

ارزیابی رفتار ساختمان‌های با اهمیت خیلی مهم در برابر بار انفجار

آرمان ابراهیمی اردی ۱، رضا یوسفی تپراقلو ۲، هوشیار ایمانی کله سر ۳

۱ کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، دانشگاه مراغه

Email;Armanebrahimierdi77@gmail.com

۲ کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، موسسه آموزش عالی غیر انتفاعی شهریار آستارا

Email;Reza.yousefi6664@gmail.com

۳ دکتری عمران، دانشیار(گروه عمران، دانشگاه محقق اردبیلی)

Email;Hek@uma.ac.ir

چکیده

با توجه به وجود زمینه تهدیدات بالقوه و خطرانی که امنیت ملی، استقلال و تمامیت ارضی کشور را نشانه گرفته، ضرورت توجه به پدافند غیرعامل در اولویت قرار دارد. این موضوع به قدری مهم و ضروری است که برنامه‌ریزی‌های میان‌مدت و بلند-مدت را جهت تحقق آن از سوی مراکز مربوطه می‌طلبد. مقاوم‌سازی ساختمان‌ها به ویژه ساختمان‌های خدماتی- درمانی که به هنگام اعمال تهدید از سوی دشمن و وقوع بحران نقش اساسی را در برقراری امنیت و آرامش روحی و روانی عموم مردم علی-الخصوص مصدومین حوادث، ایفا می‌کنند. اهمیت بالایی دارد. لذا طراحی دقیق و مقاوم‌سازی مراکزی چون مراکز درمانی امری ضروری و غیرقابل انکار می‌باشد، آیین‌نامه‌ها برای وقوع انفجار ضوابط و دستورالعمل‌های خاصی را تعیین نکرده است، که در طراحی ساختمان‌های با اهمیت خیلی زیاد و ارزیابی میزان موقعیت آن باید مورد توجه قرار بگیرد به طوری که بدون آسیب عمده سازه‌ای، قابلیت بهره‌برداری بدون وقفه خود را حفظ کنند. در پژوهش حاضر یک ساختمان ۴ طبقه ابتدا تحت بارگذاری لرزه‌ای و ثقلی با نرم‌افزار Etabs ۲۰۱۶ طراحی گردیده است. سپس شبیه‌سازی عددی تاثیر بار انفجار بر ساختمان بتن مسلح فوق‌الذکر (با کاربری بیمارستان) با اهمیت خیلی زیاد مورد بررسی قرار گرفته است. در محیط نرم‌افزار Abaqus و با استفاده از روش المان محدود به بررسی عملکرد ساختمان‌های بتن آرمه مد نظر تحت اثر انفجار پرداخته شده است. بدین منظور یک قاب منتخب از ساختمان فوق‌الذکر تحت اثر ۸ بار انفجاری با موقعیت‌های متفاوت و وزن‌های TNT برابر با ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوگرم به دو نوع انفجارهای زمینی و هوایی قرار داده شده است. به منظور حصول اطمینان از صحت فرایند شبیه‌سازی در پژوهش حاضر با توجه به نتایج ثبت شده‌ی کار عددی مشابه به صحت سنجی شبیه‌سازی پرداخته شد. حداکثر جابه‌جایی به ازای موقعیت بحرانی اعمال بار ناشی از انفجارهای فوق‌الذکر به ترتیب، $12,30\text{ cm}$ ، $13,42\text{ cm}$ ، $21,30\text{ cm}$ و $84,7\text{ cm}$ ، حداکثر تنش فون میزز تحت اثر انفجار در مرکز سازه به ترتیب، $(7,45)^{\wedge}$ ، $(5,73)^{\wedge}$ ، $(7,48)^{\wedge}$ و $(7,18)^{\wedge}$ نیوتون بر میلیمتر به دست آمده است. از روش‌های مقاوم‌سازی سازه می‌توان به روش استفاده از الیاف FRB یا مقاطع مختلط بتنی و فولادی اشاره کرد. همچنین با روش‌های مانند روش مسیر جایگزین می‌توان خرابی پیش‌رونده در سازه را به حداقل رساند

واژه‌های کلیدی: بیمارستان، قاب خمشی بتن مسلح، انفجار، خرابی پیش‌رونده، نرم‌افزار آباکوس

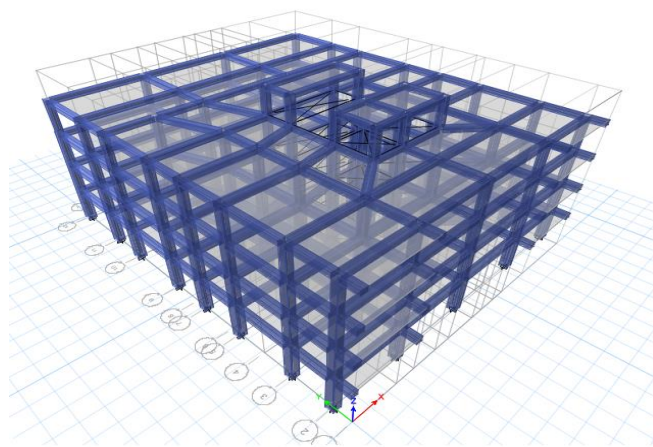
۱- مقدمه

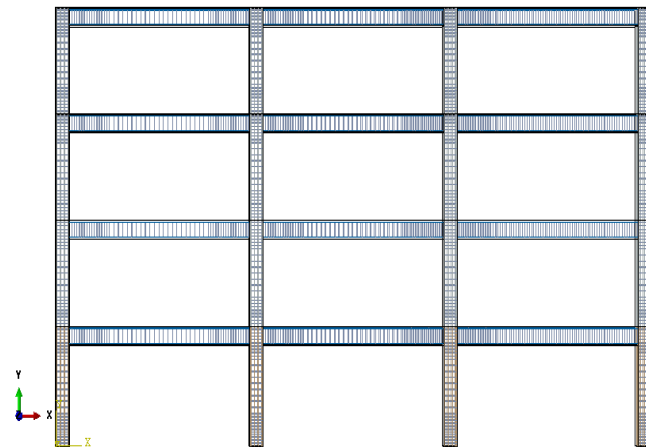
امروزه با گسترش حملات انفجاری وارده به سازه های بتن مسلح با اهمیت خیلی زیاد، بررسی دقیق رفتار این نوع سازه ها تحت بارهای انفجاری یک ضرورت محسوب می شود. از طرفی به دلیل موقعیت ممتاز استراتژیکی ایران سرشار، بررسی عملکرد سازه های حساس و مهم در برابر انفجار و آثار ناشی از آن از اهمیت به سزایی برخوردار است. لذا شناخت تهدیدات و نحوه ی مقابله با بمب گذاری و انفجار بر مهندسان سازه و زلزله الزامی است. از آنجا که ایران، و از طرفی در روی کمر بند زلزله قرار گرفته است، غالباً در طراحی سازه های خاص بتنی به خصوص سازه های با اهمیت بالا (بیمارستان ها) باید به رفتار و پتانسیل این سازه ها تحت اثر بارگذاری های ناخواسته و محاسبه نشده مانند بار انفجار توجه گردد. لذا به همین امر رفتار سازه های مقاوم لرزه ای، تحت اثر بارهای انفجاری نیز باید مورد مطالعه و بررسی قرار بگیرد تا نقاط ضعف احتمالی آن ها در برابر انفجار نیز بهتر مشخص گردد. شکل پذیری، پیوستگی اعضای سازه ای، مقاومت و سختی از جمله عواملی هستند که نقش مهمی را در بقای سازه ها تحت هر دو نوع بار لرزه ای و انفجاری ایفا می کنند. در واقع رفتار سازه های بتنی که در طراحی آنها ضوابط لرزه ای مد نظر قرار گرفته اند ضروری است تحت اثر بارهای انفجاری قرار گیرند و برای حصول نتیجه ی دقیق تر از عملکرد آن ها بهتر است به صورت سه بعدی مورد تحلیل قرار بگیرند.

