

# فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال، ششم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶، (پیاپی ۳۲): صص ۳۷-۲۹

## تخمین پاسخ ستون‌های بتن مسلح تحت بارگذاری انفجار

محمد اسماعیل نیا عمران<sup>۱\*</sup>، سمیه ملایی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۱۴

### چکیده

افزایش روزافزون خطر بروز انفجار در نواحی شهری موجب شده است که صاحبان ساختمان‌ها، دولت‌ها و هم‌چنین پژوهشگران به دنبال درک بهتر پاسخ سامانه‌های ساختمانی موجود تحت بارگذاری انفجار باشند. در ساختمان‌های بتن مسلح تحت انفجار خارج از ساختمان، ستون‌های خارجی آسیب‌پذیرترین و بحرانی‌ترین اعضای سازه‌ای محسوب می‌گردد. در اغلب مطالعات انجام گرفته در زمینه بررسی اثر انفجار بر اعضای سازه‌ای به‌ویژه ستون‌های بتن مسلح، از بسته‌های نرم‌افزار اجزای محدود تخصصی (هیدروکدها) استفاده شده است. کاربرد هیدروکدها احتیاج به دانش و تخصص بالا داشته و نتایج حاصل از آن‌ها بسیار وابسته به کاربر است. در این‌جا، به مطالعه اثرات انفجار نزدیک بر ستون‌های بتن مسلح معمولی که در برابر بارهای ثقلی طراحی شده‌اند، پرداخته شده است. به این منظور از قابلیت‌های نرم‌افزار اجزای محدود OpenSees در تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌ها بهره گرفته شده است. یک روش ساده برای وارد کردن اثرات نرخ کرنش در تحلیل تحت بارگذاری انفجار پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی با این نرم‌افزار، با استفاده از نتایج ثبت‌شده در آزمایش‌های انفجار با مقیاس واقعی، اعتبارسنجی شده است. مطابق با مهم‌ترین نتایج حاصل، مدل‌سازی اجزای محدود ضمنی با استفاده از OpenSees مقدار تغییرشکل جانبی ستون بتن مسلح را با دقت قابل قبولی محاسبه می‌کند. طبق نتایج تحلیل‌های انجام گرفته، میزان ضربه حاصل از انفجار بر ستون به اندازه فشار وارد بر وجه ستون، اهمیت دارد؛ هم‌چنین، باید بارمحوری موجود در ستون را در مدل‌سازی و تحلیل آن تحت انفجار جانبی در نظر گرفته شود.

**کلیدواژه‌ها:** بارگذاری انفجار، ستون بتن مسلح، نرم‌افزار OpenSees، تغییر شکل جانبی، نسبت بارمحوری.

۱- استادیار دانشگاه کردستان، m.esmaeilnia@uok.ac.ir - نویسنده مسئول

۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه کردستان

## ۱- مقدمه

ستون تحت انفجار نزدیک از نرم‌افزار ABAQUS/Explicit استفاده شده است. در مراجع [۱ و ۱۱-۱۰] مطالعاتی به روی پارامترهای مؤثر بر رفتار ستون‌های بتن مسلح تحت انفجار با استفاده از هیدروکد LS-DYNA صورت گرفته است. در مرجع [۱۲] نیز مدل‌سازی مشابهی با هیدروکد DYNA3D انجام شده است.

هیدروکدها، نوعی از نرم‌افزارهای اجزای محدود صریح هستند که براساس اصول بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی استوار بوده و مخصوص مدل‌سازی پدیده‌های دینامیکی شدید همانند ضربه، برخورد و انفجار طراحی شده‌اند. استفاده صحیح از نرم‌افزارهای اجزای محدود صریح و هیدروکدها برای بارگذاری و تحلیل انفجاری سازه‌ها، نیازمند دانش، مهارت و تجربه‌ی فراوانی است.

بارهای انفجاری که ماهیت دینامیکی گذرا دارند می‌توانند موجب بروز رفتار غیرخطی شدید در سازه شوند. در میان بسته‌های نرم‌افزاری اجزای محدود ضمنی<sup>۴</sup> که کاربردهای ساده‌تر و فراگیرتری دارند، نرم‌افزار OpenSees<sup>۵</sup> می‌تواند گزینه مناسبی برای مدل‌سازی و تحلیل سازه‌های ساختمانی تحت انفجار باشد. نرم‌افزار OpenSees یک نرم‌افزار کدباز است که با استفاده از روش اجزا محدود به تحلیل انواع سازه‌ها می‌پردازد. از مزایای این نرم‌افزار سرعت بالا، باز بودن کدها، عرضه رایگان، خروجی متنی و کم‌حجم، امکان برنامه‌نویسی انعطاف‌پذیر و قدرت بالا در تحلیل دینامیکی سازه‌ها است [۱۳]. با توجه به این ویژگی‌ها، به نظر می‌رسد بتوان از این نرم‌افزار جهت تخمین پاسخ اعضای سازه‌ای تحت بارهای انفجاری بهره گرفت.

در این جا به مطالعه اثرات انفجار نزدیک، بر ستون‌های بتن مسلح معمولی (فاقد مقاوم‌سازی)، با مقطع مستطیلی، با استفاده از نرم‌افزار OpenSees پرداخته شده است. یک روش ساده برای واردکردن اثرات نرخ کرنش در این نرم‌افزار ارائه شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار OpenSees، جهت اعتبارسنجی با نتایج آزمایش واقعی انفجار مقایسه شده است. در ادامه، با استفاده از مدل‌های عددی ایجادشده، اثر پارامترهای مختلف طراحی بر رفتار و پاسخ ستون بتن مسلح تحت انفجار مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- بارگذاری انفجار

در لحظه رسیدن موج انفجار به سازه، فشار محیط پرش ناگهانی پیدا کرده و تا مقدار حداکثر اضافه فشار مبنا (Pso) افزایش می‌یابد. در صورتی که هرگونه سطح بازتابنده در نقطه مورد نظر وجود داشته باشد، مقدار پرش فشاری در لحظه رسیدن موج انفجار، برابر با

