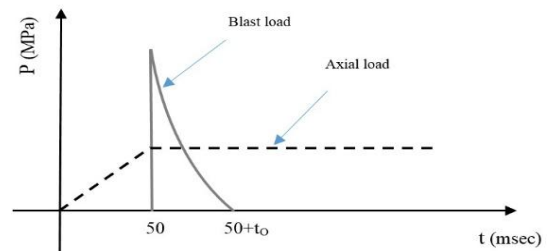


شکل ۱۰. مقایسه جابه‌جایی وسط ستون در مطالعه نصر و شبیه‌سازی عددی انجام شده در این مقاله

۴. نتایج و بحث

در این مقاله عضو انتخاب شده جهت تحلیل، یک ستون فولادی با مقطع IPBv200 و طول ۳/۶ متر است که مربوط به ساختمان فولادی ۳ طبقه طراحی شده در منطقه با خطر لرزه‌خیزی زیاد است. تنش تسلیم فولاد ۲۴۰ مگاپاسکال و چگالی آن ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. جهت در نظر گرفتن افزایش مقاومت فولاد ناشی از کرنش سریع، در سامانه یک درجه آزادی از ضریب افزایش دینامیکی فولاد برابر با ۱/۲۴ [۴] و در آنالیز اجزای محدود از رابطه (۸) استفاده شده است. بار ناشی از انفجار بر بال مقطع ستون وارد می‌شود. اکثر محققین در پژوهش‌های خود از نیروی محوری به میزان ۲۰ تا ۲۵ درصد ظرفیت محوری ستون استفاده کرده‌اند [۴ و ۱۲]. این نیروی محوری تقریباً معادل نیروی محوری یک ستون طراحی شده برای بارهای ثقلی و جانبی زلزله است هنگامی که فقط تحت اثر بارهای ثقلی قرار داشته باشد. در این پژوهش از میزان نیروی محوری برابر ۲۵ درصد ظرفیت ستون استفاده شده است.

$$P(t) = Pr_{max} \left(1 - \frac{t-t_a}{t_0}\right) \exp\left(-b \frac{t-t_a}{t_0}\right) \quad (9)$$



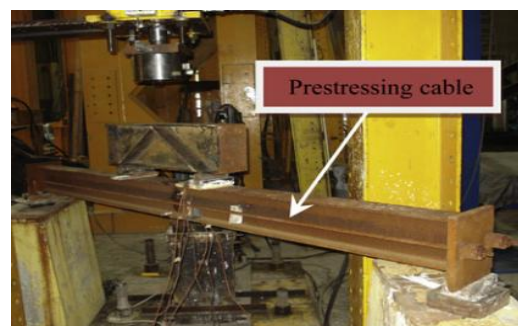
شکل ۷. مراحل اعمال بار محوری و بار انفجار بر ستون در نرم‌افزار LS-DYNA

۳. روش تحقیق

برای اطمینان از صحت مدل‌سازی انجام شده به روش سامانه یک درجه آزادی و مدل اجزای محدود، از نتایج آزمایش انجام شده توسط نصر و همکاران [۴ و ۱۸] استفاده شده است. این محققان تعدادی ستون فولادی بال‌پهن را تحت انفجارها با مقدار ماده منفجره و فاصله انفجار مختلف مورد بررسی قرار دادند. شکل (۸) و شکل (۹) به ترتیب نشان دهنده نحوه قرارگیری ستون‌ها در معرض انفجار و ستون فولادی پیش‌تنیده شده توسط کابل برای اعمال نیروی محوری هستند. در این پژوهش، ستون فولادی با مقطع W150X24 و تنش تسلیم فولاد ۴۷۰ مگاپاسکال که تحت ۲۷۰ کیلو نیوتن نیروی محوری قرار داشته و در معرض ۱۵۰ کیلوگرم ماده منفجره ANFO در فاصله ۹ متری از وجه بال ستون مورد آزمایش قرار گرفته، انتخاب شده است.