۲- ادبیات تحقیق

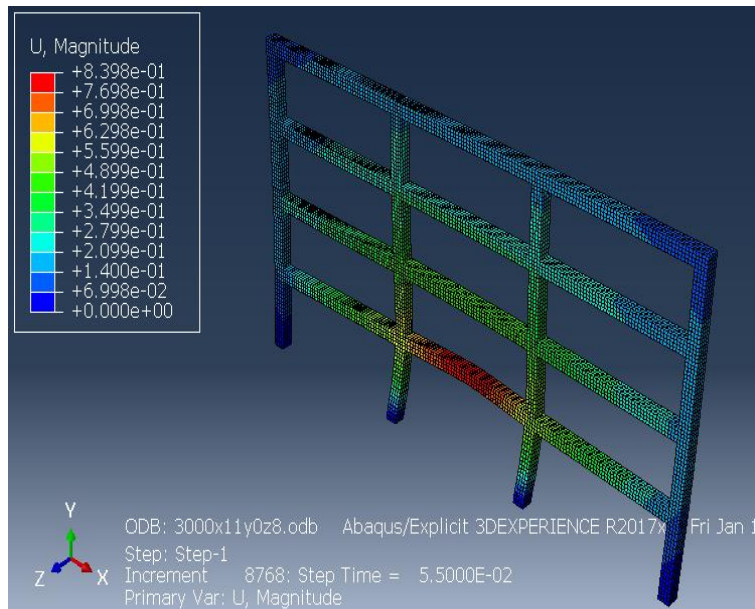
در پژوهش حاضر ابتدا بارگذاری انفجار در سطح زمین و هوا با استفاده از نرم افزار قدرتمند المان محدود Abaqus شبیه سازی سازی شده و فشار وارد آمده بر سازه مورد نظر با روابط موجود در آیین نامه TM-855-1 مقایسه و صحت آن مورد تأیید قرار گرفته است. سپس یک قاب ۴ طبقه به طول ۲۲٫۶ متر و ارتفاع ۱۳٫۸ متر از سطح زمین با ستون های به ابعاد ۵۵X۵۵ سانتی متر و تیرهای به ابعاد ۵۰X۵۰ سانتی متر در معرض بارگذاری انفجاری قرار داده شده است. از یک سو پاسخ این سازه را در مقابل بارگذاری انفجاری بررسی شده و از سوی دیگر به بررسی امکان مقاوم سازی و ایمن سازی این سازه در مقابل انفجار پرداخته شده است. ساختمان سه بعدی ۴ طبقه با کاربری بیمارستانی که هر طبقه شامل بخش اتاق بیمار، راهرو، اتاق عمل، آسانسور و راه پله می باشد. محل احداث فرض شده پروژه در شهر اردبیل می باشد. ساختمان در دو راستای محور X و Y با قاب خمشی متوسط و بدون دیوار برشی و مهار بند طراحی شده است.

نتایج تحلیل و طراحی ساختمان بتن مسلح در نرم افزار Etabs 2016 شبیه سازی شده است که ابتدا در نرم افزار Etabs 2016 مدل سازی و طراحی شده است و قاب سه دهنه، چهار طبقه تحت بارگذاری انفجاری در نرم افزار Abaqus 2017 مدل شده است. مقاطع و مصالح مصرفی پروژه مورد نظر بعد از طراحی نهایی توسط برنامه Etabs 2016 وارد برنامه Abaqus 2017 شده است. ساختمان و قاب ۴ طبقه تحت اثر ۸ انفجار قرار داده شده است.

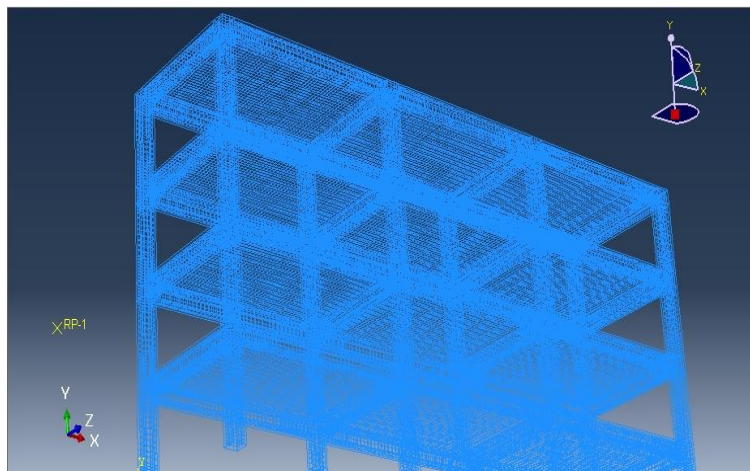




شکل (۲)- نمای قاب ۴ طبقه بتن مسلح با سیستم قاب خمشی و میلگرد گذاری طولی و عرضی سازه قاب



شکل (۳)- سازه قاب ۴ طبقه تحت اثر بار انفجاری



شکل (۴)- میلگرد گذاری سازه بتن مسلح بیمارستان در نرم افزار Abaqus به روش Solid

۳- روش تحقیق

در این پژوهش به بررسی و با هدف پیشنهاد و ایجاد یک رویکرد جامع و عملکردی بر روی طراحی سازه بتن مسلح تحت اثر بار انفجاری بر روی قاب ۴ طبقه با ۳ دهانه صورت گرفته است. پرداخته می شود. و با مقایسه تطبیقی رفتار قاب‌های ۴ طبقه با انفجارهای زمینی و هوایی با فواصل و مقادیر متغییر جمع‌بندی شده است. ویژگی پلاستیسیته بتن به شرح جدول زیر می‌باشد.

جدول (۱): ویژگی پلاستیسیته بتن

Dilatation angle	Eccentricity	Fb/Fc	k	Vicosity parameter
۳۱	۰,۱	۱,۱۶	۰,۶۶۷	۰,۰۰۰۱

جدول (۱) مشخصات مکانیکی و هندسی قاب

7 m	فاصله بین ستون‌ها
3.6 m	ارتفاع طبقه اول
3.2 m	ارتفاع طبقات تیپ
0.50 x 0.50 m	ابعاد تیر
0.55 x 0.55 m	ابعاد ستون
20 cm	ضخامت دال سقف طبقات
AIII	فولاد از نوع
C30	رده بتن
2.1E6 kg/cm ²	مدول یانگ فولاد
2.3786E5 kg/cm ²	مدول یانگ بتن
84 E ⁴	مدول برشی
0.2	ضریب پواسون بتن
0.3	ضریب پواسون فولاد
گیردار	شرایط تکیه گاهی

۳-۲- پارامترهای مقاومت فشاری بتن طبق جدول زیر است.

جدول (۳): پارامترهای مقاومت فشاری بتن

	Yield Stress	Inelastic Strain
1	13095200	0
2	15952400	0.131932
3	17381000	0.199077
4	20000000	0.316597
5	21904800	0.400545
6	24285700	0.501295
7	24523800	0.601747
8	24761900	0.756592

شرح جدول زیر می‌باشد.

