

بررسی رفتار دال‌های بتن آرمه تحت اثر انفجار

حسین سیف‌اللهی، رضا مرشد*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۸ خرداد ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۹ آذر ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۰ بهمن ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۶ فروردین ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

دال بتن مسلح
مدل سازی عددی
بارگذاری انفجاری
ترک خوردگی
LS-DYNA

چکیده: وقوع انفجار ناشی از عوامل متعددی نظیر حوادث پیش‌بینی نشده و حوادثی نظیر حمله‌های تروریستی که امروزه در جوامع مختلف اتفاق می‌افتد، بررسی رفتار سازه‌ها تحت اثر بارگذاری انفجاری را پر اهمیت می‌سازد. با توجه به کاربرد گسترده دال‌های بتن مسلح، در این پژوهش به بررسی عددی رفتار دال‌های بتن مسلح تحت اثر انفجار پرداخته شده است. با توجه به مشکل بودن و پرهزینه بودن آزمایشات انفجار، تحلیل عددی می‌تواند در کاهش تعداد آزمایشات و تفسیر بهتر نتایج کمک کند. برای حل عددی مدل‌های دال بتنی از نرم‌افزار المان محدود ال‌اس-داینا (LS-DYNA) که توانایی مدل‌سازی انفجار را داراست و همچنین دارای محدوده وسیعی از مدل‌های مواد می‌باشد استفاده شده است. پارامترهای مورد بررسی ابعاد و شرایط تکیه‌گاهی، محل انفجار و میزان ماده منفجره و چگونگی آرماتور گذاری بوده است. نتایج بدست آمده نشان داد مدل‌های مورد بررسی تحت انفجار نزدیک کاملاً گسیخته شده‌اند، با افزایش ضخامت، خیزی که توسط نمونه‌ها تجربه شده است به شدت کاهش یافته و با وجود درصد آرماتور یکسان هرچه قطر آرماتورها کمتر و فاصله قرارگیری آن‌ها نیز کمتر باشد دال‌ها خیز کمتری را تجربه خواهند کرد و در صورتیکه درصد آرماتور به کار رفته در نمونه‌های شبیه‌سازی شده افزایش یابد خیز حداکثری که نمونه‌های شبیه‌سازی شده در شرایط یکسان تجربه کرده‌اند مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد. همچنین تغییر شرایط تکیه‌گاهی از گیردار به ساده تاثیر بسزایی در گستردگی ایجاد ترک و تغییر سطح خرابی دال‌ها دارد. البته افزایش طول دهانه تاثیر چندانی در افزایش سطح خرابی دال‌ها نداشته است.

۱- مقدمه

موج انفجار، ضربه‌ای متشکل از هوای فشرده می‌باشد که به صورت شعاعی و با سرعت فراصوت از سطح ماده منفجره به سمت محیط اطرافش منتشر می‌شود با انبساط این موج و در زمانی که موج در مسیر انفجار به موانع برخورد می‌کند، منعکس شده و در نتیجه فشار ناشی از این موج چند برابر می‌شود و می‌تواند باعث خسارات مالی و جانی گسترده‌ای شود [۱]. بنابراین رفتار اعضای سازه‌ای در مقابل اثرات انفجار از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.

انفجارها می‌توانند سبب آسیب شدید به ساختمان‌ها و گاهی سبب خرابی پیش‌رونده و کامل شوند. فشارهای ناشی از انفجار یکی از مخرب‌ترین بارهایی است که سازه ممکن است تجربه کند. بسیاری از سازه‌های موجود در مقابل بارهای ناشی از موج انفجار آسیب پذیر بوده و لذا می‌بایست مقاومت آن‌ها در برابر چنین بارهایی مورد بررسی قرار گیرد تا با تشخیص نقاط حساس و بحرانی بتوان با استفاده از مصالح و شیوه‌های اجرایی مناسب با بهره‌گیری از روش‌های مختلف، سازه را مقاوم ساخت.

وقوع انفجار ناشی از عوامل متعددی نظیر حوادث پیش‌بینی نشده و حوادثی نظیر حمله‌های تروریستی که امروزه در جوامع مختلف اتفاق می‌افتد

و کاربرد گسترده دال‌های بتن مسلح در ساختمان‌ها، اهمیت بررسی رفتار این سازه‌ها را تحت اثر بارگذاری انفجاری را نشان می‌دهد. علیرغم حائز اهمیت بودن مطالعات آزمایشگاهی و میدانی در خصوص بررسی رفتار دال‌های بتن مسلح در مقابل انفجار، می‌توان با کمک گرفتن از یک روش شبیه‌سازی عددی مطمئن و با دقت کافی تعداد و هزینه‌های آزمایش‌های میدانی را کاهش داد ضمن اینکه انجام آزمایش‌های میدانی نیاز به یک طراحی اولیه دارد که با انجام شبیه‌سازی عددی میسر می‌گردد. البته این موضوع از اهمیت انجام مطالعات میدانی و آزمایشگاهی در این زمینه نمی‌کاهد.

تحلیل پاسخ دینامیکی دال‌های بتن آرمه تحت اثر بارگذاری‌های انفجاری بسیار پیچیده می‌باشد. روش‌های عددی برای مدلسازی چنین رفتاری کاربرد دارد، اما دست‌یابی به نتایج قابل قبول نیازمند دقت و صرف زمان قابل توجه می‌باشد.

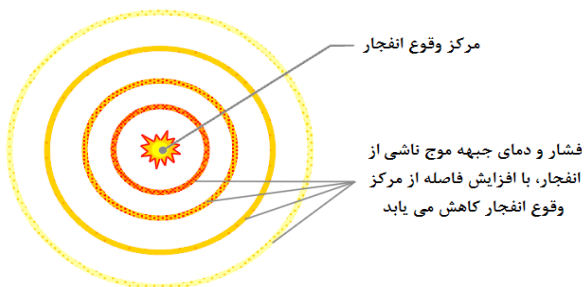
در سال ۱۹۵۵، براد^۱ روابطی را جهت تعیین فشار حاصل از انفجار بر اساس فاصله مقیاسی که به فاصله ماده منفجره نسبت به هدف مورد نظر و میزان ماده منفجره بستگی دارد ارائه کرده است [۲]. در روابط ارائه شده طبیعت انفجار در نظر گرفته نشده است، زیرا فشار حاصل از انفجار تنها

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: morshed@yazd.ac.ir

در پژوهش حاضر به بررسی رفتار دینامیکی و نحوه آسیب دال بتن آرمه تحت اثر بارگذاری ناشی از انفجار پرداخته شده است. پارامترهای متغیر شامل ضخامت دالها، درصد آرماتور، فاصله قرارگیری آرماتورها، ابعاد و شرایط تکیه‌گاهی و همچنین محل و میزان ماده منفجره بوده است.