شکل ۸. نمای جلو از مدل آزمایشگاهی انفجار [۱۸]



شکل ۹. پیش‌تنیده کردن ستون با کابل جهت شبیه‌سازی نیروی محوری [۴]

سامانه یک درجه آزادی و روش تحلیل دینامیکی غیر خطی، حداکثر پاسخ عضو محاسبه شده است. احتمال تجاوز پاسخ سازه، از تقسیم تعداد پاسخ‌های بزرگ‌تر از مقدار مجاز بر تعداد کل آنالیزهای انجام شده (۵۰۰۰۰ عدد) به دست آمده است. برای مطمئن شدن از دقت نتایج، برای تعداد محدودی از سناریوهای انفجار، شبیه‌سازی با تعداد ۱۰۰۰۰، ۵۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ انجام و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است که تفاوت بسیار جزئی بوده و به علت زمان‌بر بودن تحلیل‌ها از تعداد ۵۰۰۰۰ شبیه‌سازی که دارای دقت قابل قبولی است، استفاده شده است. در جدول‌های (۲ و ۳) احتمال تجاوز پاسخ ستون به دست آمده در انفجارهای مختلف برای ستون‌ها با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی و گیردار نشان داده شده است.

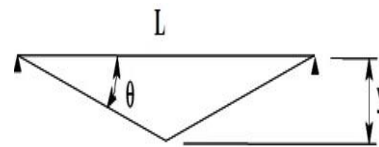
فاصله حفاظتی ایمن در این مقاله به حداقل فاصله مورد نیاز بین محل انفجار تا بر ستون سازه اطلاق می‌شود به گونه‌ای که دوران مفصل در تکیه‌گاه با حداقل احتمال ۹۵ درصد، حدود پذیرش مربوط به سطح عملکرد ایمنی جانی را ارضاء کند. بر اساس تعریف ارائه شده، فاصله حفاظتی برای سناریوهای مختلف رخداد انفجارهای تروریستی بر اساس وزن ماده منفجره و شرایط تکیه‌گاهی مفصلی و گیردار مطابق جدول (۴) خواهد بود.

احتمال خرابی به دست آمده از تحلیل اجزای محدود: در این بخش برای هر فاصله مربوط به انفجارهای مختلف تعداد ۱۰۰۰ شبیه‌سازی عددی برای متغیرهای تصادفی t_0 و Pr_{max} از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام شده است، در نتیجه جهت محاسبه احتمال خرابی در هر حالت نیاز به ۱۰۰۰ عدد مدل اجزای محدود است. برای انجام این حجم از مدل‌سازی، تحلیل مدل‌ها و استخراج نتایج از یک ترفند چند مرحله‌ای با به‌کارگیری نرم‌افزار متلب، LS-PrePost، کد نویسی به زبان C# و حلگر LS-DYNA جهت انجام سریع و خودکار این مراحل استفاده شده است. از آنجا که تحلیل ۱۰۰۰ مدل ستون فولادی به صورت اجزای محدود بسیار زمان‌بر است، احتمال خرابی در این بخش فقط برای فواصل انفجار نزدیک به اعداد داده شده در جدول (۴) محاسبه شده و نتایج در جدول‌های (۵ و ۶) آورده شده است.

لازم به ذکر است که استفاده از ۱۰۰۰ شبیه‌سازی در تحلیل اجزای محدود دارای دقت کافی بوده و برای صحت‌سنجی محاسبات، در برخی از بارهای انفجاری، نتایج با خروجی حاصل از ۲۰۰۰ شبیه‌سازی مونت‌کارلو مقایسه شده است و میزان خطا در محاسبه احتمال خرابی کمتر از یک درصد بوده است. در ضمن اکثر پژوهشگران قبلی از تعداد شبیه‌سازی به مراتب کمتر از ۱۰۰۰ در تحلیل‌های اجزای محدود استفاده کرده‌اند [۸، ۹ و ۱۲].

رفتار فولاد به صورت الاستوپلاستیک کامل در نظر گرفته شده است. منطق تعیین شرایط مرزی در دو حالت مفصلی کامل و صلب کامل به این صورت است که ستون با شرایط تکیه‌گاه مفصلی و صلب به ترتیب مربوط به سامانه‌های سازه‌ای قاب ساده مهاربندی شده و قاب خمشی مهاربندی شده هستند. در آیین‌نامه‌ها حدود پذیرش مربوط به پاسخ اعضای تحت اثر بار انفجار بر اساس زاویه دوران مفصل در تکیه‌گاه مشخص شده است که در این مقاله نیز از این معیار برای مقایسه پاسخ اعضا با حدود پذیرش تعیین شده توسط آیین‌نامه‌ها استفاده شده است. زاویه دوران مفصل در تکیه‌گاه مطابق با شکل (۱۱) و بر اساس رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود که در این رابطه، L طول عضو و y میزان جابه‌جایی وسط دهانه است.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{L/2}\right) \quad (10)$$



