

Numerical analysis and investigation of the behavior of concrete slabs reinforced with perforated steel plates under the effect of explosive loads

Sadegh Nazeri¹, Safa Peyman^{2*}

1- graduate student of civil engineering sub-discipline of structure, school of civil, water, and energy engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

2- assistant professor, school of civil, water, and energy engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Nowadays, the significance of structural design is increasingly considered especially in the structure of important buildings against blast loads due to the growing number of military attacks on structures and advancements in armament technologies. In this order, some research has been always conducted to analyze structures confronting blast loads and achieve methods for reducing the related damages. In the present research, a novel method is also presented for the reinforcement of concrete slabs and consequently, the improvement of slabs' performance under blast loads. Instead of using steel rebars, perforated steel plates are utilized for reinforcing the concrete slabs in this method. In order to investigate this system of reinforcing the concrete slabs under blast loads, models of concrete slabs reinforced by perforated plates and by rebars with an equal volumetric percentage of steel were simulated and evaluated in the ABAQUS software under two blasting scenarios. The findings illustrated that the center of slabs has had less displacement in concrete slabs reinforced with perforated plates under blast loading caused in the air. However, some damages have been seen on the backside of those slabs as local punches in the center of the slab under the blast loading. These slabs are more prone to concrete scaling compared to the slabs reinforced by rebar. In this regard, there was an attempt to use corrugated perforated plates or utilize perforated steel ribs as stiffeners so that the interaction between concrete and the reinforcing system of the slab increases. The results also demonstrated that utilizing perforated plates with some perforated ribs can passably reduce the displacement of the slab's center and also the damage in the slab tremendously improves.

ARTICLE INFO

Receive Date: 20 February 2023

Revise Date: 06 June 2023

Accept Date: 17 June 2023

Keywords:

Concrete slabs

Blasting in air

Reinforced concrete

Perforated steel plates

Perforated steel ribs

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.385657.3039>

*Corresponding author: Safa Peyman

Email address: speyman@ihu.ac.ir

تحلیل عددی و بررسی رفتار دال‌های بتنی مسلح به ورق‌های فولادی حفره‌دار تحت اثر بارهای انفجاری

صادق ناظری^۱، صفا پیمان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین علیه السلام، تهران،

ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین علیه السلام، تهران، ایران

چکیده

امروزه به دلیل افزایش حملات نظامی به ساختمان‌ها و با توجه به پیشرفت تکنولوژی جنگ افزارها، اهمیت طراحی سازه‌ها به ویژه سازه‌های مهم در مقابل بارهای ناشی از انفجار به شکل روز افزونی مشاهده می‌شود. بدین منظور همواره پژوهش‌هایی جهت تحلیل سازه‌ها در برابر انفجار و دستیابی به روش‌هایی جهت کاهش خسارت‌های ناشی از انفجار در سازه‌ها در حال انجام است. در این پژوهش نیز روشی جدید جهت تسلیح دال‌های بتنی به منظور بهبود عملکرد دال‌ها تحت بارگذاری انفجار مطرح شده است. در این روش به جای استفاده از میلگردهای فولادی از ورق‌های فولادی حفره‌دار جهت تسلیح دال‌های بتنی استفاده شده است. به منظور بررسی عملکرد این سیستم تسلیح دال‌های بتنی تحت بارگذاری انفجار، مدل‌هایی از دال‌های بتنی مسلح به ورق‌های حفره‌دار و مسلح به میلگردها با درصد حجمی فولاد مساوی تحت دو سناریوی انفجار در نرم افزار آباکوس شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که دال‌های بتنی مسلح به ورق‌های حفره‌دار سبب کاهش جابجایی مرکز دال در بارگذاری‌های ناشی از انفجار در هوا می‌گردد؛ اما آسیب در وجه پشتی این نوع دال‌ها تحت بارگذاری انفجار به صورت پانچ موضعی در مرکز دال بوده است و نسبت به دال‌های مسلح به میلگرد بیشتر در معرض پوسته پوسته شدن پوشش پشتی دال قرار دارند. در این راستا، در این پژوهش سعی شده است با بکارگیری ورق‌های حفره‌دار موجدار و یا استفاده از شیارهای فولادی حفره‌دار^۱ به عنوان سخت کننده، اندرکنش بیشتری میان بتن و سیستم تسلیح دال ایجاد شود؛ نتایج این موارد نیز نشان داد که استفاده از ورق حفره‌دار به همراه تعدادی شیار حفره‌دار سبب کاهش قابل قبول در جابجایی مرکز دال شده و آسیب در دال نیز به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد.

کلمات کلیدی: دال‌های بتنی، انفجار در هوا، بتن مسلح، ورق‌های فولادی حفره‌دار، شیارهای فولادی حفره‌دار.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2023.385657.3039	۱۴۰۲/۱۲/۲۹	۱۴۰۲/۰۳/۲۷	۱۴۰۲/۰۳/۲۷	۱۴۰۲/۰۳/۱۶	۱۴۰۱/۱۲/۰۱
صفا پیمان speyman@ihu.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

¹ Perforated steel ribs

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر افزایش حملات نظامی به ساختمان‌ها و تاسیسات حیاتی باعث شده است که تحلیل و طراحی سازه‌ها به ویژه سازه‌های مهم در مقابل بارهای ناشی از انفجار اهمیت ویژه‌ای پیدا کنند [۱-۳]. در این راستا، در این زمینه پژوهشگران در تلاش‌اند با کسب روش‌هایی میزان خسارت‌های ناشی از انفجار در اجزای سازه‌ها را کاهش دهند. یکی از اجزای مهم سازه‌ای که نسبت به اجزای دیگر بیشتر در معرض بارهای انفجار قرار دارند، دال‌ها و دیوارهای بتن مسلح می‌باشند. در واقع، دال‌ها اولین عضو سازه‌ای هستند که در مواجهه موج انفجار به هر سازه‌ای به طور مستقیم بارگذاری می‌شوند. از این رو، بررسی رفتار آن‌ها و بدست آوردن روش‌هایی جهت بهبود عملکرد آن‌ها در برابر انفجار از اهمیت خاصی برخوردار است. در این راستا، در این پژوهش روشی نوین جهت تسلیح دال‌های بتنی به منظور بهبود عملکرد دال‌های تحت بارگذاری انفجار مطرح و مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش به جای استفاده از میلگردهای فولادی از ورق‌های فولادی حفره‌دار برای تسلیح دال‌های بتنی استفاده شده است [۴ و ۵].

به طور کلی در حوزه دال‌های بتن مسلح تحت بارگذاری انفجار، مطالعات محدودی در مورد اصلاح و جایگزینی سیستم معمول تسلیح دال‌ها صورت گرفته است و اکثریت مطالعات در رابطه با تاثیر عواملی چون مقدار ماده منفجره و فاصله قرارگیری آن نسبت به سازه، ضخامت دال و مشخصات میلگردهای استفاده شده در عملکرد دال پرداخته‌اند؛ تنها در چند مورد به صورت مختصر به استفاده از ورق‌های فولادی حفره‌دار به جای شبکه میلگردها در دال‌های بتنی اشاره شده است.

لوجینی^۲ و همکاران نیز در سال ۲۰۰۶ در پژوهشی به بررسی رفتار روسازی‌های بتنی در معرض بارهای انفجاری پرداختند. آن‌ها در واقع یک دال بتنی که بر روی زمین قرار داشت را با مقادیر مختلف مواد منفجره معلق در هوای بالای آن مورد آزمایش قرار دادند. سپس نتایج بدست آمده را با نتایج شبیه‌سازی مسئله با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس و همچنین نرم‌افزار هیدروکد اتوداین مقایسه کردند. هر دو نرم‌افزار تقریباً تغییر شکل و نوع شکست ایجاد شده در دال بتنی تحت بار انفجار را به خوبی نشان دادند. نتایج به دست آمده در این مقاله نشان می‌دهد که دقت هر دو نرم‌افزار همانند است با این وجود، هیدروکدها برای شبیه‌سازی در مورد اندرکنش کامل با محاسباتی کم‌تر، مناسب‌تر هستند. در نهایت پژوهش آن‌ها منجر به ارائه رابطه‌ای بین شعاع آسیب ایجاد شده ناشی از انفجار در دال، مقدار ماده منفجره و فاصله قرارگیری آن تا دال گردید [۶]. ونگ^۳ و همکاران نیز سال ۲۰۱۳ در پژوهشی به بررسی رفتار دال‌های بتن مسلح یک طرفه به ابعاد ۱ در ۱ متر و ضخامت ۴ سانتی‌متر تحت بارگذاری ناشی از انفجار پرداختند. در واقع آن‌ها تاثیر مقدار ماده منفجره بر نوع آسیب در دال‌ها را بررسی کردند. نتایج بدست آمده از پژوهش آن‌ها نشان داد که با افزایش مقدار ماده منفجره حالت خرابی دال بتن مسلح از خمش کلی به شکست پانچ موضعی تغییر می‌کند [۷]. کومار^۴ و همکاران در سال ۲۰۲۱ به مطالعه تجربی و عددی به منظور بررسی آسیب در دال‌های بتنی مسلح به میلگردهای فولادی تحت بارگذاری ناشی از انفجار پرداختند [۵]. دال‌هایی به ابعاد یک در یک متر با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در معرض انفجارهایی با مقدار ماده منفجره ۰/۸۵ تا ۲ کیلوگرم از نوع TNT مورد بررسی قرار گرفتند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار ماده منفجره، آسیب در دال‌ها بیشتر می‌شود. همچنین در انفجارهای بسیار قوی سطح جلوی دال به دلیل فشار زیاد اعمال شده دچار شکست شده است؛ در حالی که سطح پشتی دال به دلیل پوسته شدن بتن حاصل از فعل و انفعالات امواج کششی تولید شده از انعکاس موج انفجار دچار آسیب شده است [۸].

در زمینه استفاده از ورق‌های فولادی حفره‌دار می‌توان به پژوهش خالو و همکاران در سال ۱۹۹۴ اشاره کرد. آن‌ها در پژوهشی به بررسی رفتار دال‌های بتنی مسلح به ورق‌های فولادی سوراخ‌دار در مقایسه با دال‌های بتنی مسلح به شبکه میلگردها تحت خمش دو طرفه پرداختند. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان داد که دال‌های مسلح به ورق‌های سوراخ‌دار در مقایسه با سیستم معمولی تسلیح دال‌ها، از مقاومت ترک خوردگی، نرمی، قابلیت جذب انرژی و مقاومت نهایی بالاتری برخوردار هستند [۹]. شیائو کینگ ژو^۵ و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۸ در پژوهشی تاثیر استفاده از ورق‌های فولادی به همراه تعدادی شیار فولادی سوراخ‌شده در ظرفیت باربری دال کامپوزیتی

² Luccioni³ Wang⁴ Kumar⁵ Xiaoqing Xu

صفحه فولادی بتنی تحت خمش منفی پرداختند. مشاهده گردید که وجود قطعه‌های فولادی خطر ترک برشی در دال‌های کامپوزیتی را نسبت به حالت ساده کاهش می‌دهند؛ همچنین سهم بیشتری در ظرفیت باربری دارند [۱۰].

علاء الحبوبی^۶ و همکارانش نیز در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی مدل پیشنهادی دال‌های بتنی مسلح شده به ورق‌های فولادی حفره‌دار تحت بارگذاری انفجار را به صورت مختصر و به روش عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آن‌ها در ابتدا در دال‌های بتنی مسلح به میلگردهای فولادی تاثیر پارامترهایی چون نسبت آرماتورهای فولادی در مقطع دال، مقاومت فشاری بتن، فاصله ماده منفجره از دال بتنی و ضخامت دال را بررسی نمودند. سپس به بررسی روش تسلیح دال بتنی به وسیله ورق‌های فولادی حفره‌دار پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها در مورد استفاده از این روش جهت تسلیح دال‌های بتنی نشان داد که این روش سبب کاهش جابجایی مرکز دال شده است و همچنین با افزایش تعداد حفره‌ها در ورق‌های فولادی پیوند بیشتر بین بتن و فولاد ایجاد می‌گردد؛ این امر منجر به افزایش راندمان در انتقال تنش بین بتن و فولاد می‌شود. همچنین مشاهده گردید که شکل‌پذیری دال‌های مسلح شده به ورق‌های فولادی حفره‌دار نیز بهبود یافته است [۱۱].