۲- پدیده انفجار

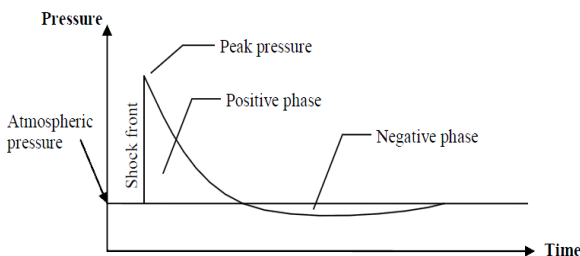
آزاد شدن سریع مقدار زیادی انرژی تحت اثر واکنشی شیمیایی در مدت زمان بسیار کم، مقدار عظیمی از گازها را تولید می‌کند. این گازها به شدت منبسط شده و هوای جلوی خود را به اطراف می‌راند و یک لایه از هوای فشرده در جلوی این گازها ایجاد می‌شود که به سمت خارج از محیط گسترده می‌شود. این لایه بیشترین انرژی را در بر گرفته که اصطلاحاً موج انفجار نامیده می‌شود (شکل ۱) [۷].



شکل ۱: شماتیکی از موج انفجار [۷]

Fig. 1. A schematic of the blast wave

در زمانی کوتاه پس از وقوع انفجار، فشار به بیشترین مقدار می‌رسد. اصطلاحاً به فشار تفاضلی ناشی از انفجار و فشار اتمسفر بیش فشار گفته می‌شود. با گذر زمان فشار ایجاد شده کاهش می‌یابد تا زمانی که برابر با فشار اتمسفر شود (فاز مثبت)، اما همچنان روند کاهشی متوقف نشده و ادامه دارد تا زمانی که اثر آن بتدریج کاهش یافته و برابر با فشار اتمسفر می‌شود (فاز منفی) و در این مرحله مکش رخ می‌دهد (شکل ۲). در نتیجه منحنی نمودار فشار-زمان برای انفجار شامل دو قسمت فاز مثبت و منفی می‌باشد [۱].



شکل ۲: منحنی نمودار فشار-زمان برای انفجار [۷]

Fig. 2. Idealized shockwave pressure in time

توسط یک پارامتر محاسبه می‌شود. این روابط توسط هنریچ^۱، نیومارک^۲ و هسن^۳ طی سال‌ها توسعه پیدا کرد [۲].

در سال ۲۰۰۷، رزاق‌پور و همکاران رفتار دال‌های بتن آرمه مقاوم سازی شده با پوششی از جنس الیاف GFRP را مورد مطالعه قرار دادند [۳]. بر اساس نتایج چگونگی رفتار نمونه‌ها وابسته به پارامترهای انفجار بودند و هرچند در اکثر موارد نمونه‌های مقاوم‌سازی شده دارای عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های اولیه بودند، در بعضی مواقع نیز بر خلاف انتظار رفتار نمونه‌های مقاوم سازی نشده بهتر از نمونه‌های مقاوم سازی شده بوده است.

در سال ۲۰۱۱، تای^۴ و همکاران به تحلیل درباره گسترش موج فشاری انفجار و پاسخ دینامیکی سازه‌های بتن مسلح تحت تاثیر موج فشاری انفجار پرداختند [۴]. بر اساس نتایج این تحقیق ابعاد المان‌های مدل اجزاء محدود در نحوه انتشار موج انفجار موثر بوده و باید به‌نحو مناسب انتخاب شود. از طرفی نتایج حاصل از پاسخ دینامیکی دال‌های بتن مسلح نشان داد که میزان ماده منفجره و فاصله آن نسبت به دال بتن مسلح مواردی هستند که نحوه گسیختگی در دال (خمشی یا برشی) را تعیین می‌کنند. همچنین افزایش آرماتور مصرفی می‌تواند محل خرابی را از مرکز دال به نقاط تکیه‌گاهی انتقال دهد.

در سال ۲۰۱۳، ژائو^۵ و همکاران مکانیزم گسیختگی دال مربعی بتن مسلح با شرایط تکیه‌گاهی دو لبه گیردار تحت بارگذاری انفجاری را مورد بررسی قرار دادند [۵]. در این تحقیق مشاهده شد انفجار نزدیک با توجه به ضعیف بودن مقاومت کششی بتن می‌تواند سبب گسیختگی کششی و همچنین باعث کندن شدن پوشش زیرین در قسمت میانی دال شود. همچنین مشاهده شد افزایش وزن ماده منفجره می‌تواند گسیختگی ایجاد شده در دال را کاهش دهد.

در سال ۲۰۱۴، پانتلیدز^۶ و همکاران با استفاده از دو نوع بتن مسلح معمولی و مسلح شده با الیاف به جمع‌آوری اطلاعات برای ارزیابی روش‌های شبیه‌سازی بارگذاری‌های انفجاری در محدوده نزدیک پرداخته و در نهایت سه سطح حفاظت با توجه به عرض ترک، خیز و کاهش وزن ارائه کردند [۶]. نتایج حاصل نشان داد گسیختگی پنل‌های بتن مسلح با آرماتورهای فولادی شکل‌پذیر و گسیختگی پنل‌های بتن مسلح الیافی بصورت ترد می‌باشد.

در سال ۲۰۱۶، یاو^۷ و همکاران به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار دال‌ها با رویکرد مقاوم شده در برابر انفجار پرداختند معیار درصد آرماتور بکار رفته در دال‌های بتن آرمه هدف اصلی بررسی در این پژوهش انتخاب شد و نتایج نشان داد که خیز ایجاد شده در دال‌ها نسبت عکس با درصد آرماتور بکار رفته در دال‌ها دارد [۱۳].

- 1 Henrich
- 2 Newmark
- 3 Hansen
- 4 Tai
- 5 Zhao
- 6 Pantelides
- 7 Yao

۳- اثر نرخ کرنش بر خصوصیات مصالح

نرخ کرنش و اینرسی عوامل بسیار مهمی در زمینه رفتار سازه‌ها زمانی که تحت بارگذاری انفجاری قرار می‌گیرند می‌باشند. بتن و فولاد جزء مصالحی هستند که به نرخ کرنش وابسته می‌باشند به گونه‌ای که در نرخ‌های کرنش بالا مقاومت اینگونه مصالح افزایش می‌یابد [۸]. افزایش مقاومت دینامیکی توسط ضرایب افزایش مقاومت دینامیکی مشخص می‌شود که در شکل ۳ میزان آن نشان داده شده است.