پدافند غیرعامل نوعی دفاع غیرنظامی است و به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌گردد که به جنگ‌افزار نیاز ندارد و با اجرای آن می‌توان از واردشدن خسارات مالی به تجهیزات و تأسیسات حیاتی و حساس نظامی و غیرنظامی و تلفات انسانی جلوگیری نموده و یا میزان این خسارات و تلفات را به حداقل ممکن کاهش داد. افزایش روزافزون خطر بروز انفجار در نواحی شهری موجب شده است که صاحبان ساختمان‌ها، دولت‌ها و هم‌چنین پژوهشگران به دنبال درک بهتر پاسخ سیستم‌های ساختمانی موجود تحت بارگذاری انفجار باشند. چنین ساختمان‌هایی در برابر بارگذاری‌های دینامیکی شدید همانند ضربه، برخورد و انفجار طراحی نشده‌اند. بنابراین، بررسی و مطالعه رفتار آن‌ها تحت این نوع بارها می‌تواند در ارزیابی آسیب‌پذیری و انتخاب روش مناسب جهت رسیدن به اهداف پدافند غیرعامل در آن‌ها بسیار مفید باشد. ستون‌ها، اعضای باربر کلیدی در سازه‌های ساختمانی محسوب می‌شوند. در انفجارهای خارجی در مجاورت ساختمان‌ها، ستون‌های خارجی آسیب‌پذیرترین اعضای سازه‌ای می‌باشند [۱]. از طرف دیگر، خرابی ستون یکی از مهم‌ترین علت‌های تخریب پیش‌رونده در سازه‌های قابی است. در شرایط بارگذاری شدید، با خرابی یک یا چند ستون و نبود مسیرهای کافی برای بازتوزیع نیروهای ستون حذف‌شده، در اعضای سازه‌ای اطراف ستون مذکور خرابی ایجاد می‌گردد که به تدریج به سایر بخش‌های سازه‌ای منتقل می‌گردد. این پدیده به تخریب پیش‌رونده موسوم بوده و از علل اصلی تلفات جانی پس از بروز حوادثی چون انفجار محسوب می‌شود. مواردی معروف از این نوع خرابی سیستم‌های سازه‌ای شامل ساختمان رونان پوینت<sup>۱</sup> و ساختمان فدرال آلفرد مورا<sup>۲</sup> است [۳-۲].

پژوهش‌های فراوانی، با تمرکز بر مطالعه پاسخ اعضای سازه‌ای مختلف در ساختمان‌ها تحت انفجار، انجام یافته است. به علت هزینه‌های بسیار بالا، سختی کار و محدودیت‌ها و موانع قانونی موجود در انجام آزمایش‌های عملی انفجار، استفاده از مدل‌سازی عددی برای این نوع مطالعات راه کار مناسبی محسوب می‌شود. بسیاری از مدل‌سازی‌های عددی انجام‌یافته جهت مطالعه‌ی رفتار ستون‌های بتن مسلح تحت انفجار توسط نرم‌افزارهای اجزای محدود صریح<sup>۳</sup>، که بر اساس فیزیک محاسباتی نوشته شده‌اند، صورت گرفته است.

در مراجع [۴-۶] به استفاده از پوشش‌های پلیمری به منظور افزایش مقاومت ستون‌های بتن مسلح، با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN، پرداخته شده است. در مراجع [۷-۹] جهت تحلیل

4- implicit finite element

5- Open System for Earthquake Engineering Simulation

1- Ronan Point Building

2- Alfred Murrah Federal Building

3- explicit finite element

انفجار نیم‌کروی<sup>۲</sup> (انفجار سطحی) به حالتی اشاره دارد که مواد منفجره به روی سطح زمین و یا با فاصله کمی از زمین، که نسبت به فاصله از سازه نسبتاً کوچک است، منفجر شده و به صورت موج نیم-کروی انتشار می‌یابد [۱۵ و ۲۰]. امواج حاصل از انفجارهای سطحی، انرژی برابر با ۱/۸ برابر انرژی امواج انفجار مشابه در هوای آزاد دارد [۲۰]. به عبارت دیگر، پارامترهای محاسبه‌شده برای موج انفجار کروی (که در آن فاصله مرکز انفجار از سطح زمین نسبت به فاصله آن از سازه، خیلی بیشتر است)، در صورتی که در ضریب ۱/۸ ضرب شوند، تخمینی برای مشخصات موج انفجار نیم‌کروی به دست خواهد آمد.

قانون مقیاس ریشه سوم<sup>۳</sup> به منظور تخمین مشخصات امواج حاصل از انفجار به کار می‌رود [۲۲]. این قانون مقیاس که با نام قانون هایکینسون-کرانز<sup>۴</sup> هم شناخته می‌شود، در حالت انفجار در شرایط اتمسفر در تراز دریا کاربرد دارد [۲۳]. مطابق با قانون ریشه سوم، مواد منفجره با اندازه‌ها و وزن‌های مختلف که در فواصل مقیاس شده یکسان منفجر می‌شوند، موجب تولید امواج انفجار با مشخصات مشابه می‌گردند [۲۰ و ۲۴]. بیان ریاضی فاصله مقیاس شده (Z) به صورت روابط (۱) و (۲) است [۲۲].

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (2)$$

در این روابط، W جرم معادل TNT ماده منفجره برحسب kg (وزن خرج) و R فاصله مرکز انفجار از نقطه موردنظر (فاصله رویارویی) برحسب m است. پرکاربردترین روابط تحلیلی موجود برای محاسبه پارامترهای پیشانی موج انفجار کروی به صورت روابط (۳) تا (۵) است که توسط رانکین-هوگونیت<sup>۵</sup> پیشنهاد شده است [۲۰].

$$U_s = a_0 \sqrt{\frac{6P_{so} + 7P_0}{7P_0}} \quad (3)$$

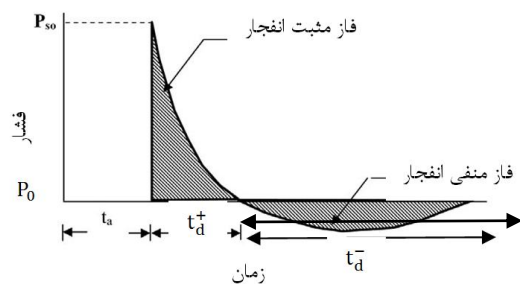
$$q_s = \frac{5P_{so}^2}{2(P_{so} + 7P_0)} \quad (4)$$

$$P_r = 2P_s \left( \frac{7P_0 + 4P_{so}}{7P_0 + P_{so}} \right) \quad (5)$$

در روابط فوق،  $U_s$  سرعت پیشانی موج،  $P_0$  فشار جو (معمولاً ۱ بار و یا ۰/۱ MPa) و  $a_0$  سرعت صوت در هوا تحت فشار  $P_0$  است (معمولاً ۳۳۵-۳۴۰ m/s).