همان‌طور که توضیح داده شد در پژوهش علاء الحبوبی و همکاران، دال‌های بتنی مسلح به ورق‌های فولادی حفره‌دار تحت انفجار در هوا فقط از نظر پارامتر جابجایی مرکز دال مورد مطالعه قرار گرفتند. و همچنین این روش تسلیح، فقط برای دال‌های یک‌طرفه که سیستم تسلیح دقیقاً در وسط دال قرار دارد، مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین در این پژوهش سعی شده است دال‌های بتنی مسلح شده به ورق‌های فولادی حفره‌دار تحت بارگذاری ناشی از انفجار در هوا به وسیله نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس [۱۲] نسخه ۲۰۲۱ به صورت دقیق‌تر و از همه جوانب مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور در این پژوهش تأثیر این نوع سیستم تسلیح علاوه بر دال‌های یک‌طرفه در دال‌های دوطرفه تحت بارگذاری انفجار نیز بررسی گردید. همچنین علاوه بر پارامتر جابجایی مرکز دال، موارد دیگری از جمله نوع آسیب و گسترش ترک در سطح جلو و پشتی دال، نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاهی و میزان آسیب در اجزای سیستم تسلیح دال نیز بررسی گردید. در این راستا، دال‌های بتنی به ابعاد ۱/۳ در ۱/۳ متر با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر تحت انفجار در هوا در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از تحلیل دال‌هایی که به وسیله دو ورق فولادی حفره‌دار با ابعاد ۱/۲۷ در ۱/۲۷ متر و ضخامت ۱/۵ میلی‌متر مسلح شده‌اند با نتایج حاصل از تحلیل دال‌هایی که به وسیله دو شبکه میلگردهایی به قطر ۸ میلی‌متر مسلح شدند، تحت بارگذاری ناشی از انفجار مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همچنین مدل‌هایی از دال‌های مسلح شده به ورق فولادی حفره‌دار به همراه تعدادی شیار فولادی حفره‌دار به عنوان سخت کننده همانند پژوهش شیائو کینگ ژو [۱۰] ایجاد و تحت بارگذاری ناشی از انفجار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

۲- تئوری تحقیق

۲-۱- پدیده انفجار

انفجار پدیده آنی است که در اثر آزادسازی ناگهانی مقدار زیادی انرژی در مدت زمان بسیار کوتاه بوجود می‌آید. این انرژی به وسیله موجی با حرارت و فشار بسیار زیاد به نام موج انفجار انتقال می‌یابد. این موج پس از وقوع انفجار بیشترین فشار را دارد و سپس فوراً کاهش می‌یابد تا با فشار اتمسفر برابر شود؛ در ادامه همچنان این روند کاهشی ادامه پیدا می‌کند و منجر به ایجاد فاز منفی و موجب مکش می‌شود [۱۰ و ۲].

مقدار ماده منفجره و فاصله آن تا سازه مورد نظر دو شاخص مهم در میزان شدت انفجار می‌باشند. بدین منظور برای لحاظ کردن تاثیر هم‌زمان این دو شاخص از رابطه (۱) به نام فاصله مقیاس شده استفاده می‌گردد. در این رابطه، R فاصله مرکز انفجار تا سازه و در این پژوهش فاصله مرکز انفجار تا سطح دال بتنی بر حسب متر و W جرم ماده منفجره در واحد کیلوگرم می‌باشد [۱۳ و ۵].

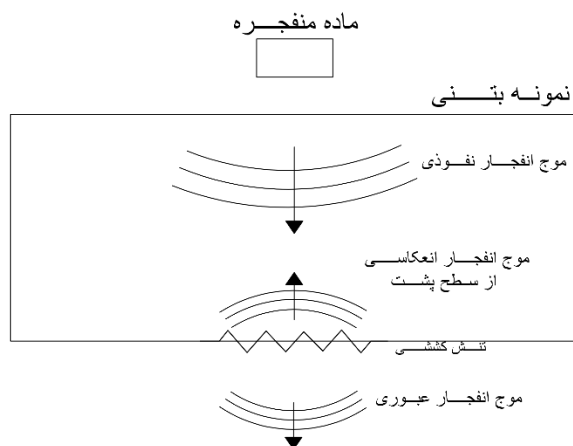
$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

⁶ Alaa Al-Habbobi

همان طور که بیان گردید در مطالعه حاضر به منظور لحاظ کردن بارگذاری انفجار و آسیب ایجاد شده بر دال‌های بتن مسلح از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. در این نرم افزار روش‌هایی جهت شبیه‌سازی انفجار در هوا وجود دارد که در این مطالعه از روش نیمه تجربی کانوپ^۷ استفاده شده است. کومار و همکاران در پژوهش خود به نقل از مطالعه کارلوس [۱۴] باتوجه به مطالعه تجربی کینگری و بالماش، بازه مورد قبول برای فاصله مقیاس شده در شبیه‌سازی انفجار به روش کانوپ را ۰/۰۵ تا ۴۰ در واحد $m/kg^{1/3}$ (معادل ۰/۱ تا ۱۰۰ در واحد $ft/lb^{1/3}$) در نظر گرفتند [۸]. در تحقیق حاضر فاصله مقیاس شده در این بازه قرار دارد و در نتیجه استفاده از این روش برای شبیه‌سازی اثرات انفجار مناسب خواهد بود.

۲-۲- پدیده قله‌کن شدگی^۸

یکی از پدیده‌هایی که در اثر وقوع انفجار در دال‌ها و یا دیوارهای بتن مسلح رخ می‌دهد، پدیده قله‌کن شدگی بتن می‌باشد. در اثر انفجار یک ماده منفجره در نزدیکی دیوار، مقداری از موج تنش‌ی تولید شده از برخورد به دیوار، انعکاس می‌یابد و مقداری از آن در دیوار بتنی نفوذ می‌کند. در ادامه، موج نفوذ کرده در هنگام خروج از سطح پشتی دیوار دچار انعکاس‌های دیگری می‌شود. این انعکاس و انتقال-های موج از یک وجه به وجه دیگر در سطح پشتی دیوارها و دال‌های بتنی باعث به وجود آمدن پدیده قله‌کن شدگی می‌گردد (شکل ۱) [۱۵]. در واقع امواج انعکاسی تولید شده در سطح پشتی دال، تنش‌های کششی در بتن ایجاد می‌کند. اگر دامنه نیروهای کششی ایجاد شده از مقاومت کششی بتن بزرگ‌تر باشد، بتن گسیخته می‌شود و قله‌کن شدگی نزدیک سطح آزاد آن ایجاد می‌گردد. این پدیده سبب آسیب به افراد و تجهیزات داخل سازه می‌گردد؛ بدین منظور لازم است در تمامی پژوهش‌های مربوط به انفجار در اجزای بتنی مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش با توجه به آن که شبیه‌سازی انفجار به روش کانوپ صورت گرفته است و این روش نمی‌تواند انعکاس موج انفجار را به صورت مستقیم نشان دهد؛ بنابراین سعی شده است در مدل‌ها فقط آسیب‌های سطح پشتی دال‌ها که در اثر تولید تنش کششی در قسمت پشتی دال در هنگام بارگذاری انفجار ایجاد می‌شوند، مورد بررسی قرار گیرند [۸ و ۱۵].



شکل ۱: پدیده قله‌کن شدگی در بتن تحت بارگذاری انفجار [۸].

۲-۳- مدل رفتاری مصالح بتنی

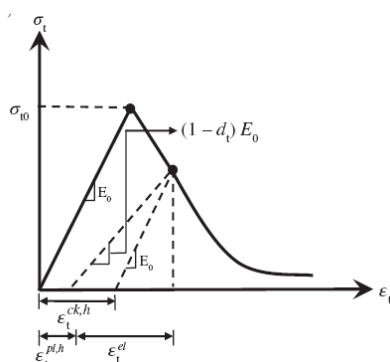
برای شبیه‌سازی رفتار پلاستیسیته بتن در دال‌های بتن مسلح تحت بارگذاری‌های دینامیکی از جمله ضربه و انفجار معیارهایی به منظور نشان دادن آسیب بتن وجود دارد. هر کدام از این معیارها قابلیت‌ها و ویژگی‌های مختص به خود را دارند. در این پژوهش از کاربردی‌ترین معیار رفتاری مصالح بتنی در نرم‌افزار آباکوس به نام آسیب پلاستیسیته بتن^۹ (CDP) استفاده شده است.

⁷ Conventional Weapons Effects Program

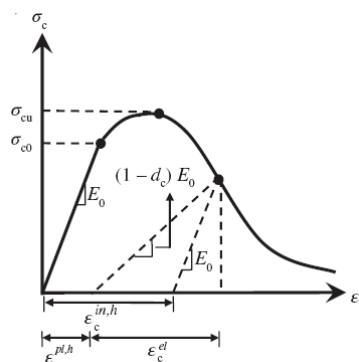
⁸ Spalling

⁹ Concrete Damaged Plasticity

مدل آسیب پلاستیسیته بتن با بیان رفتار مجزای بتن در فشار و کشش در بارگذاری‌های مختلف کاربرد داشته و رفتار بتن را به صورت واقعی‌تر نشان می‌دهد. همچنین آسیب کلی مصالح در این مدل براساس دو مکانیزم خرابی کششی ناشی از ترک خوردگی^{۱۰} و خرابی فشاری ناشی از خردشدگی^{۱۱} نشان داده می‌شود. در این مدل سطح شکست با استفاده از متغیرهای سخت شدگی تحت بارگذاری-های فشاری و کششی ($\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ و $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$) کنترل می‌شود. این دو متغیر در واقع کرنش‌های پلاستیک معادل هستند که مطابق شکل ۲ و ۳ در نمودارهای تنش-کرنش تک محوره بتن در کشش و فشار نشان داده شده‌اند؛ در اثر کشش ترک‌های ریز در بتن همراه می‌باشد. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی‌ها به صورت خطی تغییر می‌کند. این تنش با شروع و گسترش ترک‌های ریز در بتن همراه می‌باشد. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی‌ها به صورت ترک‌های قابل مشاهده در می‌آیند، این قسمت به صورت منحنی نرم شوندگی نمایش داده می‌شود. از سوی دیگر، تحت فشار تک محوره پاسخ مصالح تا رسیدن به نقطه جاری شدگی σ_{co} به صورت الاستیک خواهد بود و رفتار در ناحیه پلاستیک عموماً به صورت منحنی سخت شوندگی توصیف می‌شود. در نهایت با رسیدن به نقطه تنش نهایی σ_{cu} منحنی تنش-کرنش فشاری به صورت منحنی نرم شونده در می‌آید [۱۶ و ۱۷].



شکل ۳: پاسخ بتن تحت بارگذاری تک محوره در کشش [۱۳].



شکل ۲: پاسخ بتن تحت بارگذاری تک محوره در فشار [۱۳].