کششی دینامیکی در نرخ کرنش $\dot{\epsilon}$ در محدوده $10^{-6} S^{-1}$ تا $10^2 S^{-1}$ ، f_{ts} مقاومت کششی بتن در $\log \beta = 6\delta - 2$ ، $\delta = 1/(1 + 8f'_c/f'_{co})$ ، ϵ_{ts} ، و f'_{co} برابر $10 MPa$ در نظر گرفته می‌شود [۸]. ضریب افزایش مقاومت دینامیکی فولاد طبق رابطه ۵ محاسبه می‌شود که در روابط ارائه شده f_y مقاومت تسلیم فولاد برحسب MPa می‌باشد.

$$CDIF = f_c/f'_{cs} = (\epsilon/\epsilon'_{cs})^{1.026\alpha} \quad \text{for } \dot{\epsilon} \leq 30s^{-1} \quad (1)$$

$$CDIF = f_c/f'_{cs} = \gamma(\epsilon)^{1/3} \quad \text{for } \dot{\epsilon} > 30s^{-1} \quad (2)$$

$$TDIF = f_t/f'_{ts} = (\epsilon/\epsilon'_{ts})^\delta \quad \text{for } \dot{\epsilon} \leq 1s^{-1} \quad (3)$$

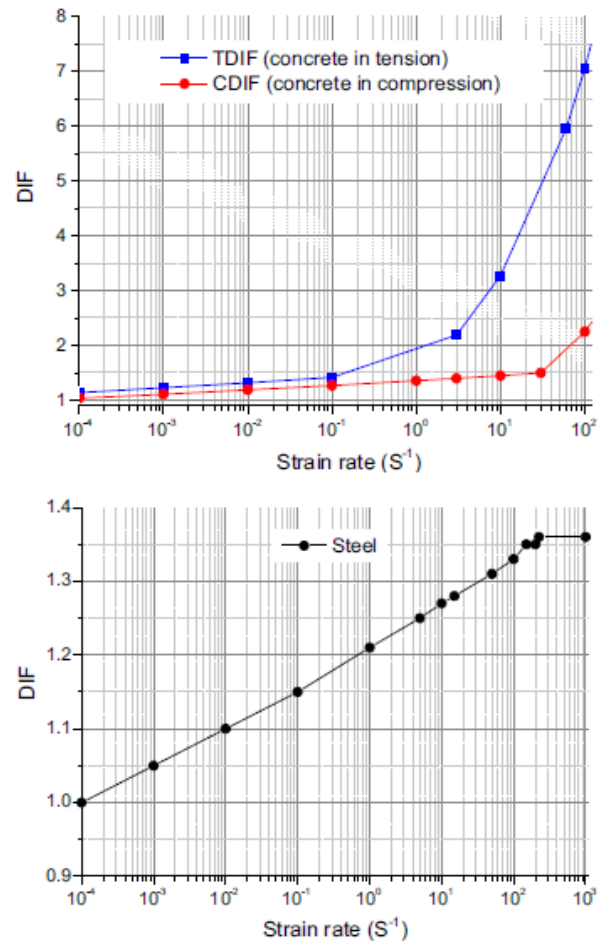
$$TDIF = f_t/f'_{ts} = \beta = (\epsilon/\epsilon'_{ts})^{1/3} \quad \text{for } \dot{\epsilon}_{td} > 1s^{-1} \quad (4)$$

$$DIF = (\epsilon/10^{-4})^\alpha \quad (5)$$

$$\alpha = 0.074 - 0.040f_y/414 \quad (6)$$

۴- مدل سازی

در پژوهش حاضر شبیه‌سازی نمونه‌های بتن مسلح تحت بارگذاری انفجاری به کمک نرم‌افزار LS-DYNA انجام شده است. جهت مدل‌سازی بتن از المان Solid و مدل مصالح Winfrith استفاده شده است، این مدل اثرات نرخ کرنش را در نظر می‌گیرد [۹]. همچنین توانایی مدل ترک در هر المان را داراست، به منظور مدل‌سازی آرماتورها از المان Beam و مدل Plastic Kinematic که اثرات نرخ کرنش را در نظر می‌گیرد استفاده شده است. روش‌های مختلفی به منظور تعریف تماس میان بتن و میلگرد وجود دارد، ترکیب کردن المان‌های تیر با المان‌های بتن در گره‌های مشترک و متصل کردن المان‌های تیر به المان‌های بتن با استفاده از مدل 1-D contact که اتصال لغزشی میان بتن و فولاد را در نظر می‌گیرد از آن جمله است. هرچند با توجه به نرخ بالای بارگذاری حاصل از انفجار می‌توان از اتصال لغزشی میان بتن و میلگرد نیز صرف نظر کرد [۱۰]. با توجه به موارد بیان شده مدل Lagrange in Solid به منظور تماس میان بتن و میلگرد انتخاب شده است [۱۱]. برای اطمینان از صحت مدل عددی، نتایج مطالعات آزمایشگاهی تای ۱ و همکاران [۴] شبیه‌سازی شده و نتایج خیز دال بر اساس شبیه‌سازی عددی برای مقادیر مختلف TNT در شکل ۴ ارائه شده است. مقایسه نتایج عددی شکل ۴ با نتایج آزمایشگاهی مرجع ۴ در شکل ۵ صحت مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد. نتایج مدل‌سازی با تحقیقات رزاق پور و همکاران [۳] و وانگ ۲ و همکاران [۱۳] نیز مقایسه و صحت‌سنجی شده است که برای اختصار در اینجا آورده نشده است.



شکل ۳: ضرایب افزایش مقاومت دینامیکی (DIF) برای بتن و فولاد بر اساس نرخ کرنش [۸]

Fig. 3. Dynamic increase factors versus strain rate for Concrete and Steel

در پژوهش حاضر اثرات نرخ کرنش در محاسبات در نظر گرفته شده است. ضریب افزایش مقاومت دینامیکی فشاری و کششی بتن به ترتیب با استفاده از روابط ۱ تا ۴ تعیین می‌شوند [۸]. در این روابط f'_c مقاومت فشاری دینامیکی در نرخ کرنش $\dot{\epsilon}$ ، f'_{cs} مقاومت فشاری استاتیکی در نرخ کرنش ϵ_{cs} ، $\alpha = 1/(5 + 3f'_{cu}/4)$ ، $\log \gamma = 6.156\alpha - 0.49$ ، و f'_{cu} مقاومت فشاری نمونه مکعبی بتن برحسب MPa می‌باشد. همچنین f'_t مقاومت