مقدار  $P_{so}$  در حالت انفجار کروی با فاصله نزدیک (یعنی bar  $P_{so} > 10$ ) مطابق رابطه (۶) و در حالت دور ( $0 > P_{so} > 0.1$  bar) رابطه (۷) محاسبه می‌شود [۲۵].

حداکثر فشار بازتابی (Pro) خواهد بود. زمان تداوم فاز مثبت انفجار و یا زمانی که اضافه فشار بیشتر از فشار اتمسفر ( $P_0$ ) است، با  $t_d^+$  نشان داده شده و زمان تداوم فاز منفی یعنی زمانی که فشار کمتر از فشار اتمسفر است (مکش)، با  $t_d^-$  نمایش داده می‌شود. سطح زیر منحنی فشار-زمان نشان‌دهنده ضربه حاصل از موج انفجار است که می‌تواند به صورت ضربه ویژه مبنا (Iso) و یا ضربه ویژه بازتابی (Ir) باشد. ضربه حاصل از انفجار، نشان‌دهنده مقدار انرژی منتقل شده به سازه در طی بارگذاری انفجار است [۱۵-۱۴]. در کاربردهای عملی، می‌توان یک منحنی فشار-زمان ایده‌آل همانند شکل (۱) برای فشار حاصل از انفجار تعریف کرد [۱۴].



شکل (۱): منحنی ایده‌آل فشار-زمان در انفجار هوایی [۱۴]

انتشار امواج انفجار (امواج مبنا) در تمامی جهات در اطراف ماده منفجره بوده و در صورت برخورد به هر ماده‌ای که چگالی آن بیشتر از چگالی محیط واسط باشد، بازتاب پیدا می‌کند. فشار موج بازتاب‌شده (موج بازتابی) همواره بیشتر از فشار موج مبنا است و می‌تواند تا ۱۲ برابر بزرگ‌تر باشد [۱۵]. زمانی که طول می‌کشد تا موج مبنا از مرکز انفجار به نقطه مورد نظر برسد، زمان رسیدن موج انفجار ( $t_a$ ) نام دارد.

در زمان عبور موج انفجار از یک نقطه مشخص، در این نقطه علاوه بر اضافه فشار (بازتابی یا مبنا)، یک فشار دینامیکی  $q_s$  نیز ایجاد می‌شود. فشار دینامیکی، حاصل از جریان (سرعت) هوای ایجادشده در پشت پیشانی موج انفجار است و با عنوان فشار درگ<sup>۱</sup> نیز نامیده می‌شود [۱۶]. در ستون‌های بتن مسلح، اغلب پاسخ جانبی حداکثر تحت فاز مثبت انفجار رخ داده و در نتیجه در بیشتر تحلیل‌ها از فاز منفی صرف‌نظر می‌گردد [۱۷]. در این مقاله نیز، طبق توصیه مراجع مختلف همانند [۲۱-۱۸] از فاز منفی انفجار صرف‌نظر شده است. در کاربردهای عملی و یا اهداف طراحی، تغییرات زمانی فشار انفجار در فاز مثبت را می‌توان به صورت خطی (مثلی) ایده‌آل‌سازی نمود [۱۶ و ۱۹-۱۸]. زمان تداوم این بار ایده‌آل با رابطه  $\frac{2I_r}{P_{ro}}$  تعیین می‌شود.

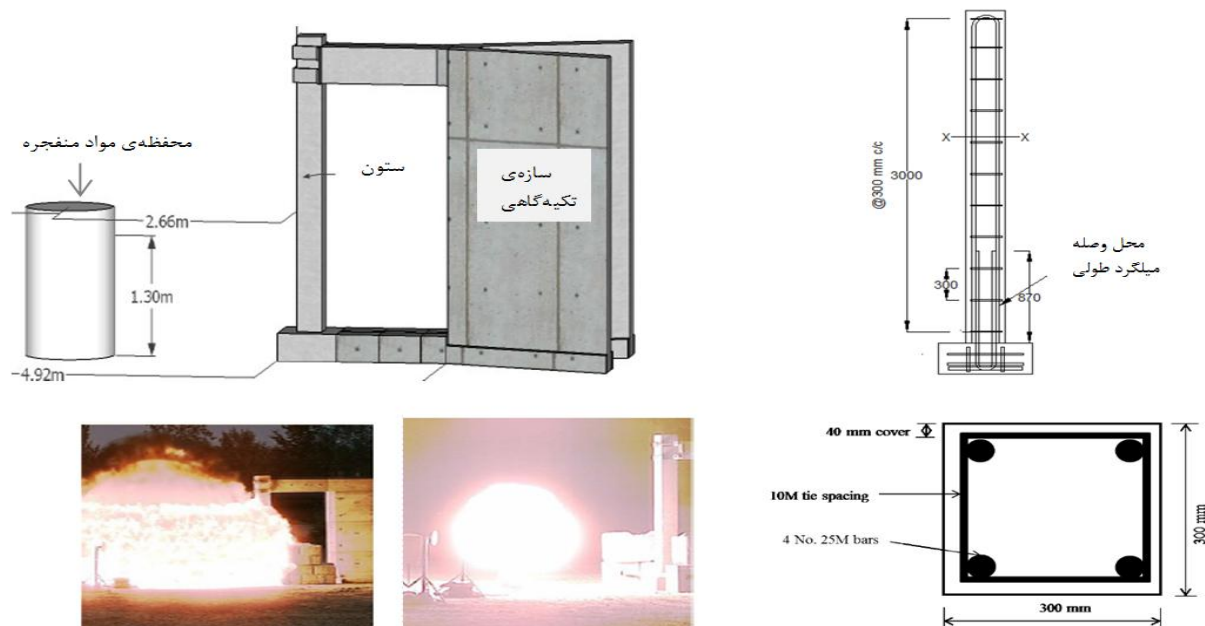
2- hemispherical air-burst

3- cube root scaling law

4- Hopkinson-Cranz

5- Rankine-Hugoniot

1- Drag pressure



شکل (۲): مشخصات هندسی ستون بتن مسلح و نحوه انجام آزمایش [۲۶]

ستون‌های طبقه اول یا هم‌کف یک ساختمان چندطبقه در حدود ۰/۳ گزارش شده است [۲۶]. در ستون مورد نظر در اینجا، بار محوری موجود در ستون ۱۰۲۷ kN (۱/۴ MPa) است که با استفاده از کابل‌های پس‌کشیدگی در نمونه ایجاد شده است؛ این میزان بار محوری معادل نسبت ALR برابر ۰/۳۲ است. در شکل (۲) تصاویری از مشخصات مدل ستون مورد آزمایش آورده شده است.