منحنی‌های تنش-کرنش تک محوره فشاری و کششی بتن دارای قابلیت تبدیل به منحنی‌های تنش-کرنش پلاستیک هستند که این کار به صورت خودکار توسط نرم‌افزار آباکوس با استفاده از تنش‌ها و کرنش‌های غیر الاستیک که توسط کاربر به نرم‌افزار داده شده است، انجام می‌گردد. این تبدیل‌ها با استفاده از روابط ۲ و ۳ انجام می‌شود [۱۷].

$$\sigma_t = \sigma_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \dot{\tilde{\varepsilon}}_t^{pl}, \theta, f_i) \quad (2)$$

$$\sigma_c = \sigma_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \dot{\tilde{\varepsilon}}_c^{pl}, \theta, f_i) \quad (3)$$

در این روابط $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ و $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ مربوط به کرنش‌های پلاستیک معادل در کشش و فشار، $\dot{\tilde{\varepsilon}}_t^{pl}$ و $\dot{\tilde{\varepsilon}}_c^{pl}$ مربوط به نرخ کرنش‌های پلاستیک معادل در کشش و فشار می‌باشند. θ نیز نشان دهنده میزان دما و f_i نشان دهنده دیگر متغیرهای میدانی است. همان طور که در شکل‌های ۲ و ۳ نیز دیده می‌شود، در اثر باربرداری از نمونه بتنی از هر نقطه‌ای روی شاخه نرم‌شوندگی منحنی تنش-کرنش، پاسخ ضعیف می‌شود یا به بیان دیگر شیب منحنی باربرداری کمتر از شیب منحنی الاستیک می‌باشد و این نشان‌دهنده آسیب‌دیدگی نمونه بتنی است. این کاهش در سختی اولیه به وسیله دو متغیر d_t و d_c نشان داده می‌شود که تابعی از پارامترهای کرنش پلاستیک، دما و متغیرهای میدانی می‌باشند (روابط ۴ و ۵).

$$d_t = d_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \theta, f_i) ; 0 \leq d_t \leq 1, \quad (4)$$

$$d_c = d_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \theta, f_i) ; 0 \leq d_c \leq 1, \quad (5)$$

¹⁰ Cracking

¹¹ Crushing

همان‌طور که گفته شد در منحنی‌های تنش-کرنش تک محوره، آسیب بتن توسط دو متغیر (d_c و d_t) مشخص می‌شود. در نتیجه روابط ۶ و ۷ را خواهیم داشت. در این روابط E_0 مدول الاستیسیته اولیه بتن می‌باشد [۱۷].

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (۶)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (۷)$$

توصیف بخش پلاستیسیته این مدل رفتاری توسط چهار پارامتر زاویه اتساع، خروج از مرکزیت، نسبت تنش فشاری دو محوره به تک محوره و پارامتر KC صورت می‌گیرد. زاویه اتساع کرنش پلاستیک (ψ) اثر برش در فاز بعد از الاستیک را تعریف می‌نماید؛ به لحاظ فیزیکی می‌تواند آن را به عنوان زاویه اصطکاک داخلی بتن دانست. پارامتر خروج از مرکزیت در واقع نسبت مقاومت کششی به فشاری بتن را مشخص می‌نماید. نسبت تنش فشاری دو محوره به تک محوره (f_{b0}/f_{c0}) نیز نشان دهنده مشخصات تابع گسیختگی به مقدار معمولاً ۱/۱۶ برای بتن می‌باشد. پارامتر KC نیز نسبت نامتغیر دوم تنش در فضای نصف‌النهار کششی به فشاری را نشان می‌دهد؛ مقدار این پارامتر بایستی بین ۰/۵ و ۱ قرار گیرد که به صورت پیش فرض از مقدار ۰/۶۶۷ در آباکوس استفاده می‌شود. برای تعیین مقدار دقیق این پارامتر می‌توان از آزمایش‌های فشاری سه‌محوره استفاده نمود [۱۳-۱۶].

رفتار دینامیکی بتن به نرخ کرنش بستگی دارد؛ همان‌طور که مطرح گردید این مدل رفتاری قابلیت اضافه کردن نرخ کرنش به صورت دستی در شبیه‌سازی را دارد؛ اما کمتر مورد استفاده محققین قرار می‌گیرد. بنابراین در این پژوهش سعی شده است تأثیر نرخ کرنش در مدل‌ها تعریف گردد. فرمول‌بندی CEB-FIP جامع‌ترین مدلی است که تأثیر نرخ کرنش بر استحکام فشاری و کششی را به طور جداگانه ارائه کرده است. در این مدل ضریب افزایش دینامیکی برای استحکام فشاری توسط رابطه ۸ بیان می‌شود. در این رابطه f_c استحکام فشاری دینامیکی در نرخ کرنش $\dot{\varepsilon}$ ، f_{cs} استحکام فشاری استاتیکی در نرخ کرنش استاتیکی $\dot{\varepsilon}_s$ است. $\dot{\varepsilon}$ در محدوده $300 s^{-1} - 30 \times 10^{-6} s^{-1}$ و $\dot{\varepsilon}_s$ نرخ کرنش استاتیکی به مقدار $30 \times 10^{-6} s^{-1}$ می‌باشد. مقدار f_{co} نیز ۱۰ مگاپاسکال است [۱۸ و ۱۹].

$$\frac{f_c}{f_{cs}} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{1.026\alpha_s} & \text{for } \dot{\varepsilon} \leq 30 s^{-1} \\ \gamma_s \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{1/3} & \text{for } \dot{\varepsilon} > 30 s^{-1} \end{cases} ; \alpha_s = \frac{1}{5 + 9 \frac{f_{cs}}{f_{co}}} , \log \gamma_s = 6.156\alpha_s - 2 \quad (۸)$$

همچنین ضریب افزایش دینامیکی برای استحکام کششی توسط رابطه ۹ بیان می‌شود. در این رابطه f_t استحکام کششی دینامیکی در نرخ کرنش $\dot{\varepsilon}$ ، f_{ts} استحکام کششی استاتیکی در نرخ کرنش استاتیکی $\dot{\varepsilon}_s$ است. $\dot{\varepsilon}$ در محدوده $300 s^{-1} - 3 \times 10^{-6} s^{-1}$ و $\dot{\varepsilon}_s$ نرخ کرنش استاتیکی به مقدار $3 \times 10^{-6} s^{-1}$ می‌باشد. مقدار f_{co} نیز ۱۰ مگاپاسکال است [۱۸ و ۱۹].

$$\frac{f_t}{f_{ts}} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{1.026\delta} & \text{for } \dot{\varepsilon} \leq 30 s^{-1} \\ \beta \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^{1/3} & \text{for } \dot{\varepsilon} > 30 s^{-1} \end{cases} ; \delta = \frac{1}{10 + 6 \frac{f_{cs}}{f_{co}}} , \log \beta = 7.11\delta - 2.33 \quad (۹)$$

۲-۴- مدل رفتاری مصالح فولادی

برای مدلسازی رفتار پلاستیک فولاد در آباکوس مدل‌های رفتاری زیادی از جمله مدل رفتاری الاستیک-پلاستیک یا مدل جانسون-کوک^{۱۲} وجود دارد. در این پژوهش از معیار رفتاری الاستیک-پلاستیک جهت توصیف فولاد استفاده شده است. این مدل رفتاری اثر نرخ کرنش را به صورت مستقیم در نظر نمی‌گیرد. بنابراین در این پژوهش با توجه به روابط ۱۰ و ۱۱ به ترتیب ضریب افزایش دینامیکی برای تنش تسلیم و گسیختگی فولاد محاسبه و به صورت دستی در مدل رفتاری الاستیک-پلاستیک لحاظ گردید [۱۹ و ۱۸].

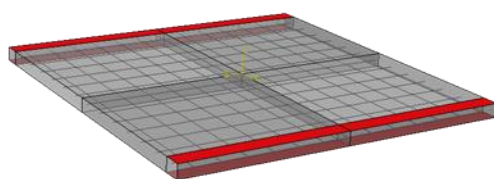
$$\frac{f_{sy}(\dot{\epsilon}_s)}{f_{sy}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_s}{10^{-4}}\right)^{\alpha_{sy}} \geq 1.0 \quad ; \quad \alpha_{sy} = 0.074 - 0.04 \frac{f_{sy}}{414 \text{ MPa}} \quad (10)$$

$$\frac{f_{su}(\dot{\epsilon}_s)}{f_{su}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_s}{10^{-4}}\right)^{\alpha_{su}} \geq 1.0 \quad ; \quad \alpha_{su} = 0.019 - 0.009 \frac{f_{sy}}{414 \text{ MPa}} \quad (11)$$

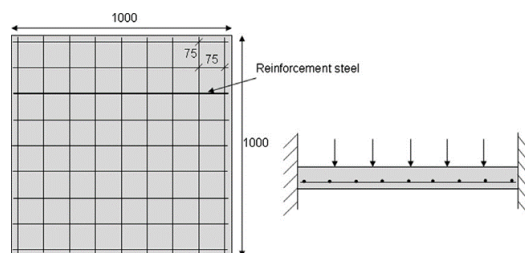
در روابط بالا f_{sy} و f_{su} به ترتیب مقاومت تسلیم و گسیختگی فولاد در حالت استاتیکی است. $f_{sy}(\dot{\epsilon}_s)$ و $f_{su}(\dot{\epsilon}_s)$ نیز به ترتیب مقاومت تسلیم و گسیختگی فولاد در حالت دینامیکی در نرخ کرنش $\dot{\epsilon}_s$ است.

۳- صحت سنجی

به منظور تحلیل و بررسی مدلسازی دال بتن مسلح تحت بارگذاری ناشی از انفجار در هوا در نرم‌افزار آباکوس باید از مدلسازی انجام شده و نتایج حاصل شده از آن اطمینان داشت. در این راستا، دال‌های یک طرفه استفاده شده در تحقیق ونگ [۷] که شامل تحلیل همزمان تجربی و عددی تحت بارهای مختلف انفجار در هوا با هدف بررسی آسیب می‌باشند، در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن با نتایج تحقیق ونگ مقایسه شده است. ابعاد دال استفاده شده در تحقیق ونگ ۱ در ۱ متر با ضخامت ۴ سانتی‌متر می‌باشد. در این دال‌ها از یک شبکه میلگرد در وسط دال که شامل میلگردهای فولادی به قطر ۶ میلی‌متر و فاصله ۷۵ میلی‌متر نسبت به یکدیگر همانند شکل ۴ استفاده شده است. تکیه‌گاه‌های استفاده شده در این آزمایش یک‌طرفه و به صورت گیردار در بالا و پایین دو ضلع مخالف دال در نظر گرفته شده‌اند، که از حرکت رو به بالای دال در طول آزمایش جلوگیری شود؛ بدین منظور در مدل ایجاد شده جهت صحت سنجی این مورد همانند شکل ۵ در شرایط تکیه‌گاهی لحاظ شده است. انفجار نیز در فاصله ۴۰ سانتی‌متر بالاتر از نقطه مرکزی سطح دال بتنی و با مواد منفجره از نوع TNT به مقدار ۰/۲، ۰/۳۱ و ۰/۴۶ کیلوگرم در نظر گرفته شده است.



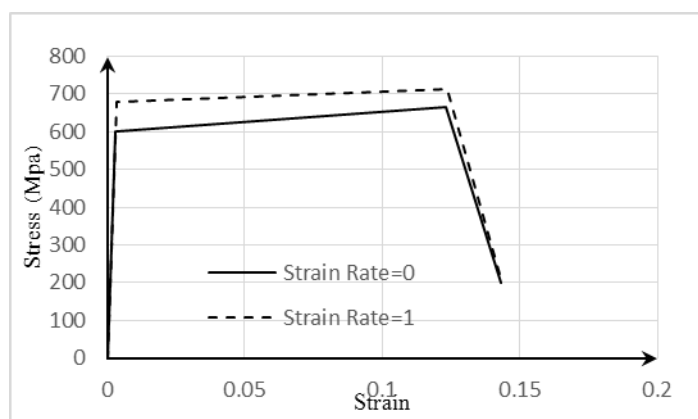
شکل ۵: مدل ایجاد شده در نرم‌افزار آباکوس.



شکل ۴: مشخصات دال تحقیق ونگ [۷].

فولاد استفاده شده در میلگردهای پژوهش ونگ دارای چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ضریب پواسون ۰/۲، مدول یانگ ۲۰۰ گیگاپاسکال و مقاومت تسلیم ۶۰۰ مگاپاسکال است. این فولاد توسط معیار رفتاری الاستیک-پلاستیک در آباکوس توصیف شده است. همچنین اثر نرخ کرنش به مقدار $1s^{-1}$ نیز در توصیف آن براساس فرمول بندی قسمت ۲-۴ در نظر گرفته شده است. بنابراین منحنی تنش کرنش فولاد مدنظر در شکل ۶ نشان داده شده است.