1 Tai
2 Wang

۴-۱- مشخصات دال‌های بتن آرمه شبیه‌سازی شده

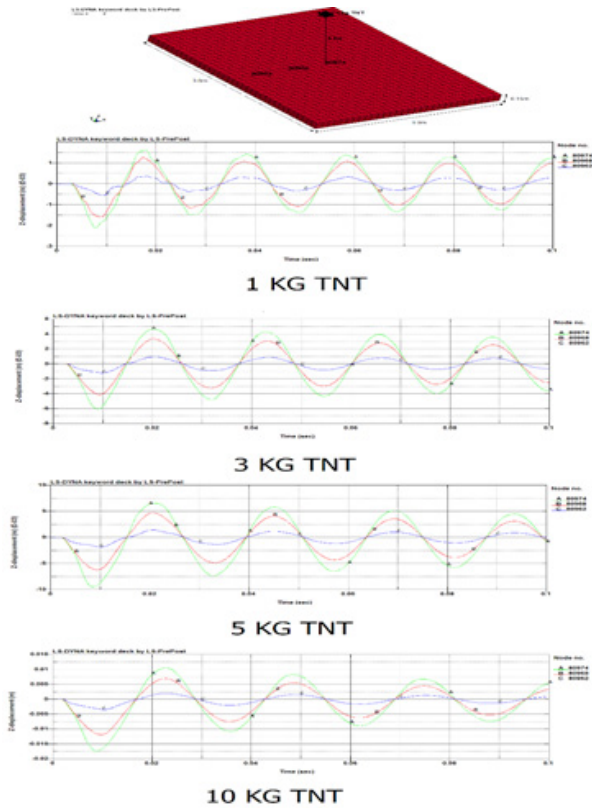
در این پژوهش ۱۹ نمونه دال بتنی که توسط میلگردهای فولادی مسلح شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ابعاد دال‌های بتن مسلح و آرماتورهای مورد استفاده در نمونه‌های مدل‌سازی شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات دال‌ها

Table 1. Details of slab models

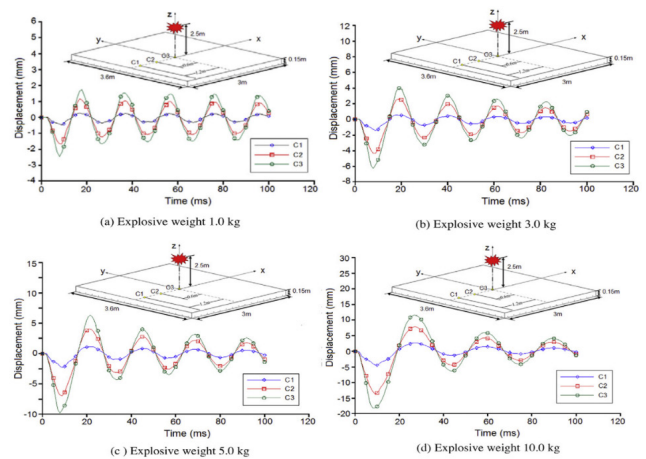
شماره نمونه	ابعاد دال (cm)	میزان آرماتور	آرماتور به کار رفته
۱	۳۰۰*۳۰۰*۱۵	۰/۵%	۲۳Φ۱۳@۱۸cm
۲	۳۰۰*۳۰۰*۱۵	۰/۵%	۱۴Φ۱۰@۲۲cm
۳	۳۰۰*۳۰۰*۱۵	۰/۵%	۱۰Φ۱۲@۳۰cm
۴	۳۰۰*۳۰۰*۲۰	۰/۵%	۳۰Φ۸@۱۰cm
۵	۳۰۰*۳۰۰*۲۰	۰/۵%	۱۳Φ۱۲@۲۴cm
۶	۳۰۰*۳۰۰*۲۰	۰/۵%	۱۰Φ۱۴@۳۰cm
۷	۳۰۰*۳۰۰*۱۵	۱/۰%	۳۰Φ۱۰@۱۰cm
۸	۳۰۰*۳۰۰*۱۵	۱/۰%	۱۵Φ۱۴@۲۰cm
۹	۳۰۰*۳۰۰*۱۵	۱/۰%	۱۲Φ۱۶@۲۵cm
۱۰	۳۰۰*۳۰۰*۲۰	۱/۰%	۳۰Φ۱۲@۱۰cm
۱۱	۳۰۰*۳۰۰*۲۰	۱/۰%	۲۰Φ۱۴@۱۵cm
۱۲	۳۰۰*۳۰۰*۲۰	۱/۰%	۱۵Φ۱۶@۲۰cm
۱۳	۳۰۰*۳۰۰*۱۵	۰/۵%	۱۴Φ۱۰@۲۲cm
۱۴	۴۰۰*۳۰۰*۱۵	۰/۵%	۱۹Φ۱۰@۲۱cm
۱۵	۵۰۰*۳۰۰*۱۵	۰/۵%	۱۴Φ۱۰@۲۲cm
۱۶	۵۰۰*۵۰۰*۲۰	۰/۵%	۳۱Φ۱۰@۱۶cm
۱۷	۵۰۰*۵۰۰*۲۰	۱/۰%	۱۶cm@۳۲Φ۱۴
۱۸	۵۰۰*۵۰۰*۲۰	۰/۵%	۳۱Φ۱۰@۱۶cm
۱۹	۵۰۰*۵۰۰*۲۰	۱/۰%	۳۲Φ۱۴@۱۶cm

میلگردها با ضخامت پوشش حداقل ۲cm بصورت متقارن در دو وجه توزیع شده‌اند و مجموع میزان آرماتور در دو وجه در هر امتداد ۰/۵ و ۱/۰ درصد و در حد نسبت‌های متداول در نظر گرفته شده است. شرایط تکیه گاهی در نمونه ۱۳ به صورت مفصلی و در بقیه نمونه‌ها بصورت گیردار در نظر گرفته شده است. انفجار در نمونه‌های شماره ۱۸ و ۱۹ بصورت نامتقارن و در یک چهارم دهانه و در سایر نمونه‌ها بصورت متقارن روی خط عمود بر مرکز دال ایجاد شده است. در مجموع متغیرهای مورد بررسی شامل ابعاد، ضخامت، میزان آرماتور، فاصله قرارگیری آرماتورها نسبت به یکدیگر، شرایط



شکل ۴: نتایج مدل‌سازی عددی آزمایشات تای [۴]

Fig. 4. Results of numerical modeling of Tai's tests

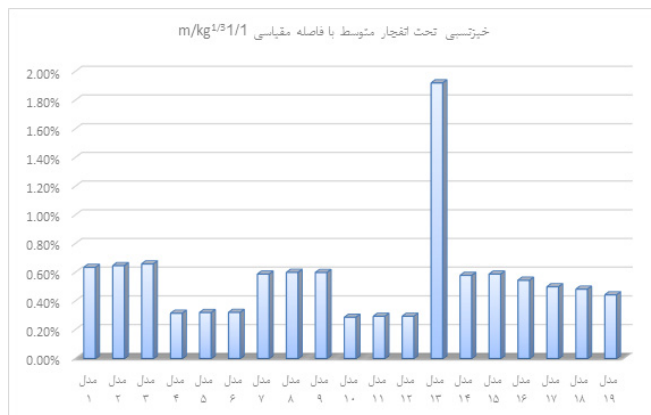


شکل ۵: نتایج خیز اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های تای و همکاران [۴]