شکل ۱۱. زاویه دوران مفصل در تکیه‌گاه

احتمال خرابی به دست آمده از سامانه یک درجه آزادی معادل: یک روش برای جلوگیری از خسارت سازه‌ای ناشی از انفجار تروریستی دور کردن محل انفجار از سازه است. با این منطق، در این پژوهش با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد به دنبال حداقل فاصله ایمن برای انفجارهای مختلف هستیم که با توجه به معیارهای پذیرش موجود در آیین‌نامه‌ها کمترین خسارت سازه‌ای به ساختمان وارد شود. حدود پذیرش تغییر شکل ستون فولادی بر اساس مقادیر تعیین شده توسط آیین‌نامه طراحی سازه‌های پتروشیمی [۱۶] انتخاب شده است. این مقادیر بر اساس نوع عضو سازه‌ای و میزان تغییر شکل مجاز سازه بر حسب چرخش تکیه‌گاه و نسبت شکل‌پذیری تعیین می‌شود.

در این مقاله مقدار مجاز پاسخ بر اساس زاویه دوران تکیه‌گاه برای سطوح عملکرد آستانه فروریزش، ایمنی جانی و استفاده بی‌وقفه به ترتیب ۲، ۱/۵ و ۱ درجه اتخاذ شده است. برای انجام تحلیل قابلیت اعتماد و به دست آوردن احتمال تجاوز تغییر شکل‌ها از مقادیر مجاز، ابتدا مقدار میانگین Pr_{max} و t_0 در انفجارهای مختلف با W و R مشخص بر مبنای مباحث ارائه شده در بخش ۲ محاسبه شده است، سپس با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و بر اساس تابع توزیع متغیرهای تصادفی Pr_{max} و t_0 تعداد ۵۰۰۰۰ شبیه‌سازی عددی برای این دو متغیر انجام شده و برای تمامی اعداد شبیه‌سازی شده با استفاده از

جدول ۲. احتمال تجاوز پاسخ ستون از مقادیر مجاز با شرایط مرزی دوسر مفصل از روش سامانه یک درجه آزادی معادل

جرم ماده منفجره بر حسب کیلوگرم TNT	فاصله انفجار تا ستون بر حسب متر	درصد احتمال تجاوز زاویه چرخش تکیه‌گاه از ۱ درجه	درصد احتمال تجاوز زاویه چرخش تکیه‌گاه از ۱/۵ درجه	درصد احتمال تجاوز زاویه چرخش تکیه‌گاه از ۲ درجه
۳۰	۴	۵۴	۱۴	۳
	۵	۵	<۱	<۱
۲۰۰	۸	۷۱	۳۳	۱۴
	۹	۴۴	۸	۱
	۱۰	۱۶	<۱	<۱
	۱۱	۳	<۱	<۱
۴۰۰	۱۱	۶۰	۱۹	۶
	۱۲	۳۷	۵	<۱
	۱۳	۱۶	۱	<۱
	۱۴	۴	<۱	<۱
۶۰۰	۱۳	۵۵	۱۵	۴
	۱۴	۳۵	۴	<۱
	۱۵	۱۸	<۱	<۱
	۱۶	۶	<۱	<۱

جدول ۳. احتمال تجاوز پاسخ ستون از مقادیر مجاز با شرایط مرزی دوسرگيردار از روش سامانه یک درجه آزادی معادل

جرم ماده منفجره بر حسب کیلوگرم TNT	فاصله انفجار تا ستون بر حسب متر	درصد احتمال تجاوز زاویه چرخش تکیه‌گاه از ۱ درجه	درصد احتمال تجاوز زاویه چرخش تکیه‌گاه از ۱/۵ درجه	درصد احتمال تجاوز زاویه چرخش تکیه‌گاه از ۲ درجه
۳۰	۲	۶۰	۳۳	۱۷
	۳	۲۹	۹	۳
	۴	<۱	<۱	<۱
۲۰۰	۶	۴۸	۲۹	۱۸
	۷	۸	۲	<۱
	۸	<۱	<۱	<۱
۴۰۰	۸	۳۹	۲۲	۱۳
	۹	۹	۳	<۱
۶۰۰	۹	۴۸	۳۱	۲۱
	۱۰	۱۸	۷	۳
	۱۱	۳	<۱	<۱

جدول ۴. فاصله حفاظتی ایمن مربوط به انفجارهای مختلف بر اساس سامانه یک درجه آزادی معادل

جرم ماده منفجره بر حسب کیلوگرم TNT	۳۰	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰
فاصله حفاظتی برای ستون دوسر مفصل	۵	۱۰	۱۲	۱۴
فاصله حفاظتی برای ستون دوسرگيردار	۴	۷	۹	۱۱

۱- یک سناریو بار انفجار بر اساس وزن ماده منفجره و فاصله انفجار از سازه در نظر گرفته شده است.