¹² Johnson-Cook



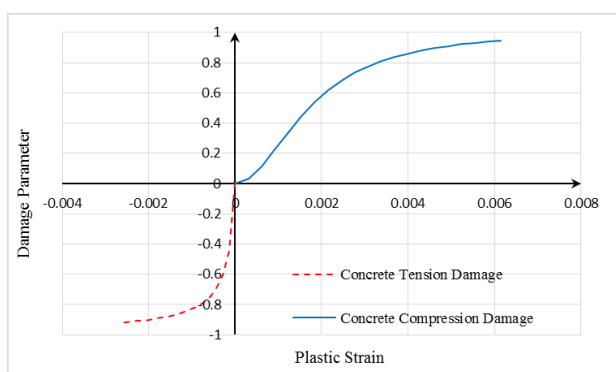
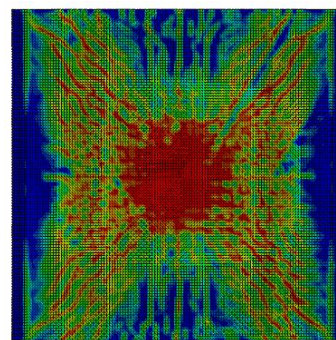
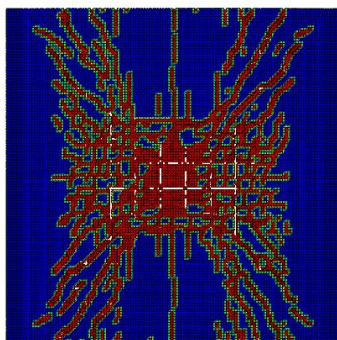
شکل ۶: منحنی تنش- کرنش فولاد استفاده شده در میلگردهای تحقیق ونگ [۲۰].

بتن استفاده شده در تحقیق ونگ [۷] دارای مدول یانگ ۲۸/۳ گیگاپاسکال، مقاومت فشاری و کششی به ترتیب ۳۹/۵ و ۴/۲ مگاپاسکال است. همان طور که بیان گردید برای تعریف خواص پلاستیک مصالح بتنی از معیار رفتاری CDP استفاده شده است. مشخصات مکانیکی بتن مورد نظر در این معیار در جدول ۲ آورده شده است و منحنی تنش-کرنش تک محوره فشار و کشش آن نیز با در نظر گرفتن نرخ کرنش به مقدار توصیه شده برای این انفجار ($1s^{-1}$) در شکل ۷ نشان داده شده است؛ همچنین منحنی خسارت فشار و کشش بتن در شکل ۸ به منظور نمایش تخریب بتن به وسیله حذف المانهای آسیب دیده بر مبنای کرنش شکست بتن در شبیه‌سازی نشان داده شده است [۲۱ و ۱۳].

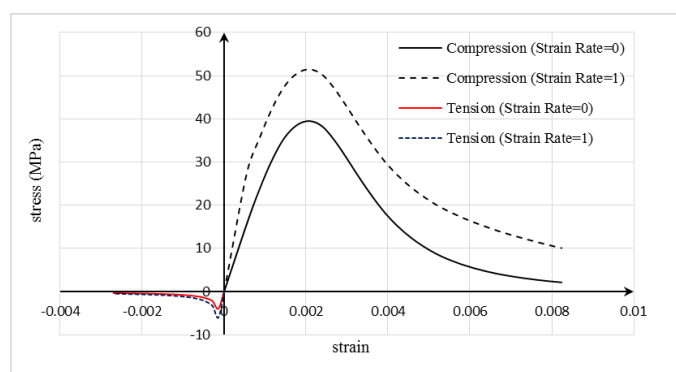
به دلیل آسیب ناشی از افزایش کرنش‌های پلاستیک در مواد شکننده (مانند بتن و مواد مشابه بتن) پارامتر آسیب در فشار (dc) در حداکثر تنش فشاری صفر بوده و پس از آن شروع به کاهش می‌کند و تا رسیدن به مقدار آسیب کامل در کرنش‌های بزرگ، به کاهش ادامه می‌دهد [۲۱ و ۱۳].

جدول ۱: مشخصات مکانیکی بتن در مدل رفتاری CDP [۲۰]

پارامتر ویسکوزیته	K_C	f_{b0}/f_{c0}	برون محوری	زاویه اتساع (درجه)	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	ضریب پواسون	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
۰/۰۱	۰/۶۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۵	۲۸/۳	۰/۲	۲۵۵۰



شکل ۸: منحنی خسارت فشار و کشش بتن [۲۱ و ۲۰].



شکل ۷: منحنی تنش-کرنش تک محوره فشار و کشش بتن [۲۰].

جابجایی وسط دال و شعاع آسیب ایجاد شده در پشت دال براساس شبیه سازی عددی صورت گرفته برای مقادیر مختلف ماده منفجره در جدول ۲ آورده شده است؛ این نتایج با داده های آزمایشگاهی و عددی پژوهش ونگ مقایسه شده است. همچنین کانتورهای خرابی در سطح جلو و پشتی دال برای هر سه سناریوی انفجار مقایسه شده است. برای نمونه در شکل ۹ این کانتورها برای سطح پشتی دال در سناریوی سوم نشان داده شده است. با توجه به همپوشانی نتایج حاصل شده از مدل آباکوس با نتایج آزمایشگاهی و عددی ونگ، می توان به مدلسازی صورت گرفته اطمینان کرد.

جدول ۲: مقایسه نتایج شبیه سازی آباکوس با تحقیق ونگ

سناریوی انفجار (کیلوگرم TNT)	پارامترهای مورد بررسی					
	جابجایی مرکز دال (میلی متر)			شعاع حفره ایجاد شده (میلی متر)		
	آزمایشگاهی ونگ	عددی ونگ	مدل صحت سنجی آباکوس	آزمایشگاهی ونگ	عددی ونگ	مدل صحت سنجی آباکوس
۰/۲	۱۰	۸	۹/۳۳	۰	۰	۰
۰/۳۱	۱۵	۱۳	۱۵/۵۱	۹۰	۱۰۰	۱۱۵
۰/۴۶	۳۰	۳۲	۳۲/۵۵	۱۲۰	۱۴۰	۱۴۳/۷۵

(الف)

(ب)

(ج)

شکل ۹: مقایسه آسیب در سطح پشتی دال در سناریوی سوم انفجار: (الف) آسیب بدون حذف المان (ب) آسیب با حذف المان (ج) آسیب در آزمایش ونگ [۷].

۴- مدلسازی عددی

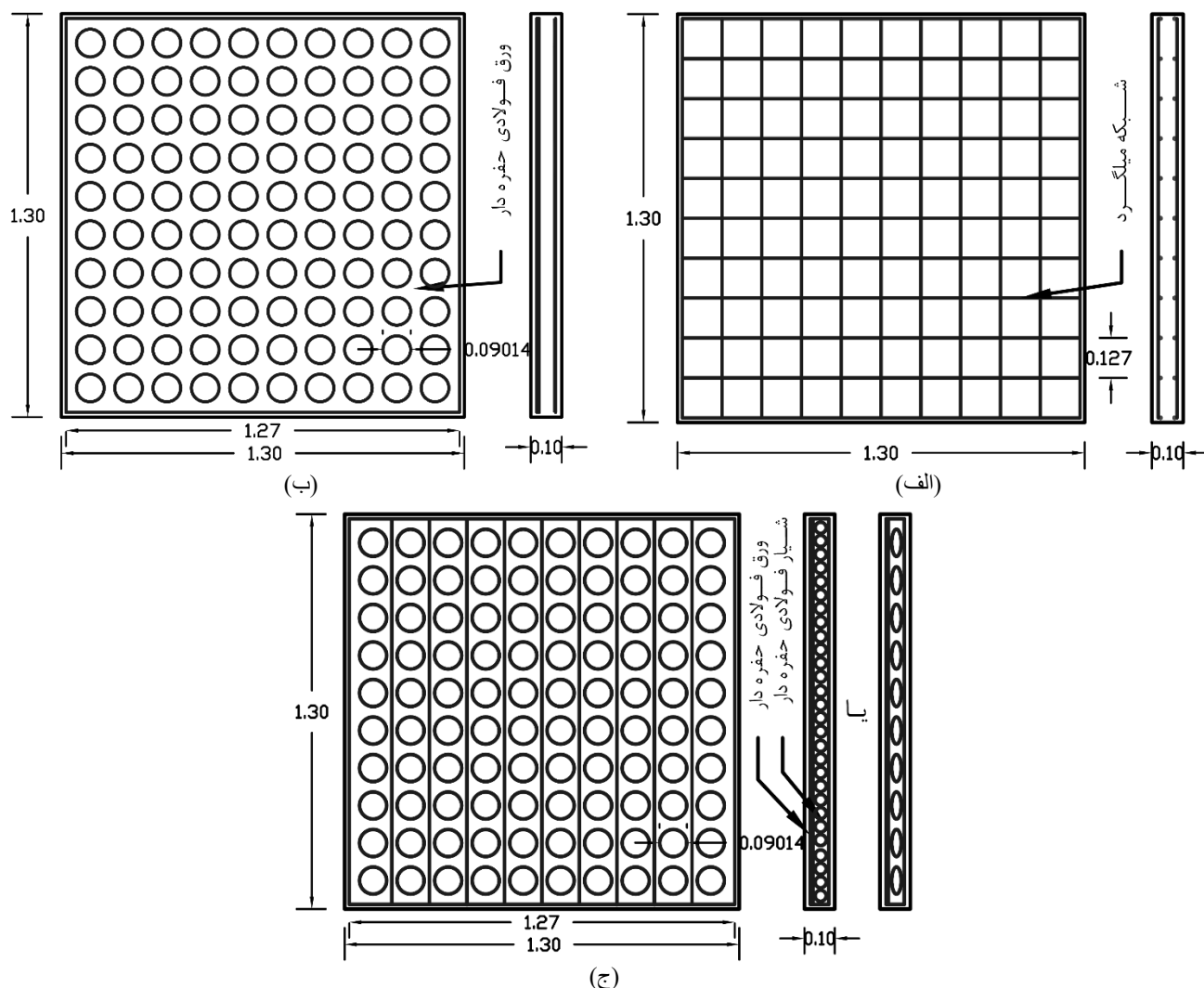
در این مطالعه جهت تحلیل دال‌های بتنی مسلح شده به ورق‌های فولادی حفره‌دار مدل‌هایی از دال‌های بتن مسلح به ورق فولادی حفره‌دار و یا شبکه میلگردها ایجاد گردید. در این مدل‌سازی از المان C3D8R (المان ۸ گره‌ای مکعبی، سه بعدی، دارای فرمول-بندی کاهش‌یافته) برای بتن، المان S4R (المان پوسته ۴ گره‌ای، دارای فرمول‌بندی کاهش‌یافته) برای ورق‌های فولادی حفره‌دار و المان B31 (المان تیر مرتبه اول سه بعدی) برای میلگردهای فولادی استفاده شده است. تحلیل استفاده شده در این مدل‌سازی نیز از نوع تحلیل دینامیکی غیرخطی است. در ادامه مدلسازی هندسی و نوع بارگذاری، مشخصات مصالح و تجزیه و تحلیل نتایج ارائه شده است.