Fig. 5. Measured displacements in Tai's tests

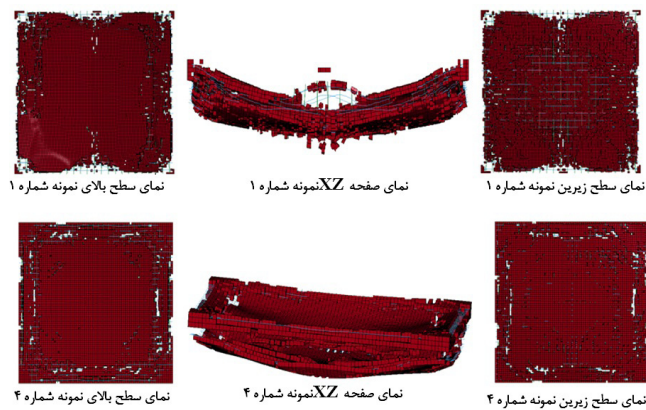
۵-۱- محدوده انفجار نزدیک

نمونه‌های شماره ۱ و ۴ تحت انفجاری با فاصله مقیاس $0.56 \text{ m/kg}^{1/3}$ قرار گرفتند. نحوه گسیختگی در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود در نمونه شماره ۱ شرایط تکیه‌گاهی کاملاً از بین رفته و گسیختگی برشی اتفاق افتاده، همچنین مشاهده می‌شود پوشش آرماتورها در قسمت زیرین دال کاملاً از بین رفته است، در نمونه شماره ۴ نیز در عمقی از سطح مقطع دال گسیختگی بصورت شکاف خوردگی کاملاً مشهود است و تقریباً مشابه نمونه ۱ بتن نواحی تکیه‌گاهی عمدتاً تخریب شده است. نتایج نشان می‌دهد دال‌های بتن مسلح مورد بررسی (با ضخامت و نسبت آرماتور معمول) قادر به تحمل انفجار نزدیک نبوده و دچار شکست برشی و فرو ریختگی گردیده‌اند.



شکل ۶: مقایسه خیز نسبی تحت انفجار با فاصله مقیاسی متوسط

Fig. 6. relative deflection comparison under medium scale blast wave



شکل ۷: گسیختگی ایجاد شده تحت انفجار با فاصله مقیاسی نزدیک ($0.56 \text{ m/kg}^{1/3}$)

Fig. 7. Rupture caused by a near-scale explosion

تکیه‌گاهی، شدت و محل انفجار بوده‌اند.

مشخصات عمومی بتن و فولاد مورد استفاده در شبیه‌سازی به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات عمومی بتن

Table 2. General properties of concrete

۲۵	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)
۳	مقاومت کششی تک محوره (MPa)
۰/۱۵	ضریب پواسون
۲۴۰۰	چگالی (kg/m^3)
۱۸/۹۷	مدول الاستیسیته (GPa)

جدول ۳: مشخصات عمومی فولاد

Table 3. General properties of steel

۲۱۰	مدول الاستیسیته (GPa)	۷۸۰۰	چگالی (kg/m^3)	۰/۳	ضریب پواسون	۴۰۰	تنش تسلیم (MPa)
-----	-----------------------	------	---------------------------	-----	-------------	-----	-----------------

۴-۲- شبیه‌سازی بارگذاری انفجاری

در نرم‌افزار LS-DYNA نمودار تاریخچه فشار-زمان بارگذاری انفجاری با استفاده از روش CONWEP که یک تابع بارگذاری انفجاری به صورت تجربی می‌باشد و بر اساس محدوده وسیعی از داده‌ها و اطلاعات آزمایشی فراهم شده است بدست می‌آید [۱۲]. در روش CONWEP میزان ماده منفجره TNT به همراه موقعیت قرارگیری آن دریافت شده و با توجه به نتایج آزمایشی فراهم شده مربوط به گستره وسیعی از انفجارها در روش موردنظر، میزان فشار وارده نسبت به زمان تعیین می‌شود. با تعیین قسمت‌هایی از هدف که انفجار به آن‌ها فشار وارد می‌کند بارگذاری حاصل از انفجار به هدف اعمال می‌شود. در پژوهش انجام شده انفجار در محدوده نزدیک (با فاصله مقیاسی $0.56 \text{ m/kg}^{1/3}$) و متوسط (با فاصله مقیاسی $1 \text{ m/kg}^{1/3}$) بررسی شده است. فاصله مقیاسی پارامتری می‌باشد که محدوده انفجار را مشخص می‌کند [۲]. در رابطه ۷ این پارامتر ارائه شده است و در آن R فاصله ماده منفجره تا هدف مورد نظر برحسب متر (m) و W میزان ماده منفجره بر اساس کیلوگرم (kg) است.

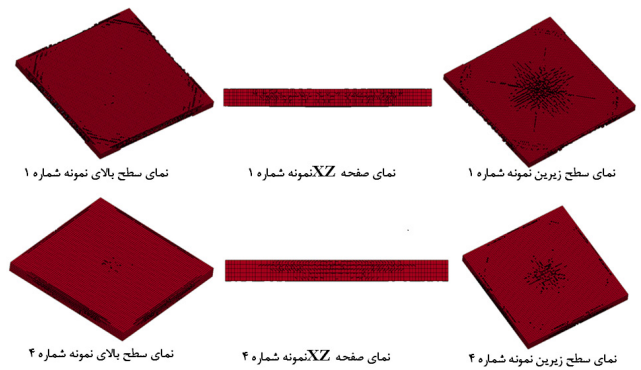
$$Z = R / \sqrt[3]{W} \quad (7)$$

۵- بررسی نتایج

رفتار نمونه‌ها تحت انفجار با فاصله مقیاسی نزدیک و متوسط مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

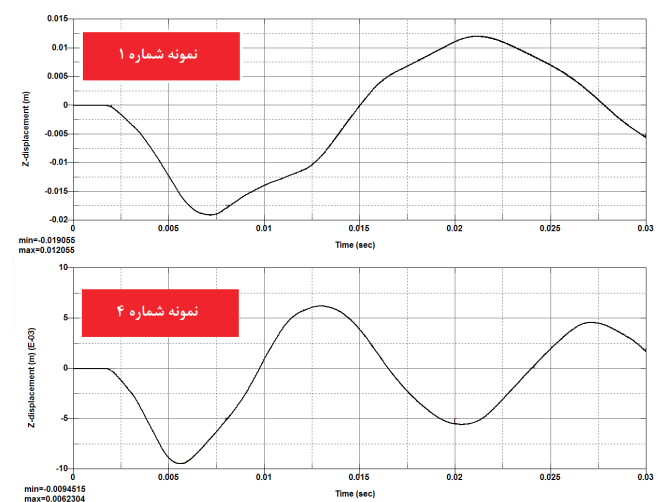
۵-۲- محدوده انفجار متوسط

به منظور بررسی مود شکل‌پذیر دال‌ها، سایر نمونه‌ها جهت بررسی مود رفتار خمشی تحت انفجاری با فاصله مقیاسی $1/1 \text{ m/kg}^{1/3}$ قرار گرفته‌اند. در این فاصله مقیاسی انفجار ۲۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT در فاصله ۳ متری نسبت به سطح دال مورد بررسی قرار گرفته است. خرابی ایجاد شده در اکثر این نمونه‌ها با انجام ترمیم در نواحی تکیه‌گاهی و مرکزی قابل کنترل بوده و مود حاکم بر رفتار نمونه‌ها به صورت خمشی بوده است (شکل ۸). نمونه پاسخ ارتعاشی دال‌ها به انفجار متوسط در شکل ۹ نشان داده شده است. فرکانس ارتعاشی با افزایش ضخامت دال از ۱۵ به ۲۰ cm حدود دو برابر و خیز حداکثر تقریباً نصف شده است. در ادامه دو پارامتر اصلی رفتاری نمونه‌های دال، خیز حداکثر و میزان ترک‌خوردگی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.