۳-۳- پارامترهای مقاومت کششی بتن به

جدول (۴): پارامترهای مقاومت کششی بتن

	Yield Stress	Cracking Strain
1	5000000	0
2	10600000	5.150215E-005
3	15000000	7.725322E-005
4	21000000	0.0001030043
5	29000000	0.0001416309
6	19400000	0.0005021459
7	13000000	0.0008369099
8	8880000	0.0011073
9	5800000	0.00137768

10	380000	0.00162232
11	250000	0.00186695
12	160000	0.00211159
13	110000	0.00235622
14	80000	0.00260086
15	55600	0.00284549

۳-۴- پارامترهای خرابی کششی بتن طبق جدول زیر می‌باشد.

جدول (۵): پارامترهای خرابی کششی بتن

	Damage Parameter	Cracking Strain
1	0	0
2	0.444848485	0.000417385
3	0.572960373	0.00073645
4	0.107072261	0.001055515
5	0.829184149	0.00134158
6	0.914592075	0.00158729

۳-۵- پارامترهای خرابی فشاری بتن به شرح جدول زیر است.

جدول (۶): پارامترهای خرابی فشاری بتن

	Damage Parameter	Inelastic Strain
1	0	0
2	0.258542131	0.000492769
3	0.231283341	0.000552063
4	0.205963744	0.000614253
5	0.182515455	0.000679238
6	0.160870592	0.000746915
7	0.14096127	0.000817184
8	0.122719605	0.000889944
9	0.106077715	0.000965092
10	0.090967716	0.001042528
11	0.077321724	0.001112215
12	0.065071855	0.001203857
13	0.054150225	0.001287548
14	0.044488952	0.00137312
15	0.036020151	0.001460474
16	0.028675939	0.001549507
17	0.022388432	0.001640117
18	0.017089747	0.001732205
19	0.012712	0.001825667
20	0.009187307	0.001920404
21	0.006447785	0.002016313
22	0.00442555	0.002113293
23	0.003052718	0.002211243

۳-۶- پارامترهای مقاومت پلاستیک فولاد AI I قر

جدول (۷): پارامترهای مقاومت پلاستیک فولاد AI I

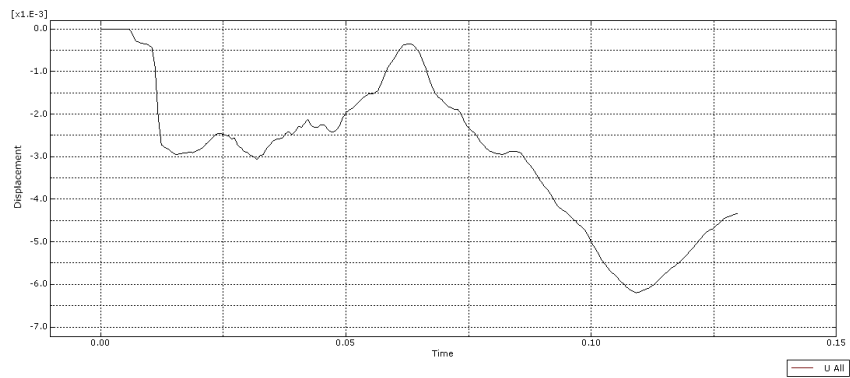
	Yield Stress	Plastic Strain
1	400000000	0
2	442105000	0.00815365
3	481203000	0.0160648
4	529323000	0.0228487
5	577444000	0.0299551
6	616541000	0.0375437
7	646617000	0.0446465
8	682707000	0.0523957
9	703759000	0.0601419
10	727820000	0.0667596
11	739850000	0.0735363

۴- ابزار و روش تجزیه و تحلیل

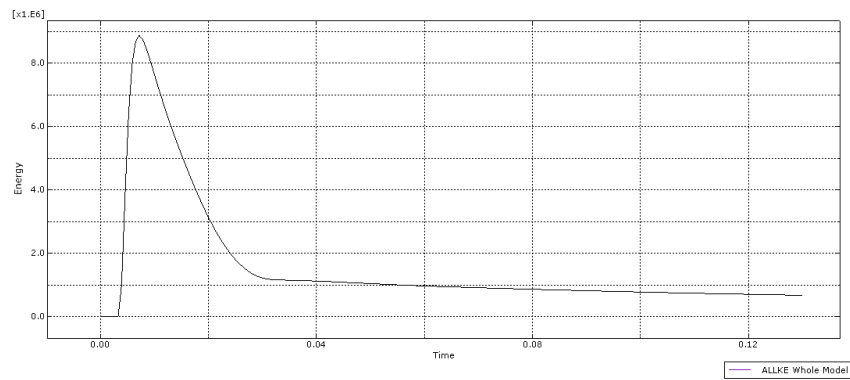
در این تحقیق مدل سازی و شبیه سازی در این بخش نتایج تحلیل قاب های منتخب از ساختمان ۴ طبقه با فواصل مواد منفجره از نوع TNT مورد بررسی در برابر بار انفجاری برای مقایسه پاسخ سازه ها ارائه شده است. در شکل های (۵) تا (۷) به ترتیب مودهای تغییرشکل، انرژی کلی حاصل شده از موج فشار و موج مکش و عکس العمل تکیه گاهی زیر ستون های قاب در برابر نیروی موج حاصل از انفجار نشان داده شده است. در اشکال (۸) تا (۱۰) به ترتیب مودهای نمودار انرژی موج انفجار، پاسخ دینامیکی قاب و نمودار انرژی موج انفجار استفاده قرار گرفته شده است. در این پژوهش شدت بار انفجار و اعضای حذف شونده در موقعیت های متفاوت را به عنوان متغیرهای تحقیق در نظر گرفته شده است.

۵- یافته های تحقیق

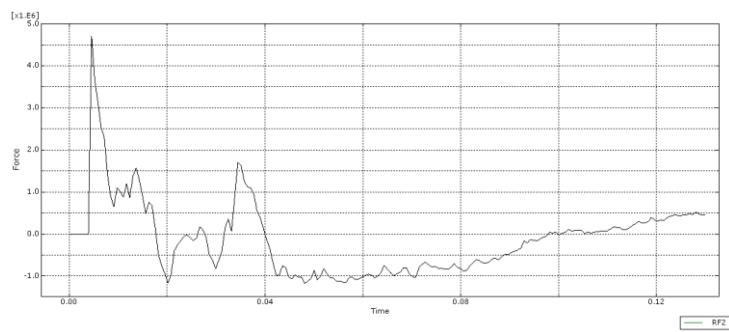
در این بخش نتایج تحلیل قاب های منتخب از ساختمان ۴ طبقه با فواصل مواد منفجره از نوع TNT مورد بررسی در برابر بار انفجاری برای مقایسه پاسخ سازه ها ارائه شده است. در شکل های (۵) تا (۷) به ترتیب مودهای تغییرشکل، انرژی کلی حاصل شده از موج فشار و موج مکش و عکس العمل تکیه گاهی زیر ستون های قاب در برابر نیروی موج حاصل از انفجار نشان داده شده است. در اشکال (۸) تا (۱۰) به ترتیب مودهای نمودار انرژی موج انفجار، پاسخ دینامیکی قاب و نمودار انرژی موج انفجار استفاده قرار گرفته شده است. در این پژوهش شدت بار انفجار و اعضای حذف شونده در موقعیت های متفاوت را به عنوان متغیرهای تحقیق در نظر گرفته شده است.