۴-۱- هندسه مدل و نوع بارگذاری

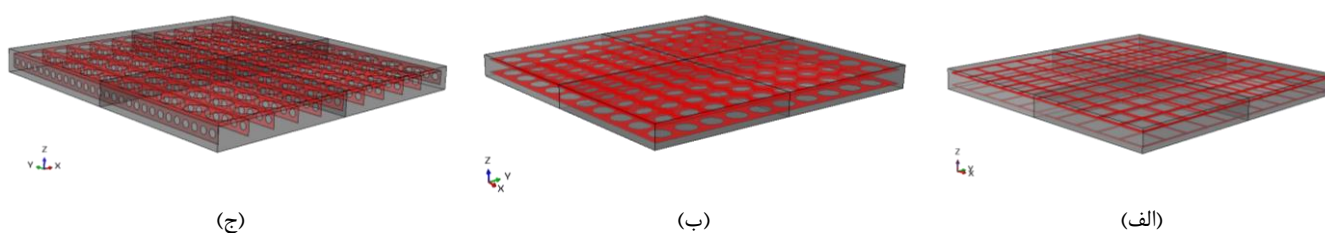
در این مطالعه از دال‌های بتنی به ابعاد $1/3$ در $1/3$ متر و ضخامت 10 سانتی‌متر در دو نوع تکیه‌گاه دو طرفه و یک طرفه استفاده شده است. برای مقایسه عملکرد دال‌های مسلح شده به روش پیشنهاد شده با عملکرد دال‌های مسلح شده به روش معمول (استفاده از شبکه‌های میلگردی) تحت بارگذاری انفجار در هوا از مدل‌هایی در دو گروه مجزا استفاده شده است. در گروه اول دال‌های بتنی دو طرفه مسلح شده به دو ورق فولادی حفره‌دار که در نوع ورق فولادی و آرایش حفره‌ها متفاوت هستند، مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. در گروه دوم نیز دال‌های بتنی یک طرفه مسلح شده به دو ورق حفره‌دار و یا به یک ورق فولادی حفره‌دار به همراه تعدادی شیار فولادی حفره‌دار مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. به طور کلی دال‌های شبیه‌سازی شده در دو سناریوی انفجار با مقادیر 1 و $0/1$ کیلوگرم ماده منفجره از نوع TNT در فاصله 30 سانتی‌متری از مرکز سطح دال با فاصله مقیاس شده $0/6463$ و $0/3$ در واحد متریک مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

دال‌های مسلح شده به وسیله میلگرد از دو شبکه میلگردهایی به قطر 8 میلی‌متر و با فاصله $12/7$ سانتی‌متر نسبت به یکدیگر و دارای پوشش بتنی 2 سانتی‌متر استفاده شده است. دال‌های گروه اول به وسیله دو ورق فولادی به ابعاد $1/27$ در $1/27$ متر و به ضخامت $1/5$ میلی‌متر مسلح شده‌اند. قطر و تعداد حفره‌ها در ورق‌ها به گونه‌ای تعبیه شده است که میزان فولاد مصرفی با دال‌های مسلح شده به میلگرد برابر شود؛ به این معنا که فولاد مصرفی در دو نوع دال هم از لحاظ درصد حجمی و هم از نظر میزان سطح فولاد در ضعیف‌ترین مقطع دال یکسان است. در گروه دوم نیز دال‌هایی به وسیله یک ورق فولادی حفره‌دار به همراه تعدادی شیار فولادی حفره‌دار عمودی در زیر ورق مسلح شده‌اند. جزئیات و نمای کلی این دال‌ها به ترتیب در شکل‌های 10 و 11 نشان داده شده است.

در این پژوهش اندرکنش میان سیستم تسلیح (ورق‌های فولادی حفره‌دار یا میلگردهای فولادی) و بتن به صورت قید کاملاً مدفون و یکپارچه (Embedded Region) فرض شده است.



شکل ۱۰: جزئیات دال‌های مسلح شده به الف) شبکه میلگردی ب) ورق‌های حفره دار ج) ورق حفره دار به همراه شیارهای حفره دار (واحد متر).

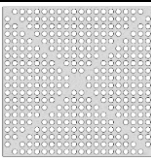
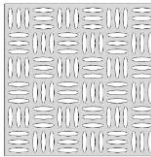

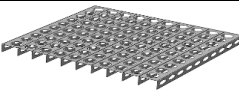
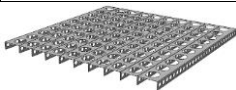


شکل ۱۱: نمای کلی دال‌های مسلح شده به الف) شبکه میلگردی ب) ورق‌های حفره دار ج) ورق حفره دار به همراه شیارهای حفره دار.

در جدول ۳ مشخصات کامل مدل‌های ایجاد شده هر دو گروه آورده شده است. نکته لازم به ذکر این است که تکیه‌گاه دال‌های گروه اول به صورت دو طرفه و گروه دوم به صورت یک طرفه در نظر گرفته شده است. مدل‌های S2-MN1، S2-MN2 و S2-MN3 به ترتیب به وسیله دو ورق حفره دار به ضخامت ۱/۲۵ میلی‌متر با آرایش حفره‌ها به گونه‌ای که روی قطر اصلی حفره‌ای وجود ندارد، دو ورق حفره دار به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر با حفره‌های بیضوی شکل و دو ورق حفره دار موجودار به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر با چین‌های مستطیلی شکل مسلح شده‌اند. مدل S2-MN4-1s و S2-MN5-1s به وسیله یک ورق فولادی در قسمت فوقانی دال بتنی با پوشش بتنی ۲ سانتی‌متر و ۱۱ شیار فولادی در قسمت زیرین ورق حفره دار به عنوان سخت کننده مسلح شده است. ورق فولادی استفاده شده دارای ابعاد ۱/۲۷ در ۱/۲۷ متر و ضخامت ۱/۵ میلی‌متر با ۱۰۰ حفره به قطر ۹/۰۱۴ سانتی‌متر می‌باشد. شیارهای فولادی استفاده شده نیز دارای ابعاد ۱/۲۷ در ۰/۰۶ متر با

ضخامت ۱/۵ میلی‌متر دارای ۱۰ حفره می‌باشند. تفاوت این دو مدل در نوع حفره‌های شیار فولادی است؛ شیارهای مدل S2-MN4-1s دارای ۱۱ حفره بیضوی به قطرهای ۹/۰۱۴ و ۳ سانتی‌متر است و شیارهای مدل S2-MN5-1s دارای ۲۸ حفره دایروی به قطر ۳ سانتی‌متر می‌باشد.

جدول ۳: مشخصات مدل‌های ایجاد شده

شماره	نام مدل	سناریوی انفجار (Z / متریک)	روش تسلیح بتن		
			نوع	تعداد حفره	قطر حفره (میلی‌متر)
شماره اول (دال دو طرفه)	S1-MP25	۰/۱ کیلوگرم TNT در فاصله ۰/۳ متر (۰/۶۴۶۳)	دو ورق فولادی ضخامت ۱/۵ میلی‌متر	۲۵	۱۸/۰۲۸
	S1-MP100			۱۰۰	۹/۰۱۴
	S1-MP225			۲۲۵	۶/۰۰۹
	S1-MP400			۴۰۰	۴/۵۰۷
	S1-MR			۲۲ میلگرد فولادی به قطر ۸ میلی‌متر	
	S2-MP25	۱ کیلوگرم TNT در فاصله ۰/۳ متر (۰/۳)	دو ورق فولادی ضخامت ۱/۵ میلی‌متر	۲۵	۱۸/۰۲۸
	S2-MP100			۱۰۰	۹/۰۱۴
	S2-MP225			۲۲۵	۶/۰۰۹
	S2-MP400			۴۰۰	۴/۵۰۷
	S2-MR			۲۲ میلگرد فولادی به قطر ۸ میلی‌متر	
S2-MN1					
S2-MN2					
S2-MN3					
شماره دوم (دال یک طرفه)	S2-MN100-1s	۱ کیلوگرم TNT در فاصله ۰/۳ متر (۰/۳)	دو ورق فولادی ضخامت ۱/۵ میلی‌متر	۱۰۰	۹/۰۱۴
	S2-MN400-1s			۴۰۰	۴/۵۰۷
	S2-MR-1s		۲۲ میلگرد فولادی به قطر ۸ میلی‌متر		
	S2-MN4-1s				
	S2-MN5-1s				

۴-۲- مشخصات مصالح

در این پژوهش از مشخصات مصالح بتنی تحقیق ونگ [۷] که در قسمت صحت سنجی ارائه گردید، استفاده شده است. همان‌طور که بیان شد این بتن دارای مدول الاستیسیته ۲۸/۳ گیگاپاسکال، مقاومت فشاری و کششی به ترتیب ۳۹/۵ و ۴/۲ مگاپاسکال و با در نظر گرفتن نرخ کرنش $1s^{-1}$ می‌باشد. مشخصات فولاد مورد استفاده برای میلگردها و ورق‌های حفره‌دار نیز به ترتیب در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵: مشخصات فولاد استفاده شده برای ورق‌های حفره‌دار

[۲۴]

$E = 200000 \text{ MPa}$; $\nu = 0.3$		ϵ_{true}^p
$\sigma_{true} \text{ (MPa)}$		
$\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\epsilon} = 0 \text{ s}^{-1}$	
۴۱۲	۲۶۴	۰/۰
۴۱۴	۲۶۵	۰/۰۰۲۷
۴۱۹	۲۶۸	۰/۰۰۸۶
۴۴۲	۲۸۳	۰/۰۱۳۵
۵۴۴	۳۴۸	۰/۰۳۷۶
۶۵۴	۴۱۹	۰/۰۹۳۰
۶۹۵	۴۴۵	۰/۱۳۷۵
۷۴۴	۴۷۶	۰/۱۷۹۸
۷۵۰	۴۸۰	۰/۲۲۰۵

جدول ۴: مشخصات فولاد میلگردها [۲۲ و ۲۳]

$E = 200000 \text{ MPa}$; $\nu = 0.3$		ϵ_{true}^p
$\sigma_{true} \text{ (MPa)}$		
$\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\epsilon} = 0 \text{ s}^{-1}$	
۵۶۶	۴۱۴	۰/۰
۵۸۹	۵۳۸	۰/۱۲

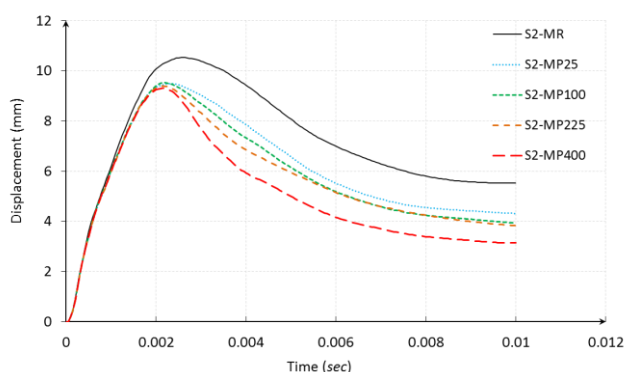
۳-۴- تجزیه و تحلیل نتایج

۱-۳-۴- گروه اول

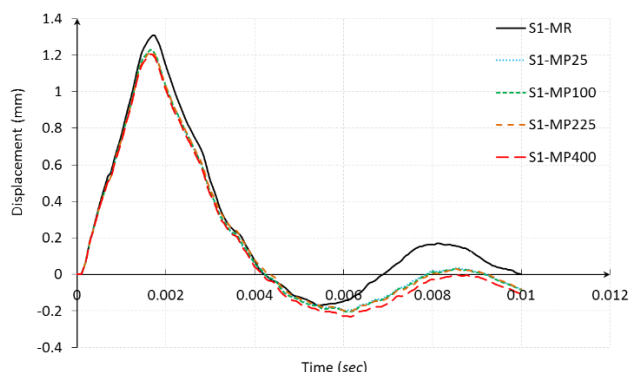
در این قسمت به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از مدل‌های گروه اول به منظور بررسی تاثیر ورق‌های فولادی حفره‌دار در عملکرد دال‌های بتنی تحت بارگذاری انفجار پرداخته شده است. بدین منظور در جدول ۶ پارامترهایی از جمله بیشترین جابجایی مرکز دال و بیشینه نیروی عکس العمل تکیه‌گاهی دال‌ها مقایسه شده است. همچنین در شکل ۱۲ نمودار جابجایی مرکز دال نسبت به زمان برای تمامی مدل‌ها در دو سناریوی انفجار نشان داده شده است. نتایج نشان داد که استفاده از ورق‌های حفره‌دار به جای شبکه میلگردها سبب کاهش جابجایی مرکز دال تحت بارگذاری انفجار شده است. در این راستا، می‌توان از این ویژگی ورق‌های حفره‌دار برای مواردی که جابجایی مرکز دال‌های بتنی تحت بارگذاری انفجار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند، استفاده نمود. در واقع این دال‌ها با توجه به هندسه خاص و یکپارچگی ورق‌ها و همچنین ظرفیت باربری در دو جهت سبب کاهش جابجایی مرکز دال شده‌اند.