شکل ۸: میزان خرابی ایجاد شده تحت انفجار با فاصله مقیاسی متوسط ($1/1 \text{ m/kg}^{1/3}$)

Fig. 8. Damage caused by explosion with medium scale spacing



شکل ۹: پاسخ ارتعاشی مرکز دال در نمونه‌های شماره ۱ و ۴

Fig. 9. Vibration response in center of slabs no.1 and no.4

۵-۱-۲- بررسی خیز دال‌ها تحت انفجار متوسط

خیز حداکثر دال‌های مدل‌سازی شده و درصد آن نسبت به طول دهانه در جدول ۴ نشان داده شده است و در شکل ۶ مورد مقایسه قرار گرفته است. مشاهده می‌شود نمونه‌های دال خیزهای متفاوتی تحت انفجار یکسان تجربه کرده‌اند. در نمونه‌هایی که دارای ابعاد و میزان آرماتور یکسانی هستند هرچه قطر آرماتورها کوچکتر و تعداد آرماتورهای به کار رفته افزایش یافته است، خیزی که توسط نمونه تجربه شده است اندکی کاهش یافته است. البته حداکثر کاهش خیز مشاهده شده در اثر این عامل کمتر از ۴ درصد بوده است. تاثیر افزایش نسبت آرماتور روی کاهش خیز نیز نسبتاً اندک بوده است بطوری که در شرایط مشابه با دو برابر شدن نسبت آرماتور، خیز نمونه‌های دال بین ۷ تا ۱۰ کاهش یافته است.

تاثیر افزایش ضخامت روی کاهش خیز قابل توجه بوده است بگونه‌ای که با افزایش ضخامت دال از ۱۵ cm به ۲۰ cm، حدود ۵۱٪ کاهش خیز مشاهده شده است.

شرایط تکیه گاهی ساده نیز خیز را به میزان زیادی افزایش می‌دهد، بگونه‌ای که نمونه دال ۱۳ با شرایط تکیه گاهی ساده خیزی در حدود ۵۷ mm را تجربه نموده که در حدود سه برابر دال مشابه دال ۲ با شرایط تکیه گاهی گیردار است.

بررسی تاثیر طول دهانه روی خیز نشان دهنده اینست که با افزایش طول دهانه از ۳ m متر به ۵ m متر، خیز حداکثر دال ۲/۸ برابر افزایش یافته است. این افزایش خیز تحت بار انفجاری مشابه بسیار کمتر از افزایش خیز مورد انتظار تحت اثر بارهای استاتیکی مشابه، یعنی متناظر با توان ۳ تا ۴ افزایش طول دهانه، است (تغییر مکان ۵ تا ۷ برابر). به عبارت دیگر می‌توان گفت با افزایش طول دهانه از ۳ m به ۵ m بار استاتیکی معادل انفجار در حدود ۲ برابر کاهش داشته است.

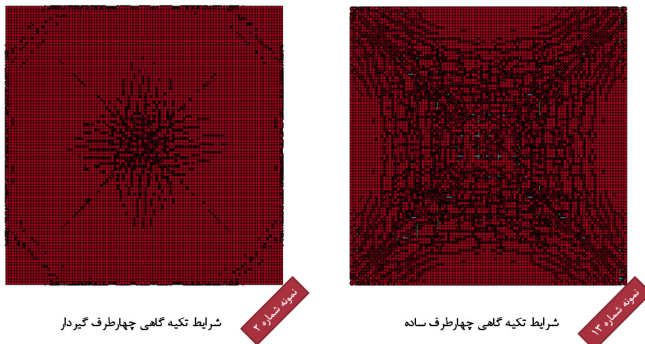
تبدیل ابعاد دال از مربع به مستطیل نیز در افزایش خیز دال موثر بوده است. دال ۴ m در ۳ m نسبت به دال مشابه با ابعاد ۳ m در ۳ m، ۲۱ درصد و دال ۵ m در ۳ m حدود ۵۲٪ افزایش خیز را تجربه نموده‌اند که عامل آن را می‌توان در تغییر رفتار از دوطرفه به یک طرفه دانست.

با انتقال محل انفجار از مرکز دال به فاصله یک چهارم دهانه در دال‌های دهانه ۵ متری با ۰/۵ و ۱/۰ درصد آرماتور، حدود ۱۱ درصد از خیز حداکثر کاسته شد و مطابق انتظار برای انفجار متوسط، بیشترین تاثیر برای انفجار روی امتداد محور عمود بر مرکز دال بدست آمد.

جدول ۴: خیز نمونه‌های دال تحت انفجار متوسط

Table 4. The deflection of slabs under medium scale blast wave

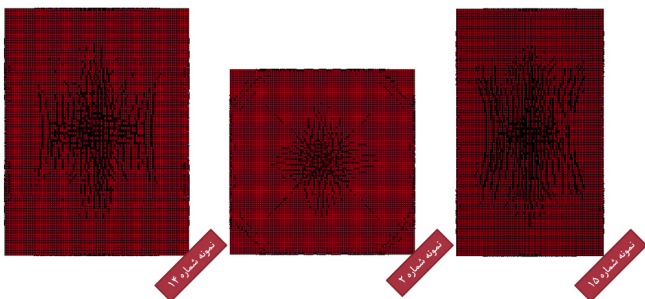
شماره نمونه	ماکزیمم خیز (mm)	خیز نسبی (%)
۱	۱۹/۰۵۵	۰/۶۳۵
۲	۱۹/۴۱۲	۰/۶۴۷
۳	۱۹/۷۶۲	۰/۶۵۹
۴	۹/۴۵۱۵	۰/۳۱۵
۵	۹/۵۹۳۶	۰/۳۲۰
۶	۹/۶۳۷	۰/۳۲۱
۷	۱۷/۶۳۶	۰/۵۸۸
۸	۱۸/۰۲۳	۰/۶۰۰
۹	۱۷/۹۷۲	۰/۵۹۹
۱۰	۸/۵۹۹۸	۰/۲۸۷
۱۱	۸/۸۳	۰/۲۹۴
۱۲	۸/۸۳۴۶	۰/۲۹۴
۱۳	۵۷/۶۴	۱/۹۲۱
۱۴	۲۳/۱۴۷	۰/۵۷۹
۱۵	۲۹/۳۸	۰/۵۸۸
۱۶	۲۷/۲۷۲	۰/۵۴۵
۱۷	۲۴/۹۹	۰/۵۰۰
۱۸	۲۴/۱۶۲	۰/۴۸۳
۱۹	۲۲/۱۷۲	۰/۴۴۳



