

ارزیابی رفتار دال‌های بتنی حاوی بازشو در برابر بارهای انفجاری

مهشید ابراهیمی *

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی دیلمان، گیلان، ایران.

بنیامین گنجه خسروی

عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی دیلمان، گیلان، ایران.

چکیده

با نگاهی به اتفاقات و حوادث تروریستی در سال‌های اخیر، محافظت ساختمان‌ها در برابر انفجار نه تنها مورد توجه نهادهای نظامی است بلکه یک دغدغه مهم برای مهندسان طراح می‌باشد. با توجه به اهمیت دال‌ها هنگام انفجار در ساختمان، طراحی صحیح آن‌ها طبق استانداردهای فنی و امنیتی بویژه معیارهای پدافند غیرعامل امری ضروری است. در طراحی و ساخت دال‌ها، در نظر گرفتن بازشوها با اهداف مختلف از جمله عبور لوله‌ها، داکت‌های تأسیساتی و الکتریکی و آسانسور ضروری می‌باشد. بطور کلی وجود بازشو، باعث تغییر رفتار دال می‌شود. از این رو در این پژوهش رفتار دال‌ها با حضور بازشو توسط نرم افزار ABAQUS به صورت دینامیکی تحلیل شدند و برای رسیدن به حالت بهینه، تأثیر شکل و موقعیت قرارگیری بازشو و همچنین تأثیر افزایش مقاومت فشاری بتن روی عملکرد دال حاوی بازشو بررسی گردید. در این مطالعه ابعاد و ضخامت دال، بار انفجاری و شرایط تکیه‌گاهی یکسان در نظر گرفته شد و حداکثر جابجایی و میزان آسیب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد بازشوهای دایره‌ای شکل عملکرد بهتری نسبت به بازشوهای مربعی شکل دارند و هنگامی که بازشو در قسمت مرکزی دال قرار گیرد، جابجایی کمتری نسبت به حالتی که بازشو در گوشه‌ی دال قرار گیرد، به وجود می‌آورد. بعلاوه در دال حاوی بازشو دایره در مرکز، مقدار و سطح کمتری از دال دچار آسیب می‌گردد. بنابراین توصیه می‌شود بازشو حداکثر امکان در نواحی مرکزی دال تعبیه شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که هرچقدر مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد، تغییر مکان حاصل کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: دال بتن مسلح، بارگذاری انفجار، بازشو، حداکثر جابجایی، پدافند غیرعامل.

* نویسنده مسئول: benyamin.g510@yahoo.com

۱- مقدمه

های بتن مسلح نشان داد که: میزان ماده منفجره و فاصله آن نسبت به دال بتن مسلح مواردی هستند که نحوه گسیختگی در دال (خمش یا برشی) را تعیین می‌کنند. همچنین افزایش آرماتور مصرفی می‌تواند محل خرابی را از مرکز دال به نقاط تکیه‌گاهی انتقال دهد [۳].

یاو^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۶، به بررسی آزمایشگاهی و عددی پاسخ دینامیکی دال‌های بتن آرمه تحت بار انفجار پرداختند. عملکرد ضدانفجار و مشخصات آسیب دال بتنی مسلح با درصد آرماتور مختلف در این مطالعه از طریق هر دو آزمایش انفجار و شبیه‌سازی عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌است. سه مجموعه از دال‌ها با درصد آرماتور مختلف تحت بارگذاری انفجاری ۰/۱۳ کیلوگرم و ۰/۱۹ کیلوگرم TNT انجام شد. نتایج تجربی و عددی نشان می‌دهد که: افزایش بار انفجاری به تدریج میزان خرابی دال بتنی را تغییر می‌دهد. قطر ترک و مساحت انفجار در آزمایش انفجاری جرمی بزرگ‌تر، بیشتر از آزمایش انفجاری جرمی کوچک است. از سوی دیگر، با افزایش درصد آرماتور، درجه آسیب، خیز و شعاع دهانه کاهش می‌یابند. معیار درصد آرماتور بکار رفته در دال‌های بتن آرمه هدف اصلی بررسی در این تحقیق انتخاب شد و نتایج نشان داد که: خیز ایجاد شده در دال با فاصله مقیاس و درصد آرماتور بکار رفته در دال‌ها رابطه عکس دارد [۴].

عبداللهی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به مطالعه عددی روی ظرفیت برشی دال بتنی مسلح ساخته شده با بتن با مقاومت بالا پرداختند. آنها تأثیر اندازه، شکل و محل بازشو را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش اثر وجود بازشو در دو گروه دال تخت بتن مسلح، یک گروه با بتن مقاومت بالا و گروه دیگر با بتن مقاومت معمولی بررسی شد. به این منظور چند نمونه دال تخت با موقعیت، شکل و ابعاد مختلف بازشو با بتن مقاومت معمولی، با دال‌هایی با همان هندسه ولی با بتن مقاومت بالا مقایسه گردیده است. نتایج این مطالعه نشان داد که: بتن مقاومت بالا، مقاومت برشی دال را بهبود می‌بخشد و باعث انتقال نیروهای بالاتری در محل اتصال دال-ستون می‌گردد. همچنین ابعاد، شکل و موقعیت قرارگیری بازشو بر میزان افزایش بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌ها موثر است [۵].

انفجارها می‌توانند باعث آسیب شدید به ساختمان‌ها و گاهی منجر به خرابی پیش‌رونده و کامل شوند. فشارهای وارد شده از انفجار یکی از مخرب‌ترین بارهایی است که سازه ممکن است تجربه کند. تعداد زیادی از سازه‌های موجود در برابر بارهای ناشی از موج انفجار آسیب‌پذیر هستند، از این رو لازم است مقاومت آن‌ها در برابر این گونه بارها مورد مطالعه قرار گیرد.