بارگذاری انفجاری به صورت انفجار ۱۵۰ kg ANFO (معادل kg TNT ۱۲۳) در فاصله ۲/۶ m از وجه ستون است. این انفجار فاصله مقیاس شده‌ای برابر با  $\frac{m}{kg^{1/3}} \cdot 0/52$  ایجاد می‌کند به طوری که مرکز انفجار به ارتفاع ۱/۳ m از سطح زمین فاصله دارد. سازه تکیه‌گاهی به گونه‌ای طراحی و ساخته شده است که شرایط قیود انتهایی گیردار برای ستون به درستی شبیه‌سازی گردد. در طی آزمایش، جابجایی جانبی در سه نقطه در ارتفاع، به فواصل ۱ m، ۱/۵ و ۲ از پای ستون ثبت شده است.

نرم‌افزار OpenSees یک نرم‌افزار کدباز و رایگان است که با استفاده از روش اجزای محدود به تحلیل انواع سازه‌ها می‌پردازد. این نرم‌افزار با استفاده از زبان برنامه‌نویسی TCL/TK توسط مرکز PEER<sup>۳</sup> تولید شده است که قابلیت گسترش و تولید انواع مقاطع سازه‌ای و غیرسازه‌ای در خصوص تحلیل را داراست [۱۳]. در اینجا، با استفاده از نسخه V(2.3.1) این نرم‌افزار، ستون مورد نظر به صورت یک عضو قائم که در انتهای زیرین گیردار کامل بوده و در انتهای فوقانی به صورت گیردار غلتکی (با آزادی حرکت در راستای محور

$$P_{so} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \quad (۶)$$

$$P_{so} = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \quad (۷)$$

### ۳- معرفی مدل

آزمایش‌هایی توسط فاروک<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ میلادی) [۲۶-۲۷] به روی نمونه‌های ستون بتن مسلح با مقطع مستطیلی تحت انفجار نزدیک انجام یافته است. ستون‌های مورد نظر، به صورت ستون عادی براساس ضوابط CAN/CSA A23.3-04 تحت بارهای ثقلی، طراحی و فولادگذاری شده و با مقیاس واقعی مورد آزمایش قرار گرفته است. ستون دو سر گیردار با مقطع مربعی به ابعاد ۳۰۰ mm و طول آزاد ۳ m بوده که با پوشش بتن ۴۰ mm، درصد فولاد طولی ۰/۰۲ (۴ میلگرد طولی به قطر ۲۵/۲ mm)، درصد فولاد عرضی ۰/۰۲۲ (خاموت بسته به قطر ۱۱/۳ mm با فواصل ۳۰۰ mm از میلگرد رده AIII و مقاومت فشاری مشخصه بتن ۴۰ MPa است. معمولاً، مقدار بار محوری ستون‌هایی که رفتارشان تحت بارهای انفجاری بررسی می‌گردد به صورت نسبتی از مقاومت محوری اسمی ستون تعریف می‌شود که این نسبت با توجه به مثال‌های عملی، معمولاً در بازه ۰/۱ - ۰/۴ است [۱۱ و ۱۲].

نسبت بار محوری موجود به ظرفیت محوری (ALR<sup>۲</sup>) برای

1- Farouk  
2 Axial Load Ratio

دست یافته است [۳۲ و ۳۵]. ضریب افزایش دینامیکی ( $DIF^1$ ) نسبت مقاومت دینامیکی مصالح به مقاومت استاتیکی آن را توصیف می‌کند و برای در نظر گرفتن افزایش مقاومت مصالح در نرخ کرنش‌های بالا، به کار می‌رود [۳۰ و ۳۴]. در چندین دستورالعمل و کد مرجع، همانند [۱۸، ۲۱، ۳۶ و ۳۷]، مقادیری برای ضرایب  $DIF$  پیشنهاد شده است. در این مقاله، در مرحله تحلیل دینامیکی تحت انفجار، مشخصات مقاومتی میلگردها و بتن با استفاده از ضرایب  $DIF$  بهبود داده شده است.

جهت مدل‌سازی ستون مورد نظر در OpenSees، برای مصالح فولاد از مدل Material Steel02 (الاستیک خطی - پلاستیک کامل با سخت‌شدگی) و برای بتن از مدل Concrete02 Material -- Linear Tension Softening (نرم‌شدگی کششی خطی) موجود در کتابخانه مصالح OpenSees استفاده شده است [۳۸]. جهت تخمین مقاومت بتن محصورشده در اثر وجود خاموت (فولاد عرضی) از مدل مصالح مندر استفاده شده است [۳۹]. در دستورات و الگوریتم‌های OpenSees هیچ پیش‌بینی و توصیه‌ای مبنی بر نحوه وارد کردن اثرات نرخ کرنش وجود ندارد. بنابراین، در این‌جا اعمال اثرات نرخ کرنش بر مشخصات دینامیکی مصالح با استفاده از ضرایب  $DIF$  تخمینی در UFC 3-340-02، که برای اهداف طراحی توصیه شده است، صورت می‌گیرد (جدول ۲). باید توجه داشت که این ضرایب فقط باید در مرحله تحلیل تحت بارگذاری انفجار به مدل اعمال گردد.

جدول (۲):  $DIF$  برای بتن (رده ۴۰) و میلگرد (AIII) [۱۸]

مقاومت فشاری بتن	مقاومت کششی بتن	مقاومت تسلیم فولاد	مقاومت نهایی فولاد
۱/۲۵	۱/۴	۱/۲	۱/۰۵

### ۳-۳- بارگذاری و تحلیل مدل

تحلیل مدل ستون مورد نظر شامل سه مرحله متمایز است؛ ابتدا ستون تحت یک مرحله تحلیل استاتیکی بدون در نظر گرفتن ضرایب  $DIF$  قرار می‌گیرد تا بار محوری آن، پیش از اثر انفجار، ایجاد گردد. در طی این مرحله، جابجایی گره‌ها در تکیه‌گاه غلتکی در راستای محور طولی ستون ثبت می‌گردد (مرحله اول تحلیل). سپس، مدل دینامیکی با استفاده از ضرایب  $DIF$  ایجاد شده و در طی یک تحلیل استاتیکی دیگر، جابجایی‌های تعیین‌شده از مرحله اول به همان گره‌ها اعمال می‌گردد (مرحله دوم تحلیل) و پس از آن تحلیل دینامیکی تحت بارگذاری جانبی انفجار صورت می‌گیرد (مرحله سوم تحلیل). به این ترتیب می‌توان برای انجام تحلیل دینامیکی تحت بارگذاری انفجار، مدل ستون را برای در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش، به‌روزرسانی کرد.