جدول ۶: مقایسه پارامتری مدل‌های گروه اول

شماره مدل	بیشینه جابجایی مرکز دال (میلی-متر)	بیشینه نیروی عکس العمل تکیه‌گاهی (کیلو نیوتن)
S1-MP25	۱/۲۲۸۵	۴۷۸/۵۰۳
S1-MP100	۱/۲۲۹۴	۴۷۸/۴۹۷
S1-MP225	۱/۲۱۸۹	۴۸۲/۹۳۰
S1-MP400	۱/۲۰۴۶	۴۸۴/۳۸۲
S1-MR	۱/۳۰۸۳	۴۵۰/۰۹۰
S2-MP25	۹/۴۹۱۹	۱۰۵۹/۷۱۰
S2-MP100	۹/۵۲۶۵	۱۰۴۸/۸۷۰
S2-MP225	۹/۳۹۲۱	۱۰۵۹/۳۲۰
S2-MP400	۹/۳۰۴۳	۱۰۷۷/۲۹۰
S2-MR	۱۰/۵۲۳	۹۹۰/۱۲۰



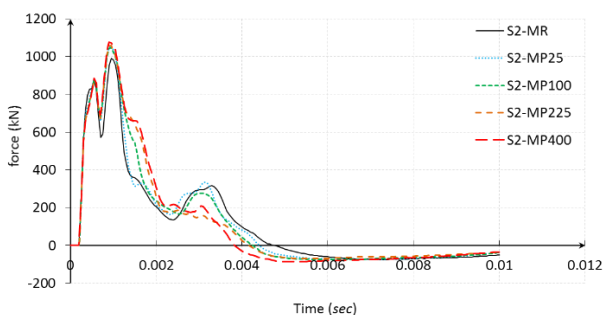
ب) سناریوی دوم



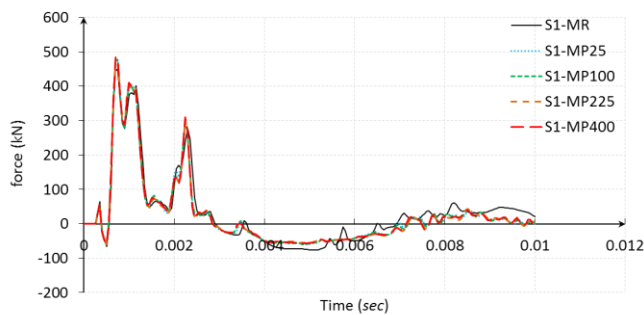
الف) سناریوی اول

شکل ۱۲: منحنی زمان تغییر مکان مرکز دال مدل‌های الف) سناریوی اول انفجار ب) سناریوی دوم انفجار.

یکی دیگر از موارد مهم در تحلیل دال‌ها پارامتر قابلیت جذب انرژی می‌باشد، این مورد از سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان در بار معادل استاتیکی محاسبه می‌گردد. از آنجایی که در این پژوهش از بارگذاری انفجار نزدیک استفاده شده است و در این نوع انفجار بارگذاری انفجار به صورت گروی از مرکز دال شروع می‌گردد و به صورت یکنواخت و گسترده در تمام سطح دال اعمال نمی‌شود به همین دلیل محاسبه بار معادل استاتیکی آن مشکل بوده است؛ بدین منظور در این پژوهش به نیروی عکس العمل تکیه گاهی در بار دینامیکی اکتفا شده است. بنابراین ابتدا در شکل ۱۳ منحنی‌های نیرو-زمان برای مدل‌ها در هر دو سناریوی انفجار نشان داده شده است و سپس در شکل ۱۴ منحنی نیرو-تغییر مکان آن‌ها نیز نشان داده شده است. مشاهده گردید در سناریوی دوم (شبیه انفجار قوی) سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان دال‌های مسلح به ورق‌های حفره‌دار نسبت به دال‌های مسلح به میلگرد تا حدودی بیشتر است. اما برای سناریوی اول (شبیه انفجار ضعیف) نمی‌توان چنین ادعایی داشت.

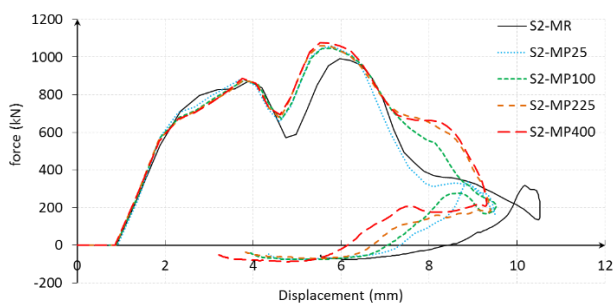


ب) سناریوی دوم

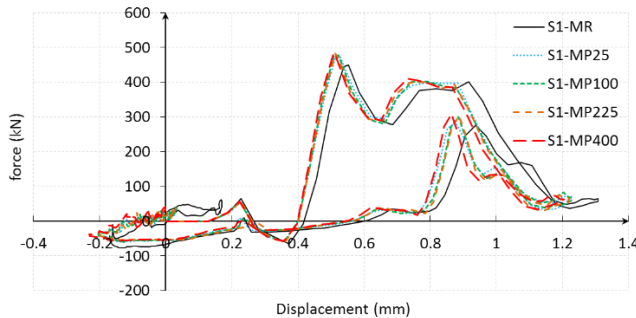


الف) سناریوی اول

شکل ۱۳: منحنی نیرو-زمان مدل‌های الف) سناریوی اول ب) سناریوی دوم.



ب) سناریوی دوم

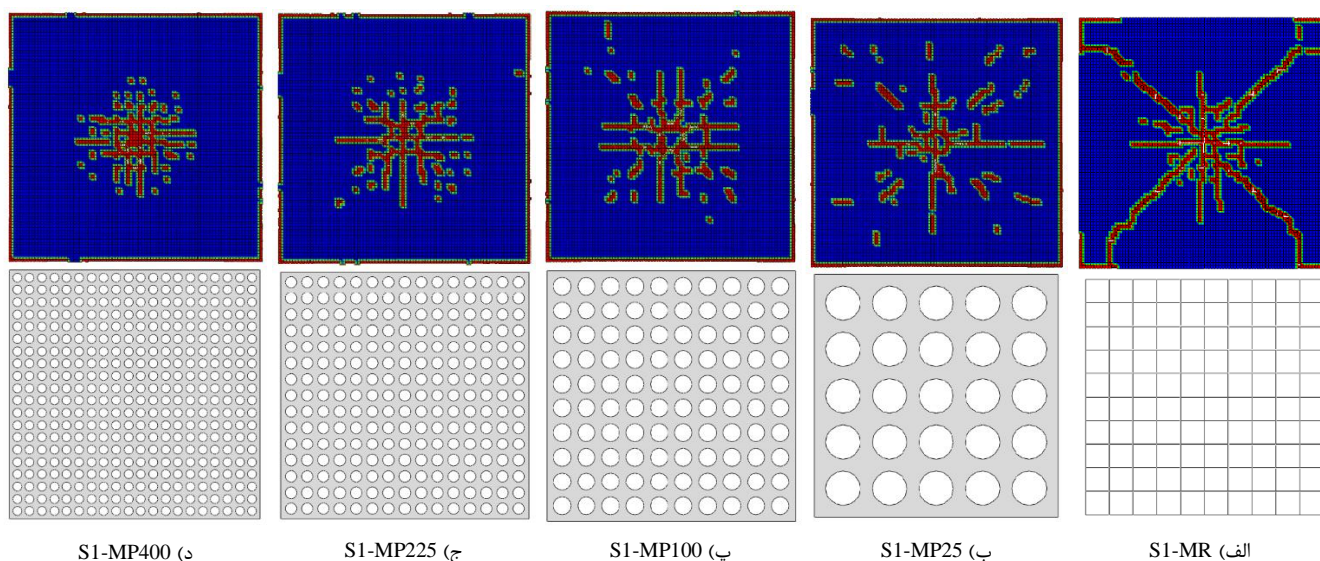


الف) سناریوی اول

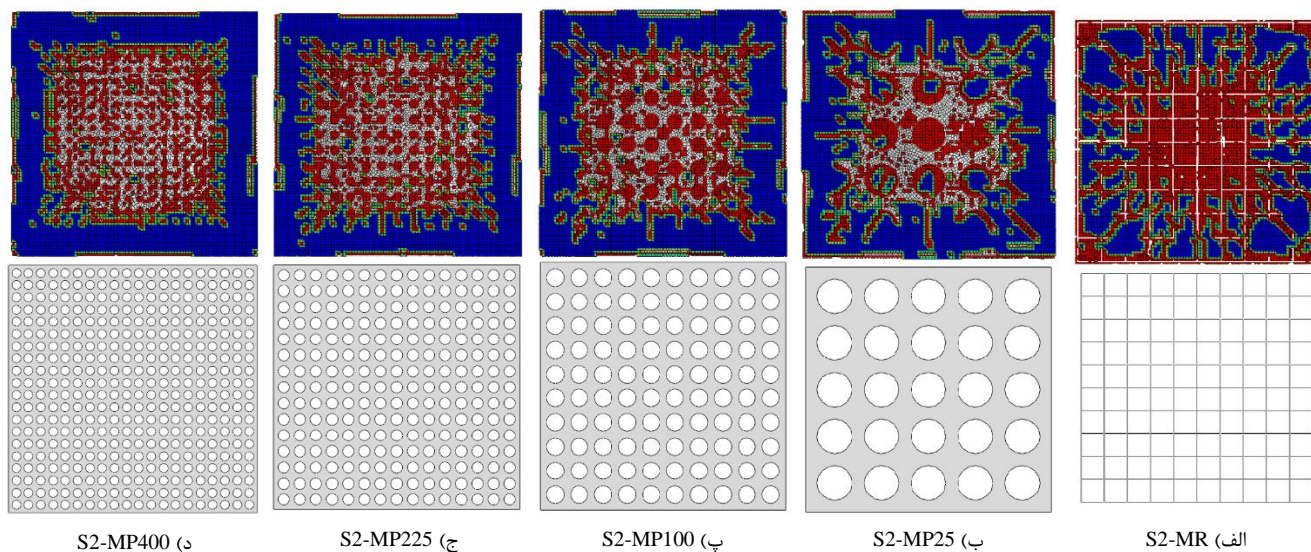
شکل ۱۴: منحنی نیرو-تغییر مکان مدل‌های الف) سناریوی اول ب) سناریوی دوم.

همان طور که بیان گردید پدیده قلوه کن شدگی دال های بتنی یکی دیگر از موارد بسیار مهم در تحلیل و طراحی دال های تحت بارگذاری انفجار است؛ زیرا وقوع این پدیده سبب آسیب به افراد و تجهیزات داخلی می شود. بنابراین ضروری است در مدل های این پژوهش این مورد نیز بررسی گردد. بنابراین از قابلیت حذف المان معیار رفتاری CDP در نرم افزار آباکوس جهت نمایش این پدیده در وجه پشتی دال استفاده شده است. در شکل های ۱۵ و ۱۶ آسیب در وجه پشتی دال ها به صورت گرافیکی به ترتیب در سناریوی های اول و دوم در زمان ۳ میلی ثانیه نشان داده است.