۲- بر اساس مطالب ارائه شده در بخش ۴، به تعداد ۱۰۰۰

تحلیل قابلیت اعتماد با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و استفاده از تحلیل مدل اجزای محدود در حلگر LS-DYNA بر اساس مراحل ذیل انجام شده است:

تحلیل فایل‌های متنی در نرم‌افزار متلب استخراج شده و مقدار حداکثر دوران مفصل برای هر نمونه محاسبه شده است.

۷- بر اساس نتایج به‌دست آمده، مطالعات آماری و محاسبه احتمال تجاوز تغییر شکل‌ها از مقادیر مجاز انجام شده است.

در شکل (۱۲) مراحل ۳ تا ۶ شامل مدل‌سازی، تحلیل و استخراج مدل‌های اجزای محدود برای محاسبه احتمال خرابی ستون نشان داده شده است. فرآیند تعیین فاصله ایمن در این بخش نیز همانند بخش سامانه یک درجه آزادی مطابق با جدول (۷) به‌دست آمده است.

نتایج ارائه شده در جدول (۷) با نتایج ارائه شده در جدول (۴) که بر اساس آنالیز سازه یک درجه آزادی است، مقداری متفاوت است. واضح است که نتایج تحلیل اجزای محدود به مراتب دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتر از نتایج یک درجه آزادی است. البته در این پژوهش، زمان تحلیل سازه یک درجه آزادی در حدود ۱۰ دقیقه و زمان تحلیل اجزای محدود در حدود ۹ ساعت بوده است که استفاده از روش سامانه یک درجه آزادی را توجیه می‌نماید.

نتایج این دو تحلیل در انفجارهای با وزن ماده منفجره کم در فاصله نزدیک از ساختمان کاملاً با یکدیگر تطابق دارد و برای وزن‌های بیشتر با فواصل دورتر از ساختمان، تحلیل اجزای محدود مقدار جابه‌جایی بیشتری را در ستون‌ها محاسبه می‌کند که در نتیجه فاصله ایمن محافظه کارانه‌تری را ارائه می‌نماید. نتایج تحقیقات سایر پژوهشگران نیز مشابه تحقیق حاضر بوده و جابه‌جایی به‌دست آمده از روش اجزای محدود در اکثر موارد بیش از حالت یک درجه آزادی بوده است [۴].

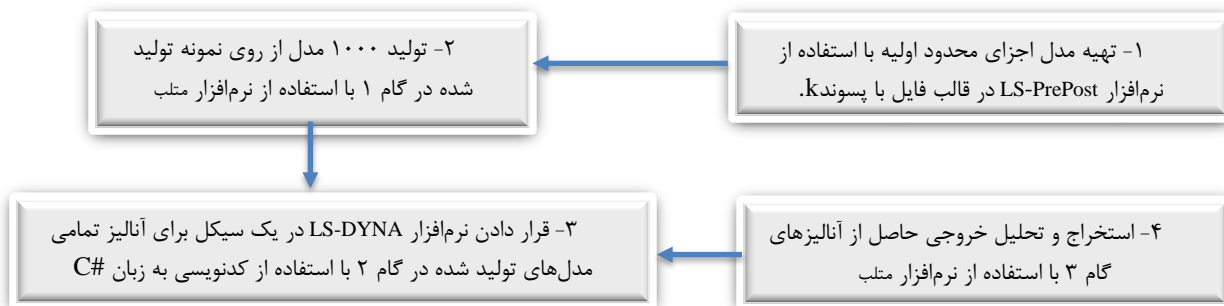
شبیه‌سازی برای متغیرهای تصادفی t_0 و Pr_{max} انجام شده است.

۳- ستون فولادی مورد بررسی بر اساس مقادیر میانگین متغیرهای تصادفی در نرم‌افزار LS-PrePost شبیه‌سازی شده و در قالب فایل با پسوند k. ذخیره‌سازی شده است (فایل ذخیره شده در این قالب به صورت فایل متنی قابل مشاهده و ویرایش است).