طولی ستون) مدل می‌شود. به علت تقارن هندسه و بارگذاری، مدل به‌صورت دوبعدی ساخته شده و اعضای طولی از نوع dispBeamColumn با ۱۰ نقطه انتگرال‌گیری در طول آن و به ابعاد ۱۰ cm انتخاب شده است. برای میلگردهای طولی از المان straight استفاده شده است. برای تعریف مقطع ستون، از مدل فیبر استفاده شده است که مقطع را به فیبرهای بتنی (با ابعاد ۳ cm) و میلگردهای فولادی تقسیم‌بندی می‌کند.

برای اجزای طولی ستون، سه اندازه مش مختلف به ابعاد mm ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ استفاده شده و مقدار جابجایی حداکثر در وسط دهانه در هر حالت ثبت و با نتایج آزمایش (۲۰ mm) مقایسه شده است. خلاصه نتایج در جدول (۱) آورده شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش ابعاد اجزای محدود، تخمین جابجایی به مقدار واقعی نزدیک‌تر شده است اما این اختلاف برای مش‌بندی ۱۰۰ mm با مش‌بندی ۵۰ mm چشم‌گیر نیست. بنابراین، به‌منظور صرفه‌جویی در زمان تحلیل‌ها طول اجزا ۱۰۰ mm انتخاب شده است.

جدول (۱): خلاصه نتایج تحلیل حساسیت به ابعاد مش‌بندی

زمان محاسبات (min)	جابجایی (mm)	ابعاد اجزای محدود (mm)
۴۰	۲۰/۱۵	۵۰
۱۵	۱۹/۴۳	۱۰۰
۸	۱۵/۲۲	۱۵۰

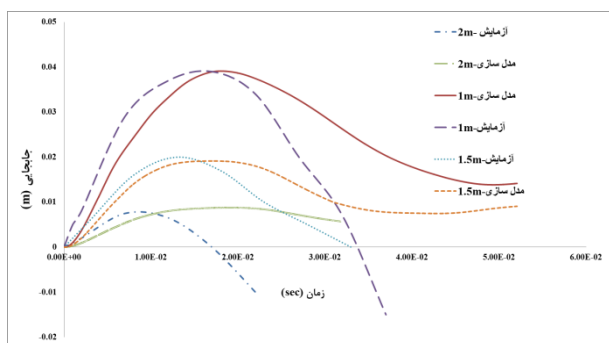
### ۳-۲- مدل‌های مصالح و اثر نرخ کرنش

در بارهایی با ماهیت انفجاری، نرخ بارگذاری و یا نرخ وقوع کرنش نسبت به سایر رژیم‌های بارگذاری بسیار بیشتر است. زیرا فشارهای بزرگ انفجار در بازه زمانی اندکی (چند میلی‌ثانیه) به سازه وارد می‌گردد و موجب بروز نرخ کرنش‌هایی در حدود ۱۰۴ - ۱۰۲ بر ثانیه می‌گردد [۲۸]. نشان داده شده است که مشخصات مصالح بتن و فولاد نسبت به نرخ کرنش حساس است [۲۹]. مطابق با نتایج تجربی موجود، با افزایش نرخ کرنش، مقاومت کششی و فشاری بتن به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داشته [۲۹-۳۱] و کرنش نهایی بتن نیز افزایش می‌یابد [۳۲-۳۳]. در نرخ کرنش‌های بالا، مقاومت مصالح فولاد اغلب تا ۵۰٪، بتن فشاری تا ۱۰۰٪ و بتن کششی تا ۶۰۰٪ افزایش می‌یابد [۳۴]. بنابراین، در تحلیل سازه‌ها تحت انفجار باید اثر نرخ کرنش بر مشخصات مصالح به روش صحیحی در نظر گرفته شود تا نتایج واقعی‌تری حاصل گردد.

در نظر گرفتن اثرات دقیق نرخ کرنش در مدل‌سازی سازه‌های بتن مسلح بسیار پیچیده است به خصوص زمانی که رفتار غیرخطی مصالح نیز وجود داشته باشد. با این حال، در بسیاری از تحلیل‌ها از مقادیر ثابت برای نرخ کرنش استفاده شده که به نتایج قابل قبولی نیز

#### ۴- نتایج تحلیل‌ها

در شکل (۵)، منحنی جابجایی جانبی حاصل از مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایش، در سه مقطع از ستون، نشان داده شده است. بخش نزولی انتهایی در نمودارهای آزمایش، در اثر از کار افتادن پتانسیومتر (جابجایی سنج) در اثر فشار و حرارت ناشی از انفجار ایجاد شده است. ملاحظه می‌شود که در تحلیل عددی، مقدار پاسخ حداکثر و زمان وقوع آن در مقطعی که تغییرشکل‌های بیشتری را تجربه کرده است، با دقت مناسبی تخمین زده شده است. علل اختلاف محاسبات با نتایج آزمایش می‌تواند ناشی از عدم دقت در تخمین توزیع مکانی بارگذاری انفجار و نیز مقادیر تقریبی برای ضرایب DIF باشد. همچنین، ممکن است تکیه‌گاه‌های ساخته‌شده برای نمونه ستون در آزمایش، شرایط گیرداری کامل در دوسر عضو را برآورده نکرده و تحت اثر انفجار تغییر مکان‌هایی داشته‌اند. در تمامی آزمایش‌های انفجار، در اثر فشار و حرارت واردشده به سنسورهای اندازه‌گیری و ابزار دقیق‌ها، امکان بروز خطا در داده‌های ثبت شده وجود دارد.