همان طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است در انفجارهای ضعیف وجود ورق های فولادی حفره دار به جای شبکه میلگردهای فولادی باعث شده است دال از لحاظ گسترش ترک در سطح پشتی بهبود یابد؛ به این معنا که رشد ترک ها به اطراف در سطح پشتی دال کمتر شده است و در واقع وجود این ورق ها سبب تمرکز خرابی در مرکز دال و قلوه کن شدگی سطح مرکزی دال می شوند. در سناریوی دوم انفجار نیز پدیده قلوه کن شدگی در پشت دال های مسلح به ورق حفره دار نسبت به دال مسلح به شبکه میلگردها تا حدودی بیشتر است (شکل ۱۶)؛ علت این موضوع را می توان این گونه بیان کرد که سطح ورق فولادی حفره دار، در بتن مرزی ایجاد می کند تا پوشش بتن در اثر امواج کششی به راحتی جدا شود. همچنین از تحلیل های صورت گرفته بدست آمده است که افزایش بیش از حد در تعداد حفره ها سبب افزایش سطح قلوه کن شدگی در وجه پشتی دال می شود. لازم به ذکر است استفاده از ورق های حفره دار در دال های بتنی نیز سبب کاهش آسیب در وجه جلویی دال شده است؛ از آنجایی که آسیب در این وجه نسبت به وجه پشتی کمتر مورد اهمیت است و به دلیل اختصار از تجزیه و تحلیل آسیب در سطح وجه جلویی دال صرف نظر شده است.

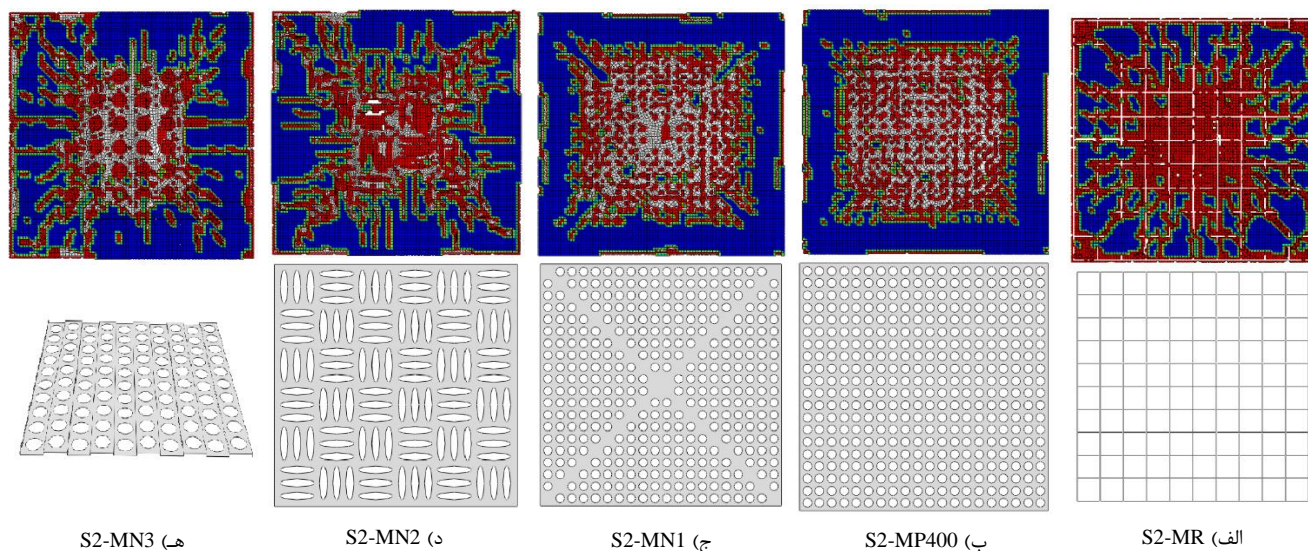


شکل ۱۵: کانتور آسیب در وجه پشتی دال مدل های سناریوی اول.

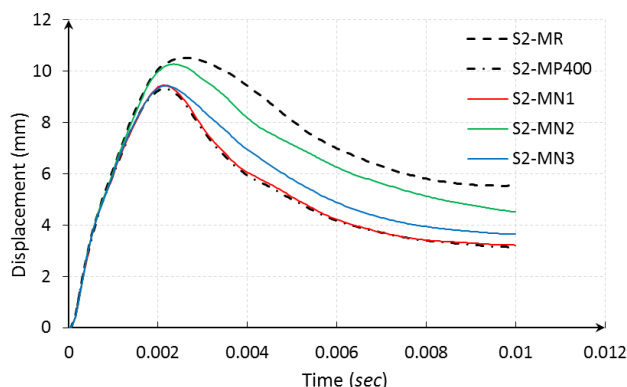


شکل ۱۶: کانتور آسیب در وجه پشتی دال مدل‌های سناریوی دوم.

به منظور کاهش آسیب در سطح پشتی دال‌های بتنی مسلح به ورق‌های حفره‌دار، مدل‌های S2-N1، S2-N2 و S2-N3 در سناریوی دوم انفجار که در نوع هندسه ورق و چیدمان حفره‌ها نسبت به مدل‌های قبل متفاوت هستند، مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۱۷ خرابی پشت دال مدل‌های مذکور به همراه مدل‌های S2-R و S2-P400 در زمان ۳ میلی‌ثانیه نشان داده شده است. در شکل ۱۸ نیز منحنی تغییر مکان مرکز دال نسبت به زمان آن‌ها نشان داده شده است. مشاهده گردید که مدل S2-N3 کمترین بیشینه جابجایی مرکز دال را داشته و همچنین دچار خرابی کمتری در سطح وجه پشتی دال شده است. زیرا وجود چین‌هایی در ورق‌های فولادی حفره‌دار سبب گیرداری بیشتر بین بتن و ورق فولادی شده و پدیده قله‌کن‌شدگی در پوشش پشتی بتن کمتر اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۷: مقایسه کانتور آسیب در وجه پشتی دال مدل‌های (الف) S2-MR (ب) S2-MP400 (ج) S2-MN1 (د) S2-MN2 (ه) S2-N3.



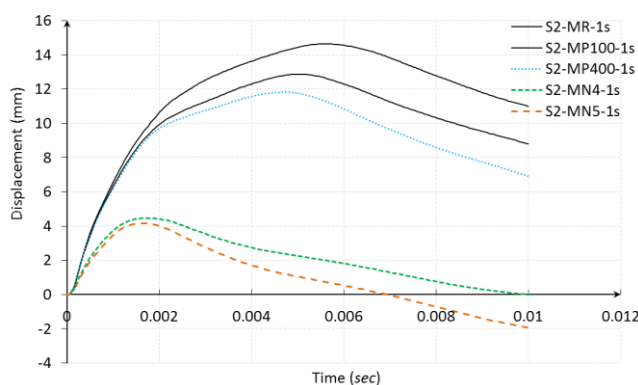
شکل ۱۸: مقایسه منحنی زمان-تغییر مکان مرکز دال مدل‌های S2-MR، S2-MP400، S2-MN1، S2-MN2 و S2-MN3.

از مقایسه تمامی مدل‌های گروه اول می‌توان ادعا نمود که مدل S4-MN3 بهترین عملکرد را داشته است. بدین منظور برای مقابله با پدیده قلمه‌کن‌شدگی در دال‌های بتن مسلح به ورق‌های حفره‌دار و به منظور اندرکنش بیشتر بین ورق و بتن، علاوه بر ایجاد حفره‌ها می‌توان از ورق‌های موجدار استفاده نمود.

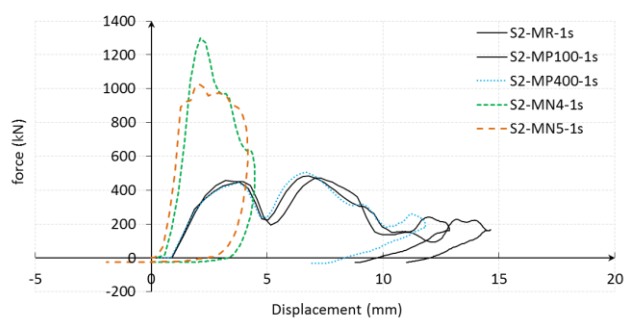
۴-۳-۲- گروه دوم

با توجه به اینکه تمامی مدل‌ها و ایده‌های ارائه شده در گروه اول مربوط به دال‌های دوطرفه بوده است، لازم است روش بیان شده جهت تسلیح بتن برای دال‌های یک طرفه نیز بررسی شود. همچنین در این قسمت ورق حفره‌دار به همراه تعدادی شیار فولادی حفره‌دار به منظور تسلیح دال بتنی یک طرفه در دو مدل مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور به طور کلی در این قسمت مدل‌های S2-MR-1s، S2-MP100-1s، S2-MP400-1s، S2-MN4-1s و S2-MN5-1s در دال یک طرفه تحت بارگذاری ناشی از انفجار در هوا بررسی شده‌اند.

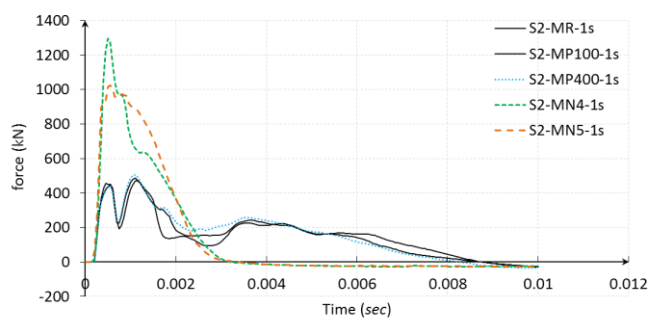
در شکل ۱۹ جابجایی مرکز دال نسبت به زمان مدل‌های گروه دوم نشان داده شده است؛ مشاهده گردید استفاده از ورق حفره‌دار به همراه شیارهای فولادی در دال‌های یک طرفه سبب کاهش قابل توجهی جابجایی مرکز دال می‌شود. در شکل ۲۰ و ۲۱ نیز به ترتیب منحنی نیرو نسبت به زمان و منحنی نیرو-تغییر مکان مرکز دال نشان داده شده است. در دال‌های یک طرفه نیز همانند دال‌های دوطرفه مشاهده گردید که بیشینه نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاهی در این دو مدل (S2-MN4 و S2-MN5) بیشتر بوده است.



شکل ۱۹: مقایسه منحنی زمان-تغییر مکان مرکز دال مدل‌های S2-MN4-1s و S2-MN5-1s.

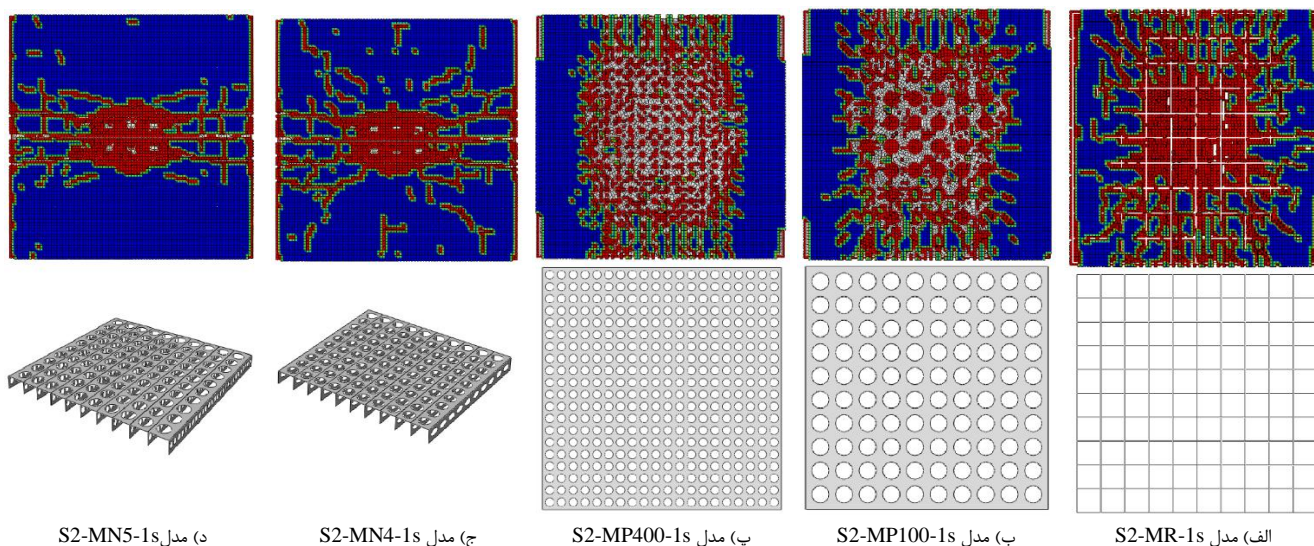


شکل ۲۱: مقایسه منحنی تغییر مکان-نیرو مدل‌های گروه دوم.