شکل ۱۰: مقایسه ترک خوردگی دال با شرایط تکیه گاهی ساده و گیردار

Fig. 10. Cracking in slabs with fixed and simple boundary conditions

بعد از نمونه دال با تکیه گاه ساده، بیشترین میزان ترک خوردگی در نمونه‌های دال با ابعاد مستطیلی مشاهده گردید. سطح ترک خوردگی نسبی در این دال‌ها با افزایش نسبت طول به عرض دال افزایش یافته است. سطح نسبی ترک خوردگی در دال ۳ m در ۳ m در ۳ m با ضخامت ۱۵ cm حدود ۳۰ درصد، در دال مستطیلی با ابعاد ۳ m در ۴ m در ۴ m متر ۴۲ درصد و در دال مستطیلی با ابعاد ۳ m در ۵ m به ۵۴ درصد رسیده است. ضمناً امتداد ترک‌ها در دال‌های مستطیلی عمدتاً در راستای طولی دال است که بیانگر تغییر رفتار از دو طرفه به یک طرفه است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: مقایسه ترک‌های ایجاد شده در قسمت زیرین دال‌ها با نسبت ابعاد متفاوت

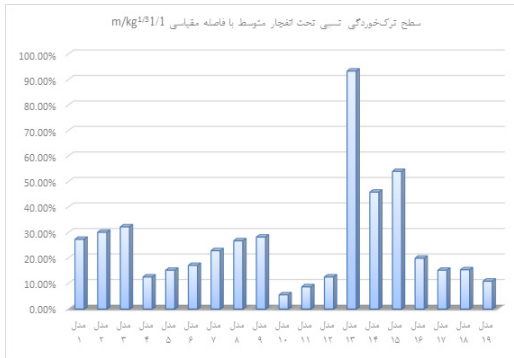
Fig. 11. Comparison of cracks in the lower part of the slabs with different aspect ratios

خلاصه نتایج ترک خوردگی دال‌ها تحت انفجار متوسط در جدول ۵ آورده شده است و در شکل ۱۲ مورد مقایسه قرار گرفته است. افزایش نسبت آرماتور و کاهش فاصله آرماتورها نیز روی کاهش سطح ترک خوردگی نسبی تاثیر گذار بوده اند. در دال‌های مشابه، افزایش نسبت آرماتور به دو برابر تا حدود ۶ درصد سطح ترک خوردگی نسبی را کاهش داده است. کاهش سطح

۵-۲-۲- بررسی ترک خوردگی تحت انفجار متوسط

با توجه به اینکه تحت انفجار با فاصله متوسط از مود خرابی‌های موضعی و برشی دور شده و به مود خرابی خمشی رسیده‌ایم، انتظار می‌رود پیشرفت خرابی و ترک خوردگی در دال رابطه مستقیمی با افزایش خیز دال داشته باشد.

بیشترین ترک خوردگی و خرابی در دال با شرایط تکیه گاهی ساده مشاهده گردید (شکل ۱۰). ترک خوردگی در نمونه با شرایط تکیه گاهی چهار طرف ساده در کل سطح زیرین دال گسترش یافته و می‌تواند سطح عملکرد را تا آستانه فروریزش تغییر دهد. سطح ترک خوردگی نسبی، که می‌تواند به صورت نسبت مساحت ترک خورده دال به کل مساحت دال تعریف شود، در این نمونه به ۹۳ درصد درصد رسیده است.



شکل ۱۲: مقایسه سطح ترک خوردگی نسبی تحت انفجار با فاصله مقیاسی متوسط

Fig. 12. Relative cracking level comparison under medium scale blast

۶- نتیجه گیری

خلاصه نتایج بدست آمده با توجه به مدل سازی های انجام گرفته و بررسی آن ها در ذیل بیان شده اند.

- با توجه به صحت سنجی انجام شده، روش مورد استفاده در رابطه با شبیه سازی رفتار دال های بتن آرمه تحت اثر انفجار می تواند بمنظور کاهش هزینه ها و مشکلات انجام مطالعات آزمایشگاهی بکار گرفته شود. همچنین می توان جهت طراحی اولیه مربوط به آزمایش های میدانی از روش شبیه سازی ارائه شده استفاده کرد. البته انجام مطالعات عددی و شبیه سازی های عددی از ارزش مطالعات آزمایشگاهی و میدانی نمی کاهد و انجام مطالعات آزمایشگاهی بمنظور دستیابی به نتایج واقعی از اهمیت ویژه ای برخوردار است.
- تحت فاصله مقیاسی $0.56 \text{ m/kg}^{1/3}$ که برای شبیه سازی انفجار نزدیک انتخاب شده بود، مود شکست دو نمونه دال مورد بررسی بصورت گسیختگی برشی و شکاف خوردگی مشاهده گردید و نمونه ها دچار تخریب کامل شدند.
- تحت فاصله مقیاسی $1/1 \text{ m/kg}^{1/3}$ که جهت شبیه سازی انفجار با فاصله متوسط انتخاب شده بود، پاسخ دال های بتن آرمه تحت مود خمشی ارزیابی گردید. این فاصله مقیاسی معادل با انفجار 20 Kg تی ان تی در فاصله 3 m از سطح دال بوده است. خرابی در این نمونه ها بصورت ترک خوردگی خمشی با سطح نسبی ۵ تا ۹۳ درصد مشاهده گردید اما هیچ یک از نمونه ها دچار تخریب کامل نشدند.
- شرایط تکیه گاهی گیردار در مقایسه با ساده خیز دال را تحت انفجار متوسط تا سه برابر و سطح ترک خوردگی را نیز در همین حدود کاهش داده است.
- در نمونه های دال که دارای ابعاد و میزان آرماتور یکسانی هستند با کاهش قطر و فاصله میلگردها خیز و ترک خوردگی مشاهده شده

ترک خوردگی نسبی با کاهش فاصله آرماتورها تا حدود ۷ درصد بوده است. افزایش ضخامت تاثیر قابل توجهی در کاهش سطح ترک خوردگی نسبی داشته و میزان ترک خوردگی با افزایش ضخامت از 15 cm به 20 cm کمتر از نصف شده است. در مجموع در دال 3 m در 3 m با 20 cm ضخامت و ۱ درصد آرماتور با کمترین فاصله آرماتورها (دال ۱۰) کمترین سطح ترک خوردگی نسبی (تنها ۵ درصد) را تجربه نموده است. نتیجه قابل توجه دیگر مربوط به افزایش طول دهانه دال ها است. افزایش طول دهانه دال های با ضخامت 20 cm از 3 m به 5 m سطح ترک خوردگی نسبی را چندان افزایش نداده است. میزان سطح ترک خوردگی نسبی برای دال های با دهانه 5 m برای نسبت های آرماتور 0.5 و 1.0 درصد بترتیب 20 و 15 درصد بوده است که نمایشگر آسیب اندک وارده به آن ها تحت انفجار با فاصله مقیاسی متوسط است. جایجایی امتداد انفجار از مرکز دال به فاصله یک چهارم دهانه نیز باعث کاهش سطح خرابی نسبی در دال ها شده است.