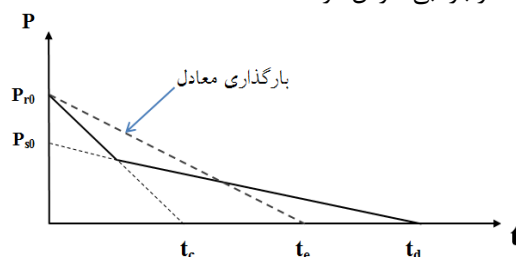


شکل (۵): مقایسه تاریخچه جابجایی حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایش

به علت هزینه و زمان بالای مورد نیاز برای انجام مطالعات آزمایشگاهی انفجار، نمی‌توان اثر پارامترهای مختلف طراحی را بر رفتار و نحوه پاسخ ستون‌های بتن مسلح تحت انفجار را با انجام آزمایش تعیین کرد. یکی از مهم‌ترین کاربردهای مدل‌های عددی، انجام مطالعات پارامتریک و تعیین نحوه اثر پارامترهای مختلف بر رفتار اعضای سازه‌ای تحت انفجار است. در این مقاله، اثرات تغییر مقادیر وزن خرج انفجاری، فاصله‌ی رویارویی، بار محوری و ارتفاع ستون بر رفتار ستون بتن مسلح تحت انفجار جانبی بررسی شده است.

ستون مورد نظر تحت بار انفجار حاصل از ۱۲۳، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ TNT مورد تحلیل قرار گرفته است. فواصل رویارویی به نحوی انتخاب شده است که مقدار فاصله مقیاس‌شده  $Z=0.52 \frac{m}{kg^{1/3}}$  ثابت

رقیق‌شدگی<sup>۱</sup> پدیده‌ای است که در اثر محدودبودن سطح رو به انفجار سازه روی داده و افت فشار بازتابی در طی زمان را تسریع می‌کند [۱۸ و ۲۰]. برای در نظرگرفتن اثر رقیق‌شدگی، یک تاریخچه بارگذاری مثلثی معادل طبق شکل (۳) تشکیل می‌شود [۴۰]. که  $t_e$  زمان تداوم معادل با رابطه (۸) محاسبه می‌شود. البته می‌توان با تقریب محافظه‌کارانه‌ای زمان دوام فشار را همان  $t_d$  (مدت زمان تداوم اضافه فشار بازتابی) فرض کرد.

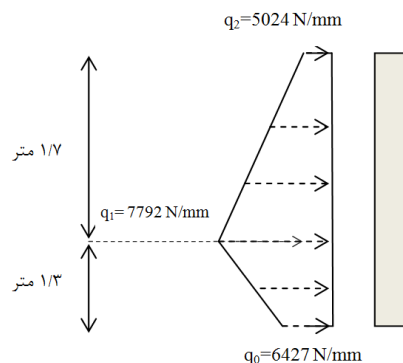


شکل (۳): فشار انفجار مثلثی معادل [۴۰]

$$t_e = \frac{2I}{P_{r0}} \quad (8)$$

$$I = \frac{1}{2} [P_{r0} - (P_{s0} + C_d q_{s0})] t_c + \frac{1}{2} [P_{s0} + C_d q_{s0}] t_d \quad (9)$$

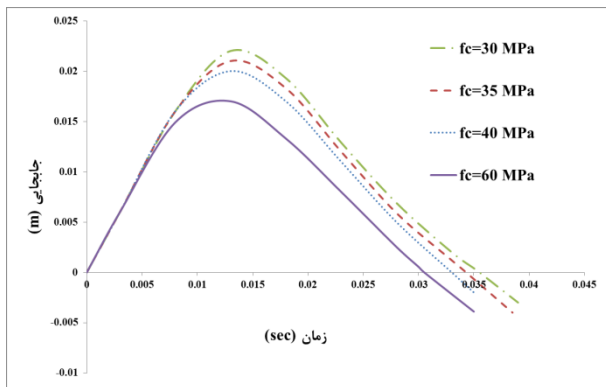
در این رابطه،  $t_c$  زمان وقوع رقیق‌شدگی و  $C_d$  ضریب درگ است که برای ستون مستطیلی برابر  $2/0.5$  تخمین زده شده است [۲۲]. برای محاسبه  $t_c$  نیز می‌توان از رابطه  $t_c = 3S/U_s$  استفاده کرد (S نصف عرض ستون است) [۱۶]. باید توجه داشت که فشار حاصل از انفجار به عرض ستون ضرب شده و به صورت گسترده خطی در طول ستون اعمال می‌گردد (شکل ۴). این روش بارگذاری انفجار، با مراجع طراحی [۱۸-۱۹] هماهنگ است. از آن‌جا که در اهداف طراحی و کاربردی، تعیین اولین پاسخ حداکثر عضو سازه‌ای اهمیت بیشتری دارد، در این‌جا تحلیل‌ها تا زمانی ادامه یافته‌اند که حداقل اولین نوسان (حرکت رفت و برگشت) ستون را در برگیرد.



شکل (۴): فشار جانبی حداکثر ناشی از انفجار ( $t_c = 2.07 \text{ msec}$ )

بالا باشد، افزایش سریع جابجایی جانبی و ناپایداری مشاهده می‌شود. باید توجه داشت که افزایش بار محوری موجب افزایش ظرفیت خمشی مقطع تیر-ستون می‌شود اما دوران حداکثر تکیه‌گاه را کاهش داده که در نتیجه انرژی جذب شده نیز کاهش می‌یابد.

برای بررسی اثر مقاومت بتن بر پاسخ ستون بتن مسلح تحت انفجار، بتن با مقاومت فشاری  $30, 40, 35, 60$  MPa در مدل‌سازی استفاده شده است. در شکل (۸) نتایج مربوط به جابجایی در وسط ارتفاع ستون‌ها تحت انفجار  $123$  kg TNT با  $Z=0.52$  kg/m<sup>1/3</sup> آورده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقاومت بتن، تغییرشکل در وسط ارتفاع ستون کاهش یافته است. با کاهش مقاومت فشاری بتن، زمان تناوب ارتعاش طبیعی ستون بلندتر شده که می‌تواند در اثر خرد شدن بخشی از بتن مقطع و کاهش سختی آن باشد.