۴- با استفاده از قابلیت ویرایش فایل‌های متنی در نرم‌افزار متلب، فایل اصلی تولید شده در مرحله قبل مورد بررسی قرار گرفته و متغیرهای تصادفی تولید شده در روش مونت‌کارلو به ترتیب در مدل اصلی جایگزین شده و به عنوان یک مدل جدید ذخیره‌سازی شده‌اند. تفاوت فایل‌های تولید شده در این مرحله با فایل شبیه‌سازی شده اصلی در نرم‌افزار LS-PrePost تنها در مقادیر جایگزین شده به عنوان متغیرهای تصادفی است و سایر بخش‌ها مانند شکل هندسی، مش‌بندی و شرایط مرزی همانند مدل اولیه است. بنابراین در پایان این مرحله به تعداد شبیه‌سازی‌های انجام شده در روش مونت‌کارلو، مدل به صورت اجزای محدود از ستون فولادی تولید شده است.

۵- در این مرحله می‌بایست تمامی مدل‌های تولید شده در مرحله قبل توسط حلگر LS-DYNA آنالیز شده و نتایج مورد نظر ذخیره شود. با توجه به امکانات در نظر گرفته شده در نرم‌افزار LS-DYNA می‌بایست تک‌تک نمونه‌ها به صورت دستی وارد نرم‌افزار شده و نتایج مشاهده شود که این روش بسیار زمان‌بر است. برای انجام این مرحله، با استفاده از برنامه‌نویسی به زبان C# تمامی فایل‌های مدل‌سازی شده به ترتیب و به صورت خودکار به نرم‌افزار LS-DYNA وارد شده و پس از پایان هر تحلیل خروجی مورد نظر (تاریخچه جابه‌جایی گره وسط ستون) ذخیره شده است.

۶- مقدار حداکثر مربوط به هر تاریخچه زمانی توسط قابلیت



شکل ۱۲. مراحل مدل‌سازی، تحلیل و استخراج مدل‌های اجزای محدود برای استخراج احتمال خرابی ستون

جدول ۵. محاسبه احتمال خرابی ستون دوسر مفصل با استفاده از تحلیل اجزای محدود

جرم ماده منفجره بر حسب کیلوگرم TNT	فاصله انفجار تا ستون بر حسب متر	درصد احتمال تجاوز زاویه چرخش تکیه‌گاه از ۱ درجه	درصد احتمال تجاوز زاویه چرخش تکیه‌گاه از ۱/۵ درجه	درصد احتمال تجاوز زاویه چرخش تکیه‌گاه از ۲ درجه
۳۰	۵	۶	<۱	<۱
۲۰۰	۱۱	۸	۲	<۱
۴۰۰	۱۴	۱۴	۳	<۱
۶۰۰	۱۶	۲۰	۶	۲

جدول ۶. محاسبه احتمال خرابی ستون دوسرگیردار با استفاده از تحلیل اجزای محدود

جرم ماده منفجره بر حسب کیلوگرم TNT	فاصله انفجار تا ستون بر حسب متر	درصد احتمال تجاوز زاویه چرخش تکیه‌گاه از ۱ درجه	درصد احتمال تجاوز زاویه چرخش تکیه‌گاه از ۱/۵ درجه	درصد احتمال تجاوز زاویه چرخش تکیه‌گاه از ۲ درجه
۳۰	۴	<۱	<۱	<۱
۲۰۰	۸	۲	<۱	<۱
۴۰۰	۹	۲۹	۱۴	۲
۶۰۰	۱۱	۱۶	۵	۲

جدول ۷. فاصله حفاظتی ایمن نهایی به‌دست آمده از روش تحلیل اجزای محدود

جرم ماده منفجره بر حسب کیلوگرم TNT	۳۰	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰
فاصله حفاظتی برای ستون دوسر مفصل	۵	۱۱	۱۴	۱۷
فاصله حفاظتی برای ستون دوسرگیردار	۴	۸	۱۰	۱۱