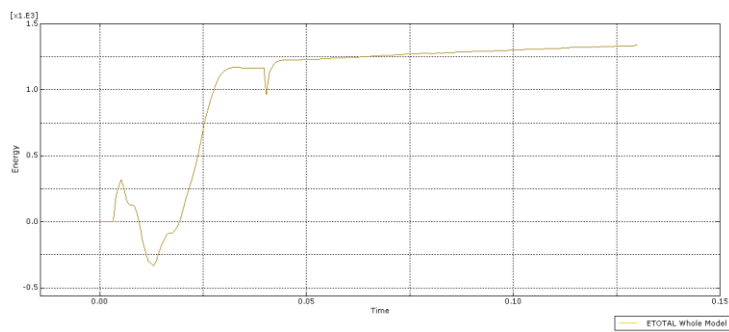
شکل ۵- نمودار تغییر شکل سازه قاب طبقه حول محور X



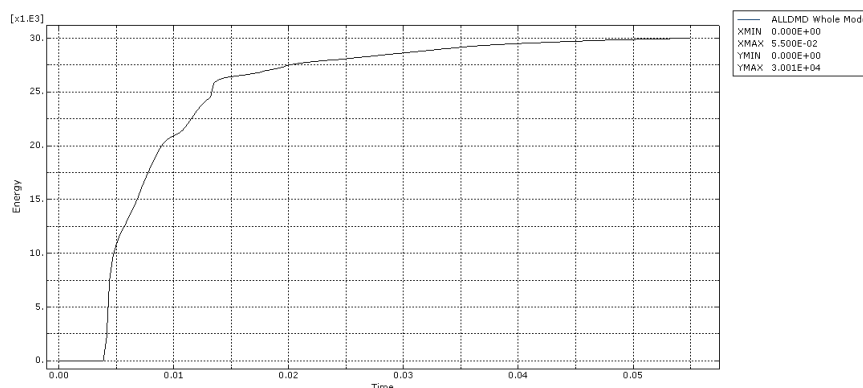
شکل ۶- نمودار انرژی کلی حاصل شده از موج فشار و موج مکش در سازه قاب طبقه حول محور X



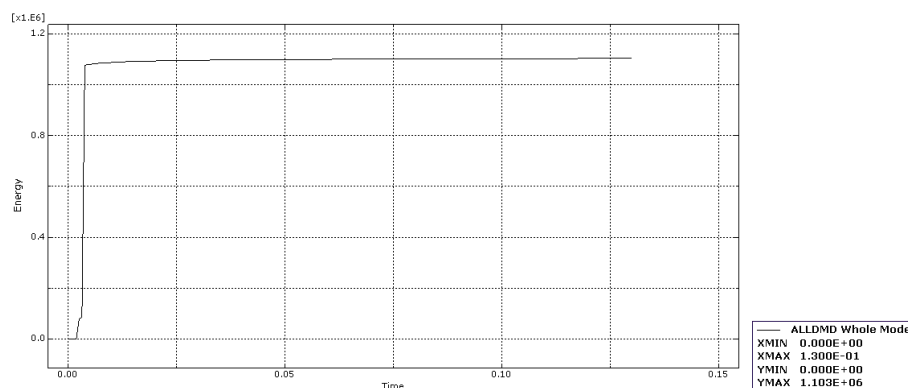
شکل ۷- نمودار عکس العمل تکیه گاهی زیر ستون های قاب حول محور X



شکل ۸- نمودار انرژی موج انفجار در سازه قاب حول محور X

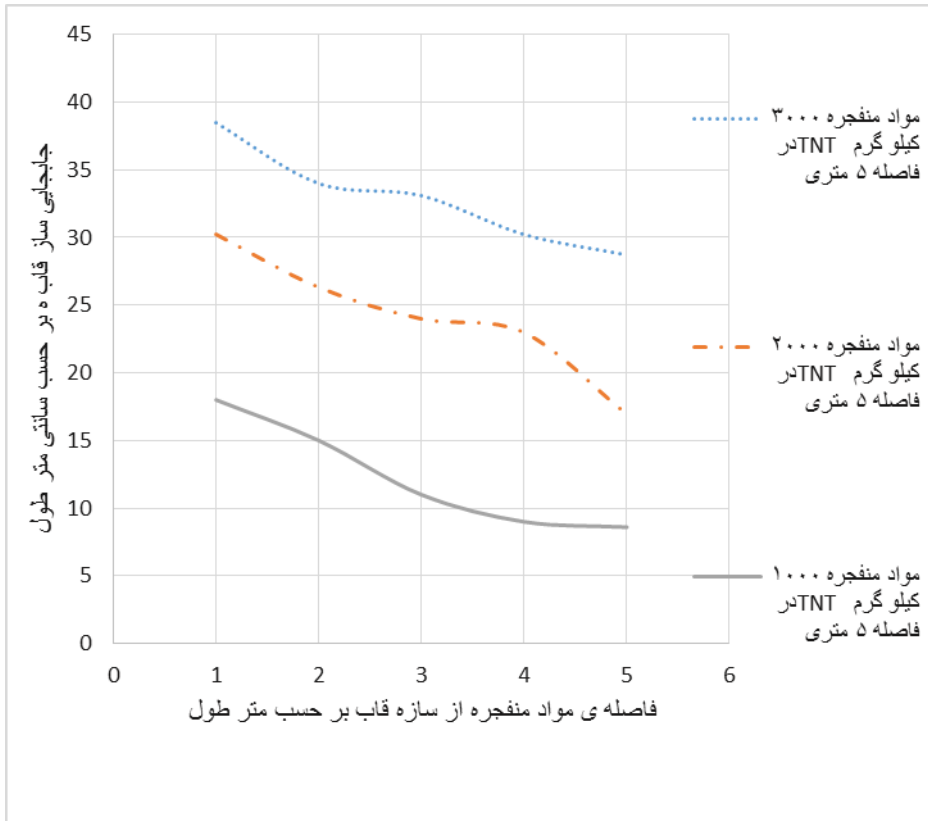


شکل ۹- نمودار پاسخ دینامیکی در سازه قاب حول محور X

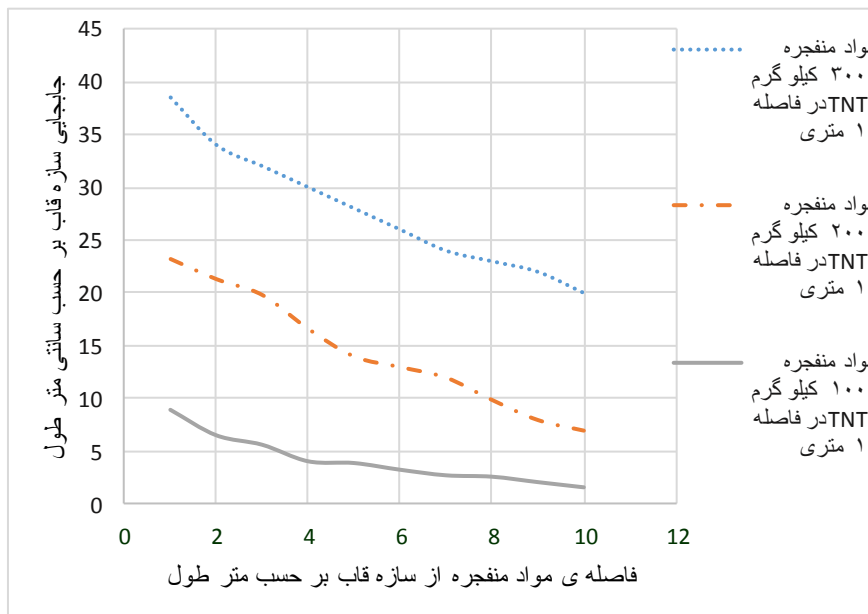


شکل ۱۰- نمودار انرژی موج انفجار وارده بر سازه قاب بتنی مسلح قادر سازه قاب حول محور X