شکل (۸): تاریخچه جابجایی برای مقاومت بتن مختلف در  $Z=0.52$  kg/m<sup>1/3</sup>

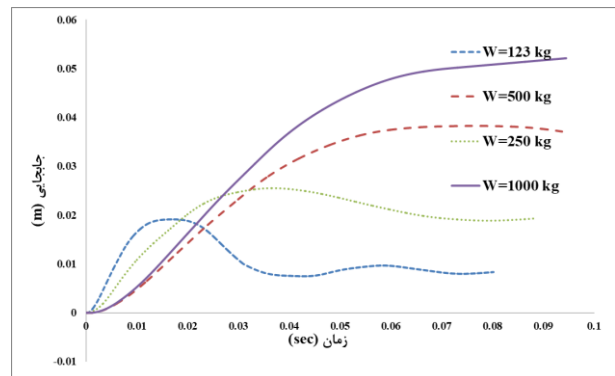
## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله از نرم‌افزار اجزای محدود ضمني OpenSees، که کاربرد عمده آن در مدل‌سازی ساختمان‌ها تحت بارهای لرزه‌ای و دینامیکی است، برای مدل‌سازی و تحلیل ستون‌های بتن مسلح با مقطع مربعی، تحت اثر هم‌زمان بار محوری فشاری و بارگذاری جانبی انفجار، استفاده شده و یک روش پیشنهادی برای گنجاندن اثرات نرخ کرنش در تحلیل تحت انفجار مطرح شده است. مطابق با نتایج حاصل، حداکثر جابجایی جانبی ستون با دقت قابل قبولی به دست آمده است. همچنین، برای بارگذاری انفجاری، علاوه بر فشار ناشی از انفجار باید اثر ضربه ناشی از انفجار و انرژی منتقل شده به سازه را نیز مورد بررسی قرارداد. دیگر نتایج به دست آمده در این مقاله نشان داده است که اثر بار محوری بر سختی، مقاومت، تغییرشکل و ظرفیت جذب انرژی ستون بتنی غیرقابل صرف نظر است.

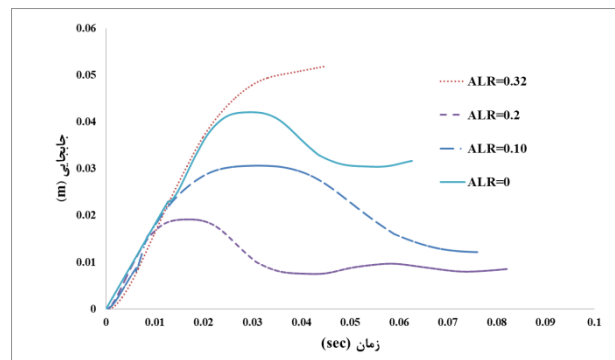
با توجه به زمان سرعت بالای محاسبات در OpenSees در

باشد. طبق شکل (۶)، مشاهده می‌شود که با افزایش وزن خرج، جابجایی در وسط ارتفاع ستون افزایش می‌یابد هرچند که مقدار حداکثر فشار وارد بر وجه ستون ثابت است. علت این امر تغییر مقدار ضربه حاصل از انفجار است که با افزایش وزن خرج، این ضربه نیز زیاد خواهد شد. در حالی که، طبق روابط (۷-۱) مقدار فشار ناشی از انفجار فقط به پارامتر  $Z$  وابسته است. از نمودارهای جابجایی شکل (۶) می‌توان دریافت که با افزایش وزن خرج انفجاری، زمان تناوب ارتعاش طبیعی عضو را بلندتر کرده است. این امر به احتمال زیاد در اثر افزایش سطح آسیب دیدگی مقطع و کاهش سختی آن است.

در بسیاری از آئین‌نامه‌های طراحی در برابر انفجار، توصیه شده است که ستون‌های خارجی ساختمان بتنی همانند تیر طراحی شود و از وجود بار محوری در آنها صرف نظر گردد [۱۹-۱۸]. در این مقاله، نسبت بار محوری ستون به ظرفیت محوری اسمی آن (قبل از انفجار) برابر با  $0, 0/1, 0/2, 0/32$  انتخاب شده است.



شکل (۶): تاریخچه جابجایی برای وزن خرج‌های مختلف در  $Z=0.52$  kg/m<sup>1/3</sup>



شکل (۷): تاریخچه جابجایی برای نسبت‌های بار محوری مختلف در  $Z=0.52$  kg/m<sup>1/3</sup>

طبق نتایج به دست آمده در شکل (۷)، با افزایش نسبت بار محوری، سختی ستون بتن مسلح تحت انفجار افزایش می‌یابد (کاهش جابجایی جانبی). اما در حالتی که نسبت بار محوری خیلی

13. "Open System for Earthquake Engineering Simulation," Pacific Earthquake Engineering Research Centre, University of California, Berkeley, 2015.
14. N. Anandavalli, N. Lakshmanan, N. R. Iyer, A. Prakash, K. Ramanjaneyulu, J. Rajasankar, and C. Rajagopal, "Behavior of a Blast Loaded Laced Reinforced Concrete Structure," *Defence Science Journal*, vol. 62, pp. 284-289, 2012.
15. F. FEMA, "426: Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks against Buildings-Buildings and Infrastructure Protection Series," ed: Federal Emergency Management Agency, 2003.
16. E. B. Williamson et al, "Blast-Resistant Highway Bridges: Design and Detailing Guidelines," Transportation Research Board of the National Academies, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP REPORT 645, Washington, 2010.
17. C. Oswald, "Component Explosive Damage Assessment Workbook (CEDAW) Methodology Manual V1.0.," prepared for Protective Design Centre U.S. Army Corps of Engineers. Baker Risk Project no. 02-0752-001, 2005.
18. Unified Facilities Criteria, "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions," UFC 3-340-02, Dept. of Defense. Washington (DC), 2008.
19. U. Army, U. Navy, and U. A. Force, "Structures to resist the effects of accidental explosions," TM5-1300, p. 1400, 1990.
20. D. Cormie, G. Mays, and P. D. Smith, "Blast effects on buildings," 2nd ed. London: Thomas Telford, 2009.
۲۱. دفتر مقررات ملی ساختمان، پیش‌نویس مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان، پدافند غیرعامل، تهران، نشر توسعه ایران، ۱۳۸۸.
22. W. E. Baker, P. A. Cox, P. S. Westine, J. J. Kulesz, and R. A. Strehlow, "Explosion Hazards and Evaluation," New York: Elsevier Scientific, 1983.
23. R. Sachs, "The Dependence of Blast on Ambient Pressure and Temperature (Proj. 776)," Ballistic Research Lab, Aberdeen Proving Ground, 1944.
24. M. Y. H. Bangash and T. Bangash, "Explosion-Resistant Buildings: Design, Analysis, and Case Studies," Germany: Springer, 2006.
25. H. L. Brode, "Numerical Solutions of Spherical Blast Waves," *Journal of Applied Physics*, vol. 26, pp. 766-775, 1955.
26. S. Farouk, "Near-Field Explosion Effects on Reinforced Concrete Columns: An Experimental Investigation," Master of Civil Engineering thesis, Carleton University Ottawa, 2014.
27. A. Braimah, S. Farouk, and B. V. Rosen, "Near-Field Explosion Effects on Reinforced Concrete Columns," *Proceedings of 5th International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading*, USA, pp. 505-514, 2015.
۲۸. زمانی، جمال، مقدمه‌ای بر مکانیک انفجار، تهران، انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۱.
29. D. Asprone, R. Frascadore, M. D. Ludovico, A. Prota, and G. Manfredi, "Influence of strain rate on the seismic response of RC structures," *Engineering Structures*, vol. 35, pp. 29-36, 2012.
30. L. J. Malvar and J. E. Crawford, "Dynamic Increase Factors for Concrete," in 28th DDESB Seminar, Orlando, USA, 1998.