۵. نتیجه‌گیری

۶. مراجع

- [1] Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-02) "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US Department of Defence, Washington DC. 2008.
- [2] Mays, G. C.; Smith, P. D.; Cormie, D. "Blast Effects on Buildings"; Thomas Telford Service Ltd: London, 2009.
- [3] Hadianfard, M. A.; Farahani, A.; Jahromi, A. B. "On the Effect of Steel Columns Cross Sectional Properties on the Behaviours When Subjected to Blast Loading"; J. Struct. Mech. 2012, 44, 449-463.
- [4] Nassr, A. A.; Razaqpur, A. G.; Tait, M. J.; Campidelli, M.; Foo, S. "Strength and Stability of Steel Beam Columns under Blast Load"; Int. J. Impact Eng. 2013, 55, 34-48.
- [5] Sadrnejad, S. A.; Ziaei, M. "Behavior of Beam-Column Bolted End-Plate Connections Under Blast"; J. Adv. Defence Sci. & Tech. 2013, 42, 93-101 (In Persian).
- [6] Shiravand, M. R.; Shabani, M. J. "The Evaluation of the Special Moment Frame and Braced Frame Systems Performance under Blast Loadings in the Steel Structures"; J. Adv. Defence Sci. & Tech. 2013, 42, 109-114 (In Persian).
- [7] Hadianfard, M. A.; Nemati, A.; Johari, A. "Investigation of Steel Column Behavior with Different Cross Section under Blast Loading"; Modares Civil Eng. J. 2016, 16, 265-278 (In Persian).
- [8] Low, H.; Hao, H. "Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Explosive Loading"; Struct. Safety 2001, 23, 157-78.
- [9] Rong, H.; Li, B. "Probabilistic Response Evaluation for RC Flexural Members Subjected to Blast Loadings"; Struct. Safety 2007, 29, 146-163.
- [10] Hao, H.; Stewart, M. G.; Li, Z. X.; Shi, Y. "RC Column Failure Probabilities to Blast Loads"; Int. J. Protective Struct. 2010, 1, 571-91.

یکی از روش‌های جلوگیری از تخریب سازه‌ها در اثر انفجارهای تروریستی، به‌کارگیری تمهیداتی در محوطه‌سازی جهت محدود کردن دسترسی به فضای اطراف سازه و در نتیجه دور کردن محل انفجار از سازه است. در این مقاله با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد و با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به متغیرهای بارگذاری انفجار احتمال تجاوز پاسخ ستون‌های فولادی تحت اثر انفجار از مقادیر مجاز بر اساس دوران تکیه‌گاهی محاسبه شده است. حدود پذیرش در سه سطح استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش در نظر گرفته شده است. از روش سامانه یک درجه آزادی معادل و روش آنالیز اجزای محدود برای به‌دست آوردن احتمال خسارت سازه‌ای بر اساس معیارهای پذیرش استفاده شد. فواصل حفاظتی تعیین شده بر اساس نتایج حاصل از سامانه یک درجه آزادی معادل مورد تحلیل مجدد توسط روش اجزای محدود قرار گرفت و در برخی از حالات حد ایمنی تعیین شده اصلاح گردید، اما به طور کلی هنگامی که تغییر شکل‌های ایجاد شده در ستون بزرگ نباشد، نتایج سامانه یک درجه آزادی معادل، دارای دقت کافی است. از آنجا که رفتار واقعی اعضاء در سامانه‌های سازه‌ای به طور مطلق مفصلی یا گیردار نیست، می‌توان مقادیر میانگین را به عنوان فاصله حفاظتی در نظر گرفت. در نهایت فواصل حفاظتی ایمن، بر اساس محاسبات انجام شده در این پژوهش، برای مقادیر ماده منفجره ۳۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم TNT به ترتیب برابر با ۴/۵، ۹/۵، ۱۲ و ۱۴ متر پیشنهاد می‌شود.

- [15] Biggs, J. M. "Introduction to Structural Dynamics"; McGraw-Hill Book Company: New York, 1998.
- [16] Bounds, W. L.; King, P. T. "Design of Blast Resistant Building in Petrochemical Facilities"; ASCE Task Comm. Rep. Blast Resist. Des. 2010.
- [17] Clough, R. W.; Penzien, J. "Dynamics of Structures"; Copyright of Applied Mechanics & Materials, 1993.
- [18] Nassr, A. A.; Razaqpur, A. G.; Tait, M. J.; Campidelli, M.; Foo, S. "Dynamic Response of Steel Columns Subjected to Blast Loading"; J. Struct. Eng. 2013, 140, 04014036.
- [11] Netherton, M. D.; Stewart, M. G. "Blast Load Variability and Accuracy of Blast Load Prediction Models"; Int. J. Protective Struct. 2010, 1, 543-70.
- [12] Shi, Y.; Stewart, M. G. "Spatial Reliability Analysis of Explosive Blast Load Damage to Reinforced Concrete Columns"; Struct. Safety 2015, 53, 13-25.
- [13] US Department of Homeland Security "Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings"; FEMA426, Risk Management Series, 2003.
- [14] Hadianfard, M. A.; Razani, R. "Effect of Semi-Rigid Behavior of Connections in the Reliability of Steel Frames"; Struct. Safety, 2003, 25, 123-138.