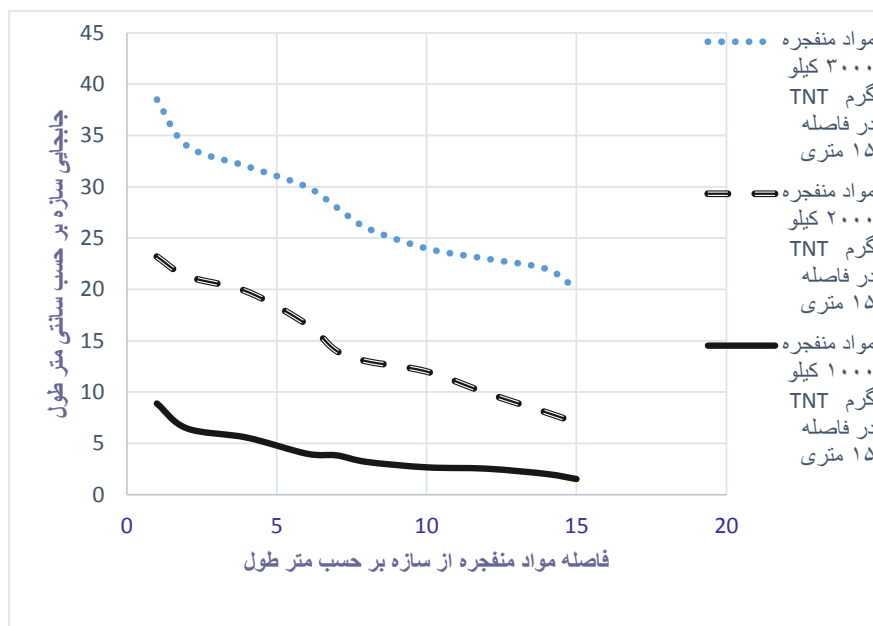
با استناد به نتایج تحلیل های به دست آمده می توان اینگونه بیان کرد که با افزایش وزن مواد منفجره TNT از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ کیلوگرم تغییر مکان سازه قاب در محور قائم از مقدار ۱،۵۴۲ سانتی متر به ۸،۹۲ سانتی متر افزایش پیدا می کند. و ترک ایجاد شده در محل اتصالات تیر به ستون به صورت قابل توجهی افزایش می یابد. با افزایش فاصله محل انفجار از نقطه ۵ متری به فاصله ۱۰ متری از سازه قاب ۴ طبقه با وزن TNT یکسان ۲۰۰۰ کیلوگرم تغییر مکان سازه از ۸،۹۲ به ۲،۳۶ سانتی متر کاهش می یابد. خرابی فشاری سازه قاب تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم مواد منفجره TNT با فاصله ۵ متری از سازه قاب برابر با $2/588 \text{ e-1 N/mm}^2$ بدست آمد. و میزان خرابی کششی ایجاد شده در سازه قاب بتن مسلح به علت مقاومت کششی پایین بتن مقدار $9/466 \text{ e- N/mm}^2$ 1 به دست آمد. با افزایش وزن مواد منفجره TNT از ۲۰۰۰ به ۳۰۰۰ کیلوگرم قدرت موج انفجار بر سازه قاب به مقدار ۲ برابری افزایش می یابد و منجر به ایجاد خرابی های خیلی بیش تری در سازه قاب می گردد. اتصالات تیر به ستون شایع ترین محل تشکیل مفصل و تنش پلاستیک می باشد که عموماً محل آغاز ترک و گسترش ترک است. هرچه فاصله محل انفجار از سازه قاب مورد نظر بیشتر می گردد اثر موج ناشی از انفجار در قسمت بالاتر سازه قاب میزان خرابی ها بیشتری دیده می شود. ایجاد ترک های عمقی در پای ستون بتنی یا حذف قسمت های از کناری ستون که ناشی از موج انفجار می باشد تحمل باربری کل سازه قاب بشدت کاهش می یابد و پدیده خرابی پیش رونده رخ می دهد. انفجار در وسط سازه قاب یا مجاور سازه در هر دو صورت باعث خرد شدگی و ترک در محل اتصالات تیر به ستون و خرابی اعضای باربر سازه می شود. با توجه به این موضوع که انفجار یکی از مقوله های غیر قابل پیش بینی حوادث می باشد. در این راستا می توان به مقاوم سازی سازه به کمک الیاف FRB یا مقاطع مختلط فولادی و بتنی اشاره کرد. و یا با روش های مثل روش مسیر جایگزین خرابی پیش رونده در سازه قاب را به حداقل رساند. در مورد دیگری می توان راهکاری برای کاهش اثر انفجار بر روی سازه قاب با تعیین حریم محیطی مناسب برای سازه های با اهمیت بالا به طور چشم گیری می توان تاثیر حداکثر چنین حوادثی (انفجار) بر سازه های بتن مسلح را به حداقل رساند.



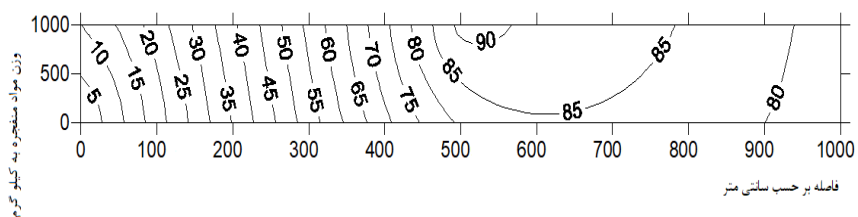
شکل ۱۱- نمودار جابجایی سازه قاب تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۵ متری



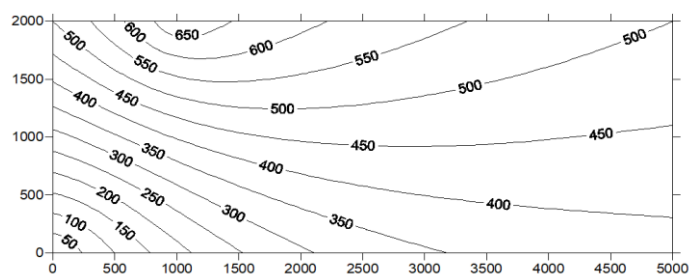
شکل ۱۲- نمودار جابجایی سازه قاب تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۱۰ متری



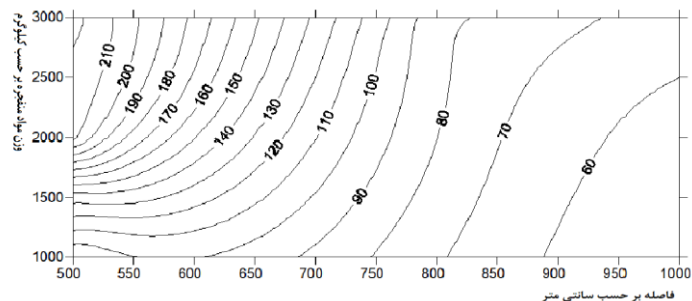
شکل ۱۳- نمودار جابجایی سازه قاب تحت اثر انفجار ۳۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۱۵ متری