جدول ۵: سطح ترک خوردگی نسبی تحت انفجار متوسط

Table 5. Relative cracking level under medium scale blast wave

شماره نمونه	سطح ترک خوردگی نسبی (%)	سطح ترک خوردگی (m^2)
۱	۲۷/۳۳	۲/۴۶
۲	۳۰/۱۱	۲/۷۱
۳	۳۲/۲۲	۲/۹۰
۴	۱۲/۵۶	۱/۱۳
۵	۱۵/۲۲	۱/۳۷
۶	۱۷/۱۱	۱/۵۴
۷	۲۲/۸۹	۲/۰۶
۸	۲۶/۷۸	۲/۴۱
۹	۲۸/۲۲	۲/۵۴
۱۰	۵/۵۶	۰/۵۰
۱۱	۸/۷۲	۰/۷۸۵
۱۲	۱۲/۵۶	۱/۱۳
۱۳	۹۳/۳۳	۸/۴۰
۱۴	۴۵/۸۳	۵/۰۵
۱۵	۵۴/۱۰	۸/۱۰
۱۶	۴/۹۸۷	۴/۹۸۷
۱۷	۳/۸۰	۳/۸۰
۱۸	۳/۸۴۴	۳/۸۴۴
۱۹	۲/۷۳	۲/۷۳

- [2] H. L. Brode, "Numerical Solution of Spherical Blast Waves," Applied Physics, 1955
- [3] A. G. Razaqpur, A. Tolba, and E. Contestabile, "Blast Loading Response of Reinforced Concrete Panels Reinforced with Externally Bonded GFRP Laminates," Composites: Part B, vol. 38, pp. 535-546, 2007.
- [4] Y. S. Tai, T. L. Chu, H. T. Hu, and J. Y. Wu, "Dynamic Response of a Reinforced Concrete Slab subjected to Air Blast Load," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 56, pp. 140-147, 2011.
- [5] S. Yao, D. Zhang, X. Chen, F. Lu, and W. Wang, "Experimental and numerical study on the dynamic response of RC slabs under blast loading," Engineering Failure Analysis, vol. 66, pp. 120-129, 2016.
- [6] LS-DYNA, LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL Material Models, vol. III, 2012.
- [7] R. Augustsson and M. Harenstam, "Design of Reinforced Concrete Slab with Regard to Explosion," Master's Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2010.
- [8] W. Chen, Hao, H., Chen, S., , "Numerical Analysis of Prestressed Reinforced Concrete Beam subjected to Blast Loading," Materials and Design, vol. 65, pp. 662-674, 2015.
- [9] "LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL Material Models," vol. II, 2012.
- [10] K. Xu and Y. Lu, "Numerical Simulation Study of Spallation in Reinforced Concrete Plates subjected to Blast Loading," Computers & Structures, vol. 84, pp. 431-438, 2006.
- [11] "LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL," vol. I, 2012.
- [12] X. Lin, Y. X. Zhang, and P. J. Hazell, "Modelling the Response of Reinforced Concrete Panels under Blast Loading," Materials and Design, vol. 56, pp. 620-628, 2014.
- [13] S. Yao, D. Zhang, X. Chen, F. Lu, and W. Wang, "Experimental and numerical study on the dynamic response of RC slabs under blast loading," Engineering Failure Analysis, vol. 66, pp. 120-129, 2016.

- کاهش یافت اما میزان کاهش چندان قابل توجه نبود.
- در نمونه های مشابه با افزایش ضخامت از ۱۵ cm به ۲۰ cm ، میزان خیز حداکثر به میزان قابل توجه حدود ۵۱ درصد کاهش یافت. سطح ترک خوردگی نسبی نیز در این نمونه ها کمتر از نصف گردید.
 - دو برابر شدن نسبت آرماتور در دال های مشابه خیز را تنها در حدود ۷ تا ۱۰ درصد کاهش داد. میزان کاهش سطح ترک خوردگی نسبی قدری بیشتر و از ۱۰ تا حدود ۵۰ درصد بوده است.
 - سطح خرابی ایجاد شده طی انفجار می تواند تا حد زیادی توسط میزان و توزیع آرماتور و افزایش ضخامت کنترل شود. در بین دال های ۳ m در ۳ m نمونه شماره ۱۰ با ضخامت ۲۰ cm و میزان آرماتور کلی ۱ درصد و فاصله ۱۰ cm میلگردها ترک خوردگی بسیار ناچیز بوده است.
 - ترک های ایجاد شده در دال های مستطیلی با شرایط تکیه گاهی چهار طرف گیردار تحت انفجار متوسط بیشتر به موازات لبه بزرگتر ایجاد شده است (رفتار یکطرفه). در حالیکه در نمونه های مربعی دال ها به صورت دوطرفه عمل کرده اند و ترک های ایجاد شده به صورت شعاعی هستند. افزایش طول یکی از دهانه ها در دال های ۳ m در ۳ m تا ۵ m ، خیز را تا حدود ۵۰ درصد و سطح ترک خوردگی نسبی را تا حدود ۸۰ درصد افزایش داده است.
 - افزایش طول دهانه دال های مربعی از ۳ m به ۵ m تحت انفجار متوسط باعث افزایش خیز و سطح ترک شده است اما این افزایش از میزان مورد انتظار بسیار کمتر بوده است. بویژه سطح ترک خوردگی نسبی که حتی در دال های با دهانه ۵ m نیز کمتر از ۲۰ درصد باقی مانده است. این سطح نسبی در دال های مشابه با دهانه ۳ m تا حدود ۱۵ درصد بوده است.
- بر اساس نتایج بدست آمده افزایش طول دهانه اثرات ناشی از انفجار را چندان افزایش نداده است. این مسئله به بویژه در تعیین بار استاتیکی معادل انفجار حائز اهمیت است و لزوم بررسی کاهش شدت بار معادل را با افزایش طول دهانه نشان می دهد.

مراجع

- [1] T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, and J. Ramsay, "Blast Loading and Blast Effects on Structures –An Overview," EJSE Special Issue: Loading on Structures, 2007.

Please cite this article using:

H. Seifollahi, R. Morshed, Behavior of Reinforced Concrete Slabs against the Blast Wave. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(4) (2018) 687-696.
DOI: 10.22060/ceej.2017.10559.4907

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