شکل ۲۰: مقایسه منحنی زمان-نیرو مدل‌های گروه دوم.

در شکل ۲۲ نیز آسیب در وجه پشتی مدل‌های گروه دوم نشان داده شده است. مشاهده گردید که استفاده از ورق حفره‌دار به همراه شیارهای حفره‌دار تاثیر بسزایی در کاهش آسیب در سطح وجه پشتی دال دارند. در شکل ۲۳ نیز تنش فون میسز^{۱۳} در سیستم تسلیح دال‌های گروه دوم نشان داده شده است. مشاهده گردید میلگردهای فولادی در نواحی میانی دال به حالت پلاستیک رسیده‌اند و در نواحی دیگر نیز تنش در میلگردها خیلی کمتر از تنش تسلیم فولاد (۴۱۴ مگاپاسکال) است؛ در صورتی که ورق فولادی هنوز به تسلیم نرسیده و فقط شیارهای فولادی مرکز دال به تنش تسلیم (۲۶۵ مگاپاسکال) رسیده‌اند.



مدل S2-MN5-1s (د)

مدل S2-MN4-1s (ج)

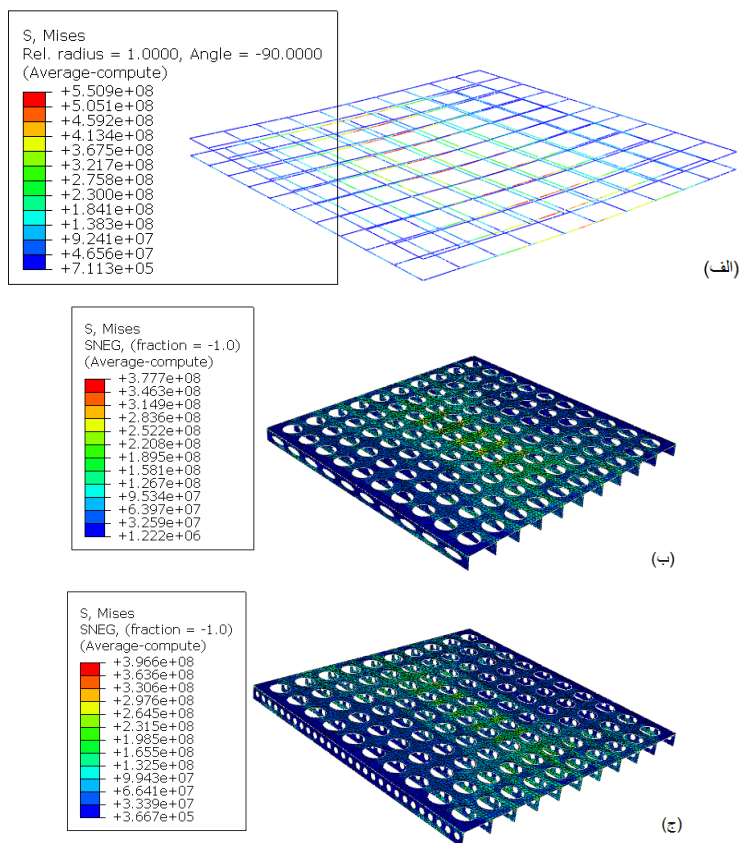
مدل S2-MP400-1s (ب)

مدل S2-MP100-1s (ب)

مدل S2-MR-1s (الف)

شکل ۲۲: آسیب در وجه پشتی مدل‌های دال یک طرفه گروه دوم

¹³ Von Mises Stress



شکل ۲۳: طیف تنش فون میسز در زمان بیشینه جابجایی مرکز دال (الف) مدل S2-MR-1s (ب) مدل S2-MN4-1s (ج) مدل S2-MN5-1s

۵- نتیجه گیری و پیشنهادها

در این پژوهش مدل‌هایی از دال‌های بتنی مسلح شده به ورق‌های فولادی حفره‌دار تحت بارگذاری انفجار در هوا در نرم افزار اجزا محدود آباکوس مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج زیر حاصل گردید.

۱- با توجه به صحت سنجی انجام شده در این پژوهش می‌توان اطمینان داشت که شبیه سازی دال‌های بتن مسلح تحت بارگذاری انفجار جایگزین مناسبی برای مطالعات میدانی و آزمایشگاهی که خطرات و هزینه زیادی دارند، است.

۲- خرابی در دال‌های بتن مسلح تحت بارگذاری انفجار ضعیف در هوا بیشتر به صورت ترک‌های موضعی در پشت دال بوده است؛ اما در دال‌های بتن مسلح تحت بارگذاری انفجار قوی خرابی به صورت شکست پانچ موضعی است.

۳- استفاده از ورق‌های فولادی حفره‌دار در دال‌های بتنی جایگزین شبکه‌های میلگردی تحت بارگذاری انفجار در هوا سبب کاهش بیشینه تغییر مکان مرکز دال می‌شود.

۴- افزایش تعداد حفره‌ها به وسیله کاهش قطر آن‌ها در ورق‌های فولادی استفاده شده در دال‌های بتنی سبب ایجاد اندرکنش بیشتر بین بتن و سیستم تسلیح گردید؛ اما برای پوشش بتن در وجه پشتی دال مرزی ایجاد شده که سبب می‌شود پوشش بتن بیشتر در معرض جدایش و قلوه‌کن شدگی قرار گیرد. بنابراین در دال‌های استفاده شده از ورق‌های فولادی حفره‌دار میزان پوسته پوسته شدن در پشت دال بهبود قابل قبولی نداشته است.

- ۵- بیشینه تغییر مکان مرکز دال در دال بتنی مسلح به ورق فولادی موجدار حفره دار نسبت به دال بتنی مسلح به ورق فولادی مسطح حفره دار کمتر بوده است؛ همچنین آسیب و خرابی در سطح پشتی این نوع دال ها نیز کمتر بوده است. زیرا استفاده از ورق های موجدار به جای ورق های مسطح باعث اندرکنش بیشتر بین ورق و بتن می شود. بنابراین پوشش بتن در وجه پشتی دال به سختی در اثر پدیده قلوه کن شدگی جدا می شود.
- ۶- استفاده از ورق فولادی حفره دار به همراه تعدادی شیار فولادی حفره دار عمودی در زیر آن جهت تسلیح دال های بتنی یک طرفه سبب بهبود قابل توجه در عملکرد دال (کاهش چشمگیر جابجایی مرکز دال و کاهش میزان آسیب در وجه پشتی دال بتنی) تحت بارگذاری انفجار گردید.
- ۷- پیشنهاد می شود که انواع ورق های فولادی موجدار از جمله ورق های فولادی با چین های کرکره ای، دوزنقه ای و یا حتی ورق های فولادی استفاده شده در سقف های عرشه فولادی به همراه شیارهای فولادی متفاوت برای تسلیح دال های بتنی تحت بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

- [1] Hadianfard, M. A., Malekpour, S., & Momeni, M. (2018). Reliability analysis of H-section steel columns under blast loading. *Structural Safety*, 75, 45-56.
- [2] Momeni, M., Hadianfard, M. A., Bedon, C., & Baghlani, A. (2020). Damage evaluation of H-section steel columns under impulsive blast loads via gene expression programming. *Engineering Structures*, 219, 110909.
- [3] Momeni, M., Bedon, C., Hadianfard, M. A., & Baghlani, A. (2021). An efficient reliability-based approach for evaluating safe scaled distance of steel columns under dynamic blast loads. *Buildings*, 11(12), 606.
- [4] Park, R. and Gamble, W. L. (1999). *Reinforced concrete slabs*. John Wiley and Sons.
- [5] Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A. and Ramsay, J. (2007). Blast loading and blast effects on structures—an overview. *Electronic journal of structural engineering*(1), 76-91.
- [6] Luccioni, B. M. and Luege, M. (2006). Concrete pavement slab under blast loads. *International journal of impact engineering*, 32(8), 1248-1266.
- [7] Wang, W., Zhang, D., Lu, F., Wang, S.-c. and Tang, F. (2013). Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion. *Engineering Failure Analysis*, 27, 41-51.
- [8] Kumar, V., Kartik, K. and Iqbal, M. A. (2020). Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading. *Engineering Structures*, 206, 110125.
- [9] Khalo, A. and Raisi Dehkordi, M. (2001). Performance of two-sided concrete slabs reinforced with perforated steel sheets. Technical Faculty of Tabriz University, 27(27 consecutive), 13-22. SID. <https://sid.ir/paper/43866/fa>. (in persian).
- [10] Xu, X., Liu, Y. and Zuo, Y. (2018). Contribution of perforated steel ribs to load-carrying capacities of steel and concrete composite slabs under negative bending. *Advances in Structural Engineering*, 21(12), 1879-1894.
- [11] AL-HABBOBI, A. M. and AL-WAZNI, S. J. (2020). Blast loading response of a special concrete slab reinforced with embedded cnc steel plate. *Journal of Engineering Science and Technology*, 15(6), 3803-3819.
- [12] Abaqus, G. (2011). Abaqus 6.11. *Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, RI, USA*.
- [13] Hafezolghorani, M., Hejazi, F., Vaghei, R., Jaafar, M. S. B. and Karimzade, K. (2017). Simplified damage plasticity model for concrete. *Structural Engineering International*, 27(1), 68-78.
- [14] Karlos V, Solomos G, Larcher M. (2016). Analysis of the blast wave decay coefficient using the Kingery – Bulmash data. *Int J Prot Struct*
- [15] Kot, C., & Turula, P. (1976). *Air blast effects on concrete walls*. Retrieved from
- [16] Saedi-Daryan, A., Bahrampoor, H.A. and Arabzadeh, H. (2011). *Comprehensive guide to ABAQUS software*. Angizeh, Page(297-307). (in persian).
- [17] Manual, A. S. U. s. (2012). Abaqus 6.11. <http://130.149>, 89(2080), v6.
- [18] Comitè Euro-International du Béton. (1993). *CEB-FIP model code 1990: Design code*. Thomas Telford Publishing.
- [19] Li, X. X. L. (2020). Parametric study on numerical simulation of missile punching test using concrete damaged plasticity (CDP) model. *International Journal of Impact Engineering*, 144, 103652.

- [20] Botez, M., Bredean, L. and Buru, M. (2018). *Reinforced concrete slab subjected to blast. Numerical model validation*. Paper presented at the 17th International Technical-Scientific Conference on Modern Technologies for the 3rd Millennium Conference Location Oradea, ROMANIA.
- [21] Alsabhan, A. H., Sadique, M. R., Alqarni, A. S., Alam, S., & Suh, W. (2022). Behavior of Sedimentary Rock Tunnel against Rigid Projectile Impact. *Applied Sciences*, 12(19), 9595.
- [22] Chehab, A. I., Eamon, C. D. and Griffin, J. (2017). Collapse resistance of rc moment-resisting frame and shear wall structural systems exposed to blast. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(2), 04016099.
- [23] Tai, Y., Chu, T., Hu, H. and Wu, J. (2011). Dynamic response of a reinforced concrete slab subjected to air blast load. *Theoretical and applied fracture mechanics*, 56(3), 140-147.
- [24] Zhu, H., Yam, M. C., Lam, A. C. and Iu, V. (2009). The shear lag effects on welded steel single angle tension members. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(5), 1171-1186.