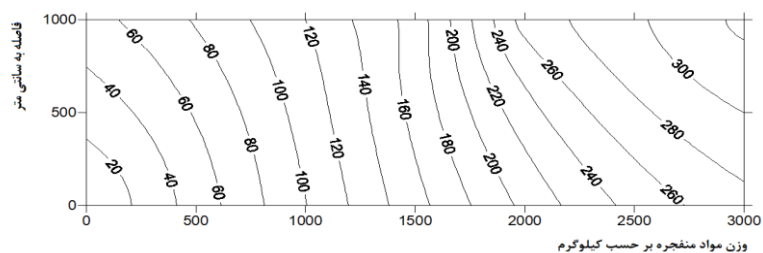
شکل ۱۴- خرابی سازه تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فواصل ۵ تا ۱۰ متری



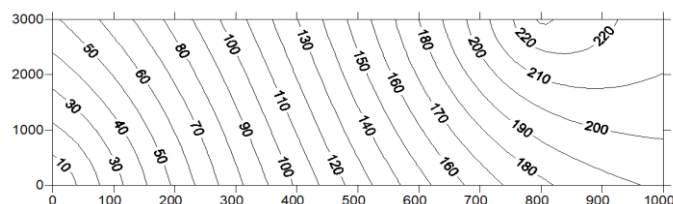
شکل ۱۵- تنش فون میز بر حسب MPa وارد بر سازه قاب بتن مسلح تحت اثر انفجار ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۵ متری



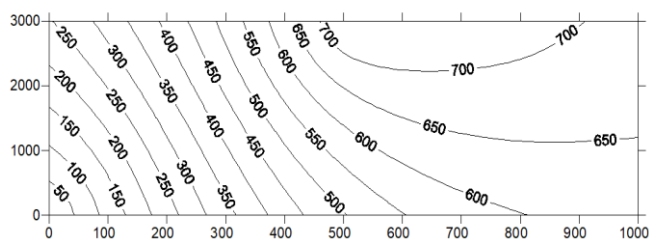
شکل ۱۶- جابجایی کل (بر حسب سانتی متر) سازه قاب بتن مسلح تحت اثر انفجار ۳۰۰۰، ۲۰۰۰، ۱۰۰۰ کیلوگرم مواد منفجره TNT در فواصل ۵ تا ۱۰ متری



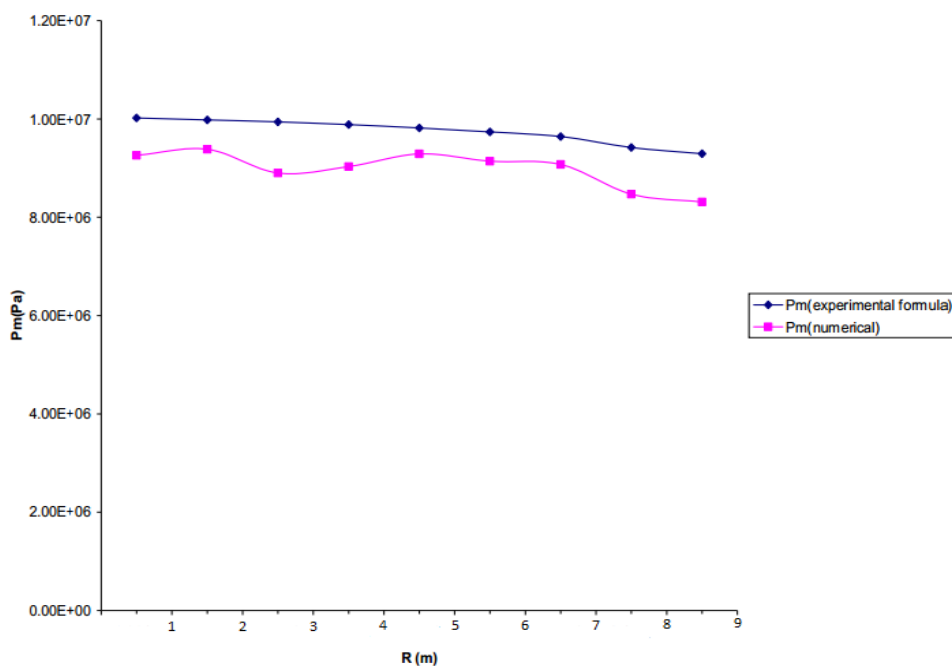
شکل ۱۷- تنش تکیه‌گاهی وارد بر سازه (بر حسب Mpa) تحت اثر انفجار ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوگرم TNT در فواصل ۵ و ۱۰ متری



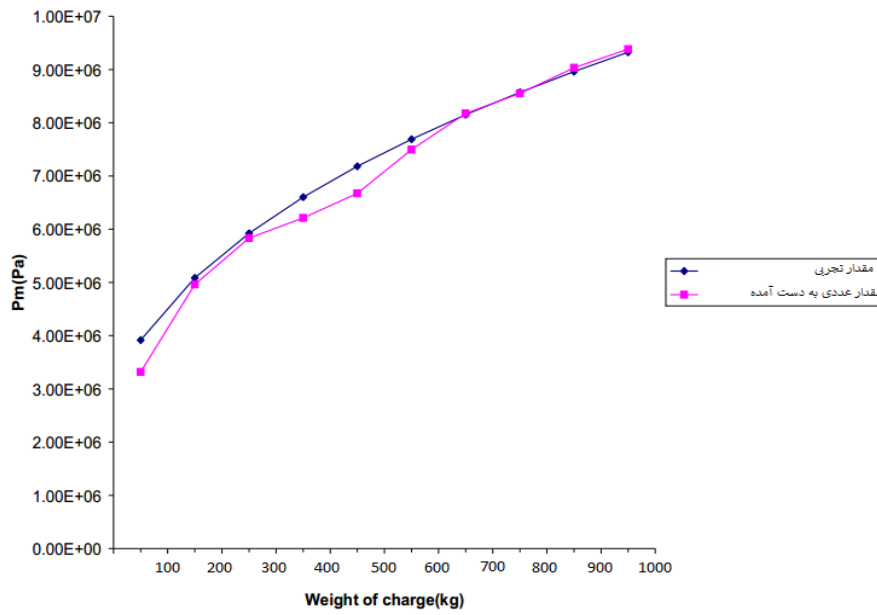
شکل ۱۸- نمایش نمودار جابجایی (بر حسب سانتی‌متر) سازه قاب ۴ طبقه بتن مسلح تحت اثر انفجار ۳۰۰۰ کیلوگرم مواد منفجره TNT در فواصل ۵ تا ۱۰ متری