مقایسه با سایر نرم‌افزارهای اجزای محدود، مرحله بعدی مطالعات می‌تواند تعیین دقیق‌تر ضرایب DIF با توجه به تغییرات کرنش در میلگردها و تارهای بتن باشد. همچنین، با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان ظرفیت محوری پسماند ستون‌های آسیب‌دیده در انفجار را مورد مطالعه قرارداد و پارامترهای مؤثر بر این ظرفیت را بررسی نمود.

## ۷- مراجع

1. X. Bao and B. Li, "Residual Strength of Blast Damaged Reinforced Concrete Columns," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, pp. 295-308, 2010.
2. W. G. Corley, P. F. Mlakar, M. A. Sozen, and C. H. Thornton, "The Oklahoma City Bombing: Summary and Recommendations for Multihazard Mitigation," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 12, pp. 100-112, 1998.
3. J. Li and H. Hao, "Numerical Study of Structural Progressive Collapse Using Substructure Technique," *Engineering Structures*, vol. 52, pp. 101-113, 2013.
4. K. Choi, M. S. Kim, E. Jo, H. Kim, D. J. Kim, and Y. H. Lee, "Residual Performance of Reinforced Concrete Columns under Blast Loading," *Proceedings of the 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13)*, 2013.
5. M. Carriere, P. J. Heffernan, R. G. Wight, and A. Braimah, "Behavior of Steel Reinforced Polymer (SRP) Strengthened RC Members under Blast Load," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 36, pp. 1356-1365, 2009.
6. J. E. Crawford, "State of the Art for Enhancing the Blast Resistance of Reinforced Concrete Columns with Fiber-Reinforced Plastic," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 40, pp. 1023-1033, 2013.
7. S. Astarlioglu and T. Krauthammer, "Response of Normal-Strength and Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Columns to Idealized Blast Loads," *Engineering Structures*, vol. 61, pp. 1-12, 2014.
8. S. Astarlioglu, T. Krauthammer, D. Morency, and T. P. Tran, "Behavior of Reinforced Concrete Columns under Combined Effects of Axial and Blast-Induced Transverse Loads," *Engineering Structures*, vol. 55, pp. 26-34, 2013.
9. M. Arlery, A. Rouquand, and S. Chhim, "Numerical Dynamic Simulations for the Prediction of Damage and Loss of Capacity of RC Column Subjected to Contact Detonations," in 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-8), Toledo (Spain), 2013.
10. Y. Shi, H. Hao, and Z. X. Li, "Numerical Derivation of Pressure-Impulse Diagrams for Prediction of RC Column Damage to Blast Load," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, pp. 1213-1227, 2008.
11. K. C. Wu, B. Li, and K. C. Tsai, "Residual Axial Compression Capacity of Localized Blast-Damaged RC Columns," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 38, pp. 29-40, 2011.
12. J. T. Baylot and T. L. Bevens, "Effect of responding and failing structural components on the air blast pressures and loads on and inside of the structure," *Computers & Structures*, vol. 85, pp. 891-910, 2007.



31. H. Schuler, C. Mayrhofer, and K. Thoma, "Spall Experiments for the Measurement of the Tensile Strength and Fracture Energy of Concrete at High Strain Rates," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, pp. 1635-1650, 2006.
32. T. Krauthammer, H. M. Shanaa, and A. Assadi, "Response of Structural Concrete Elements to Severe Impulsive Loads," *Computers & Structures*, vol. 53, pp. 119-130, 1994.
33. G. Razaqpur, W. Mekky, and S. Foo, "Fundamental Concepts in Blast Resistance Evaluation of Structures," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 36, pp. 1292-1304, 2009.
34. L. J. Malvar and J. E. Crawford, "Dynamic Increase Factors for Steel Reinforcing Bars," in 28th DDESB Seminar, Orlando, USA, 1998.
35. H. Y. Low and H. Hao, "Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Explosive Loading," *Structural Safety*, vol. 23, pp. 157-178, 2001.
36. Federal Institute of Technology, Model Code 2010, First Complete Draft, fib Bulletin 55, Switzerland, vol. 1, 2010.
37. "Fib Fédération Internationale du béton (fib)," Code-type models for concrete behavior: State-of-the-art Report, 2013.
38. S. Mazzoni, F. McKenna, et al, "OpenSees Command Language Manual," University of California, Berkeley, 2006.
39. J. B. Mander, M. J. Priestley, and R. Park, "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *Journal of structural engineering*, vol. 114, pp. 1804-1826, 1988.
40. D. O. Dusenberry, "Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings," USA: JOHN WILEY & SONS, 2010.

---

## Estimation of RC Columns' Behavior under Blast Loading

M. Esmailnia Omran<sup>\*</sup>, S. Mollaei

### Abstract

Increasing the risk of explosion event in urban areas has led to building owners, governments and researchers trying to understand the behavior of structural systems under blast loading. In reinforced concrete buildings in front of the outside explosions, external columns are the most vulnerable and critical structural members. In most of the studies on the effect of the blast loading on structural members, in particular reinforced concrete (RC) columns, specialized finite element software packages (hydro codes) have been used. Hydrocode's application requires high expertise and the results are highly dependent on the user. Here, the effects of near field blast loading on the conventional reinforced concrete columns, which are designed for gravity loads, are studied. For this purpose, implicit finite element software OpenSees' capabilities in nonlinear dynamic analysis have been used. A simple way to enter the effects of the strain rate in the analysis is proposed. The results of lateral deformations of reinforced concrete columns calculated with the software showed good agreement with the results recorded in the real scale experimental blast test. The results also showed, for blast loading, the impact of the blast wave on the sides of the column is important. Furthermore, the column axial load should be included in its modeling and analysis under blast loads.

**Key Words:** *Blast Loading, Reinforced Concrete Column, OpenSees Software, Lateral Displacement, Axial Load*

---

<sup>\*</sup> Supreme National Defense University (m.esmailnia@uok.ac.ir) - Writer-in-Charge