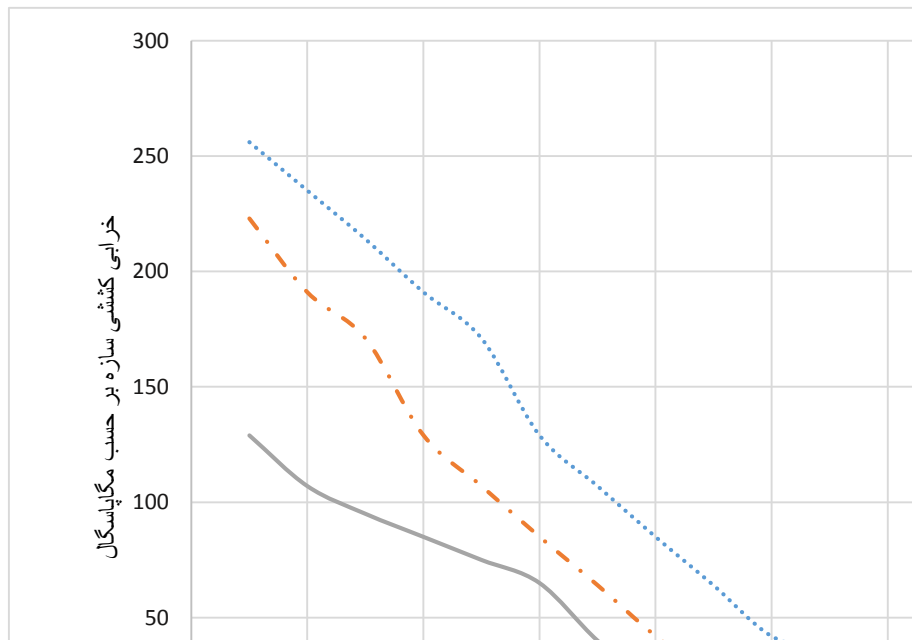
شکل ۱۹- تنش فون میزز (بر حسب Mpa) وارد بر سازه قاب ۴ طبقه تحت اثر انفجار ۳۰۰۰ کیلوگرم مواد منفجره TNT در فواصل ۵ تا ۱۰ متری



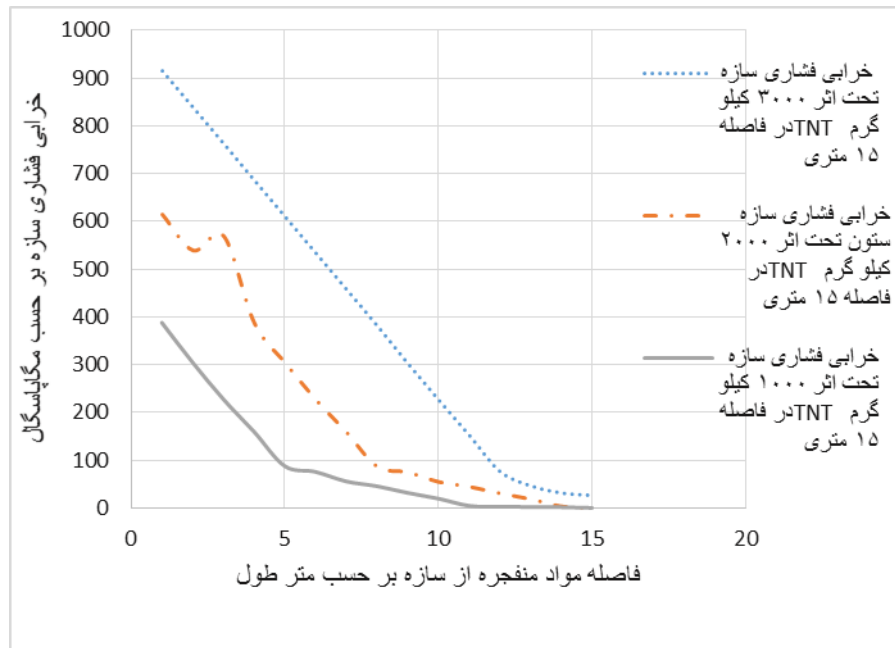
شکل ۲۰- مقایسه بیشینه فشار تجربی و عددی برای فواصل مختلف به ازاء ۱۰۰۰ کیلوگرم مواد منفجره TNT



شکل ۲۱- مقایسه بیشینه فشار تجربی و عددی برای فواصل مختلف به ازاء وزن‌های مختلف مواد منفجره TNT



شکل ۲۲- خرابی تحت اثر کشش در سازه (برحسب سانتی‌متر) تحت اثر انفجار ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوگرم مواد منفجره TNT در فواصل ۵ تا ۱۵ متری



شکل ۲۳- خرابی تحت اثر فشار بر سازه قاب (بر حسب سانتی متر) تحت اثر انفجار ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوگرم مواد منفجره TNT در فواصل ۵ تا ۱۵ متری

۶- بحث و نتیجه گیری

زمان تناوب پاسخ قاب بتن مسلح در جهت Y در برابر بار انفجاری عدد $0,0337$ ثانیه را نشان می دهد ، چون بیشترین مشارکت (حدود $0,82$ ٪) در ارتعاش کلی را بدنه ستون های قاب را دارد.

حداکثر جابجایی سازه قاب ۴ طبقه بتن مسلح طبق نمودار های شکل های (۱۱-۵) پاسخ قاب بتنی مسلح در برابر موج انفجار با مدت زمان $0,13$ ثانیه (سازه در $0,11$ ثانیه اول بیشترین خسارت اولیه را دیده است) نمایش داده شده است. نسبت به تغییر مکان مجاز تغییر مکان سازه مورد نظر بیشترین تغییر ماکن نهایی را طبق مقادیر آیین نامه ای داشته است. می توان نتیجه گرفت که برای ستون های بتنی مسلح قاب مورد نظر با انفجار حاصل از 1000 کیلوگرم TNT در لحظه اول خسارتی وارد می شود که قسمت مقابله با موج انفجار قاب از حالت پایداری خارج می شود و سازه قاب مقاومت خود را از دست می دهد در نهایت واژگون می شود. اگر سازه قاب از لحاظ پایداری کلی هم سر پا بماند باز هم بعلت ترد و خرد شدن قسمت اساسی سازه قاب از حالت پایداری کامل در خواهد آمد. در چنین وضعیتی کنترل کمانش در برابر نیروی حاصل شده و همچنین پیچش در طراحی مدل قاب ۴ طبقه بتنی مسلح می تواند در مسئله خرابی پیش رونده بتن در سازه قاب مسلح به حدالامکان ممکن رساند بر همین اساس کنترل لبه های کناری ستون ها و تیرهای قاب و تقویت مرکز و هسته های ستون سازه توسط اسپلیت های بتنی و فولادی میتواند اولین اقدام پیشگیرانه برای جلوگیری از این امر و افزایش مقاومت چشمگیر سازه در مقابل انرژی حاصل شده از موج انفجار گردد.

با مشاهده نتایج سازه در اثر انفجار با فاصله 10 متری از قاب ۴ طبقه در مدت زمان $0,055$ ثانیه نتایج نشان می دهد که بیشترین خرابی ها در ارتفاع $4,5$ تا متری سازه قاب اتفاق می افتد. در انفجار اول با فاصله 5 متری میزان حداکثر جابجایی اولیه در مدت زمان انفجار برابر با $17,24$ سانتی متر به دست آمده است. در انفجار دوم با فاصله 10 متر از مدل اگر انفجار رخ دهد میزان جابجایی سازه برابر با $6,53$ سانتی متر به دست آمد که نسبت به حالت اول به مقدار $2,6$ برابر کاهش داشته است که بعلت دو برابر شدن فاصله انفجار و کاهش شدت موج انفجار و شعاع بالاتر آن است.

بیشترین جابه‌جایی سازه در محور قائم ستونها اتفاق می‌افتد. حداکثر کرنش پلاستیک سازه ستون قاب مجاور انفجار در تراز ۳ تا ۱۱ متری می‌باشد. با توجه به مقادیر نموداری های حاصل شده میزان خرابی تحت موج مکش نیز مقادیر قابل توجهی را نشان می‌دهد و مشارکت آن در خرابی سازه قاب بتن مسلح کمتر از موج فشار اولیه نیست.

خرابی کششی و فشاری سازه قاب بعد از انفجار مواد منفجره با فاصله ۱۵ متری از مدل و با وزن ۳۰۰۰ کیلوگرم TNT بر روی سازه قاب، بعلا فاصله ۱۵ متری از انفجار از خرابی کلی و ترک های ناگهانی بیشتری در توزیع ترک ها نسبت به مدل با فاصله ۱۰ متری دارد. بیشترین خرابی پلاستیک این بار در ارتفاع ستون و در فاصله حدود ۲۰ متری رخ می‌دهد. میزان خرابی کششی بتن و فولاد سازه ستون برابر با نیرویی ۳۰۲ مگاپاسکال را متحمل می‌شود و خرابی فشاری با ۳۰۰ کیلوگرم TNT با فاصله ۱۰ متری عدد ۳۵۴ مگاپاسکال را نشان می‌داد. همچنین مقدار جابجایی سازه ستون در مدت زمان ۰,۰۵۵ ثانیه در مدل ۳۰۰۰ Kg مواد منفجره TNT با فاصله ۱۰ متری به مقدار ۲۲,۳۰ سانتی متر جابجایی داشته است در حالی که در مدل ۳۰۰۰Kg مواد منفجره TNT با فاصله ۱۵ متری به مقدار ۱۵ سانتی متر جابجایی از خود نشان داده است. عکس العمل تکیه گاهی نیز در حالت ۳۰۰۰Kg مواد منفجره TNT با فاصله ۱۵ متری عدد ۱,۴۶۷۵ مگاپاسکال را نشان می‌دهد و در مدل ۳۰۰۰Kg مواد منفجره TNT با فاصله ۱۰ متری عدد ۷۴۵,۱ مگاپاسکال را نشان می‌دهد که نشانگر کاهش تنش تکیه گاهی به میزان ۰,۸۴ درصد نسبت به مدل قبلتر می‌باشد.

منابع

- ۱- آئین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰، ۱۳۹۳، ویرایش چهارم، تهران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، شماره نشر: ض-۲۵۳.
- ۲- وحید ایمانی، ۱۳۹۸، ارزیابی سازه های نرم تحت اثر بار انفجاری، آستارا آموزش عالی شهریار آستارا، ۱۷۶ صفحه
- ۳- اصغری، قاجاری، جواد و زعفرانی، حمید، ۱۳۹۵، اثرات انفجار بر روی ستون پل، پنجمین کنفرانس ملی زلزله و سازه، کرمان، ۹ صفحه
- ۴- بزرگوار، محمود؛ شوشتری، احمد، ۱۳۹۰، اثرات انفجار بر ساختمان‌های بتنی مقاوم در برابر زلزله، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان.
- ۵- پیری، مجتبی، ۱۳۹۵، مقاوم‌سازی ساختمان‌های با اهمیت زیاد در برابر انفجار، همایش ملی پدافند غیرعامل، دانشگاه قزوین، قزوین.
- ۶- حسنی نالوسی، جمال، بررسی اثر انفجار بر ساختمان‌های بتنی، اولین همایش ملی مهندسی سازه ایران، تهران، مرکز همایش های هتل المپیک، ۱۳۹۷
- ۷- حبیبی فر، مسعود، ۱۳۸۹، اثر موج انفجار بر سازه و روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار به منظور پدافند غیرعامل، دومین کنگره بین‌المللی ملی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد قزوین، قزوین.
- ۸- فرزاد عزتی، ۱۴۰۰، ارزیابی سازه های دکل بتن مسلح تحت اثر بارگذاری انفجاری، ارومیه، آموزش عالی آئین کمال، ۱۵۶ صفحه
- ۹- فراهانی، احمد؛ هادیان فرد، محمدعلی؛ رهنما، حسین، ۱۳۹۰، بررسی اثر پرپود سازه بر پاسخ سازه‌های ساختمانی تحت اثر بارهای ناشی از انفجار، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

- ۱۰- مرتضایی، علیرضا، ۱۳۹۲، مطالعه موردی یک ساختمان بتن‌آرمه مقاوم در برابر زلزله تحت اثر بارگذاری انفجار، پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال شانزدهم، شماره اول، دانشگاه سمنان.
- ۱۱- محمود، میثم؛ ملائی، سمیه، ۱۳۹۴، روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی در برابر انفجار، دومین کنفرانس ملی و مهندسی عمران و توسعه پایدار ایران، دانشگاه کردستان.
- ۱۲- مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۲، مبحث نهم طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه، چاپ سیزدهم، تهران: نشر توسعه ایران.
- ۱۳- مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۵، مبحث بیست و یک پدافند غیرعامل، چاپ ششم، تهران: نشر توسعه ایران.
- مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۲، مبحث ششم بارهای وارد بر ساختمان، چاپ نهم، تهران: نشر توسعه ایران.
- ۱۴- مقررات ملی ساختمان، ۱۳۸۸، مبحث پنجم، مصالح و فرآورده‌های ساختمانی چاپ هفتم، تهران: نشر توسعه ایران.
- ۱۵- موسوی، سید جمال الدین؛ زمانی، جمال؛ علوی نیا، علی، ۱۳۸۷، بررسی اثر انفجار بر تخریب کامل بتن مسلح، مرکز همایش ابوعلی سینا، دانشگاه ابوعلی سینا همدان.
- ۱۶- هوایی، غلامرضا؛ بیات، الیاس، ۱۳۹۶، خرابی پیشرونده ناشی از اثر بار انفجار در ساختمان بتن‌آرمه و روش‌های مقاوم‌سازی ستون‌ها، همایش پژوهشی انجمن مهندسی سازه ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران.
- ۱۷- رضا یوسفی، ۱۳۹۸، ارزیابی سازه‌های با اهمیت خیلی زیاد مانند بیمارستان‌ها تحت اثر بار انفجاری، آستارا آموزش عالی شهریار آستارا، ۱۵۸ صفحه

18- L. B. Jayasinghe , D.P.Thambiratnam, N. Perera, and J.H.A.R. Jayasooriya. 2013. Blast Induced Ground Shock Effects on Pile Foundations. World Academy of Science, Engineering and Technology Vol; 2013-04-23.

19- Federal Emergency Management Agency, Primer for Design of Commercial Buildings. 2009

20- Federal Emergency Management Agency. (2003). Primer for Design of Commercial

Longinow, A, & Mniszewski, K. R. (1996, February). Protecting Buildings

21- Son, J, Astaneh-Asl, A. and Rutner, Performance of Bridge Astaneh-As. A., Heydari, C. and Zhao, Analysis of Car-Bomb, Luccioni B.M. Rougier V.C., (2S), Article "Concrete pavement slab under NgoT", Mendis P Gupta A. and Ramsay J., (2007)

22- Kim, S.J., Holub, C.J., and Elnashai, A.S., (2011). "Experimental investigation of the behavior of RC bridge piers subjected to horizontal and vertical earthquake motion." Journal of Structures Engineering, Volume 33, pp. 2221-2235.

23- Farahmand-Tabar, M.;Vahabzadeh, M. Investigation of the progressive collapse in a suspension bridge under the explosive load. Int. J. Steel Struct. 2019, 19, 2039–2050.

24- LSTC (Livermore Software Technology Corporation).LS-DYNA Keyword User's Manual; Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, USA, 2018.

25- Orbovic, N; Grimes, J; El-Domiaty, K; Florek, J. ASME blast test on pre-stressed concrete slabs. In Proceedings of the 24th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Busan, Korea, 20–25 August 2017; BEXCO: Busan, Korea, 2017.

26- Sheikh, M.N., Legeron, F. (2009). "Bridge support elastic reactions under vertical earthquake ground motion." Journal of Structures Engineering, Volume 31, pp. 2317-2326