به طور کلی، انفجار عبارتست از آزادسازی سریع حجم بسیار زیاد انرژی که به صورت گرما، نور، صدا و موج ضربه‌ای حاصل می‌شود. طراحی سازه‌های بتنی مقاوم در برابر انفجار نه تنها مورد توجه آژانس‌های نظامی است بلکه جامعه مهندسی نیز علاقمند به شناخت اثر انفجار ناشی از حوادث احتمالی بوده است. از پیدایش تکنولوژی انفجار مدت زیادی می‌گذرد. در واقع در سال ۱۹۸۷ در کنگره ملی سازه‌ها بیان شده بود که: محافظت سازه‌ها در برابر حملات تروریستی از گذشته به عنوان یک دغدغه مورد توجه مهندسين بوده‌است. با این حال افزایش حملات به سازه‌های نظامی و غیرنظامی طی دو دهه اخیر توجه جدی‌تری را نسبت به آسیب‌پذیری و مقاومت سازه‌ها در برابر انفجار جلب کرده است [۱].

تحقیقات تجربی بسیاری در زمینه سازه‌های آسیب‌دیده تحت بار انفجاری صورت گرفته‌است که مطالعات آزمایشگاهی بسیار پرهزینه، وقت‌گیر و دارای مشکلات جدی امنیتی می‌باشد. از این رو تحلیل‌های عددی می‌تواند روش قدرتمندی برای کاهش این موانع باشند. به علاوه دید بهتری نسبت به خرابی‌های پیچیده که به طور مستقیم قابل مشاهده نیستند، فراهم می‌سازد [۲].

کاربرد وسیع دال‌های بتن مسلح در ساختمان‌ها، اهمیت بررسی رفتار این سازه‌ها را در برابر بارگذاری انفجاری نشان می‌دهد. تای^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۱، به مطالعه پاسخ دینامیکی یک دال بتن مسلح تحت بار انفجار در هوا پرداختند. در این مطالعه با استفاده از نرم افزار تجزیه و تحلیل عناصر محدود غیرخطی LS DYNABا انجام یک شبیه‌سازی عددی برای مدل‌سازی بار انفجار در هوا استفاده شد. بر اساس نتایج این تحقیق ابعاد المان‌های مدل اجزاء محدود در نحوه انتشار موج انفجار موثر بوده و باید به نحو مناسب انتخاب شود. از طرفی نتایج حاصل از پاسخ دینامیکی دال

¹ Tai² Yao

روی مقاومت برشی پانچ دال بتن مسلح پرداختند. هدف از این تحقیق بررسی رفتار اتصالات دال - ستون بتن مسلح تحت بارهای عمودی و همچنین بررسی اثرات بازشوها بر مقاومت برشی پانچ دال‌های بتن مسلح است. برای این منظور، از مدل‌سازی المان محدود (FE) برای بررسی اثرات بازشوهایی با اندازه و مکان متفاوت بر مقاومت برشی پانچ اتصالات استفاده شده است. در مرحله اول، یک مدل FE با یک نمونه آزمایشگاهی از اتصال دال - ستون اعتبارسنجی شده است. در مرحله دوم مطالعه، ۸ اتصال داخلی و ۸ اتصال لبه‌ای تحت بار عمودی افزایشی تحلیل شده‌اند. هر اتصال دارای یک بازشو با ابعاد $150 \times 150 \times 250$ میلی‌متر و 250×250 میلی‌متر است که در فاصله ۰، ۷۵، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر از ستون قرار دارد. در حالی که یک اتصال بدون بازشو در هر مورد به عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود. نتایج عددی نشان می‌دهند که بازشوهایی نزدیک به ستون باعث افزایش قابل توجه تنش برشی در اطراف اتصالات دال - ستون می‌شوند. علاوه بر این، با افزایش ابعاد و کاهش فاصله بازشو از ستون، تنش برشی در اطراف بازشو به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد [۸].

کومار^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۱ به مطالعه تجربی و عددی برای بررسی مقاومت در برابر خرابی دال‌های بتن مسلح در برابر بار انفجار پرداختند. دال‌های هدف ($100 \times 100 \times 100$ سانتی‌متر) در معرض انفجار ایجاد شده توسط سه وزن مختلف ماده منفجره TNT معادل ۲-۰/۸۵ کیلوگرم و فاصله مقیاسی $m/kg^{1/3}$ ۰/۵۲۷-۰/۷۹ قرار گرفته‌اند. آنها به این نتیجه دست یافتند که فشار و آسیب با افزایش مقدار TNT افزایش می‌یابد در حالی که این مقدار با افزایش فاصله مقیاسی کاهش می‌یابد [۹].

بازشو در ساختمان به قسمتی گفته می‌شود که هنگام اجرا به صورت حفره باقی می‌ماند. وجود بازشو در دال به منظور نورگیری، عبور لوله‌های تاسیساتی و خدمات دیگر لازم می‌باشند. نمی‌توان مکان بازشو را به خاطر وجود محدودیت‌های سازه‌ای، براساس سلیقه و طرح‌های هنری در نظر گرفت. از این رو می‌بایست با توجه به فاکتورهای سازه‌ای، مکان بهینه بازشو را طراحی نمود.

هدف از انجام این مطالعه بررسی رفتار دال‌های بتنی در صورت حضور بازشو تحت بارهای انفجاری می‌باشد که حداکثر جابجایی

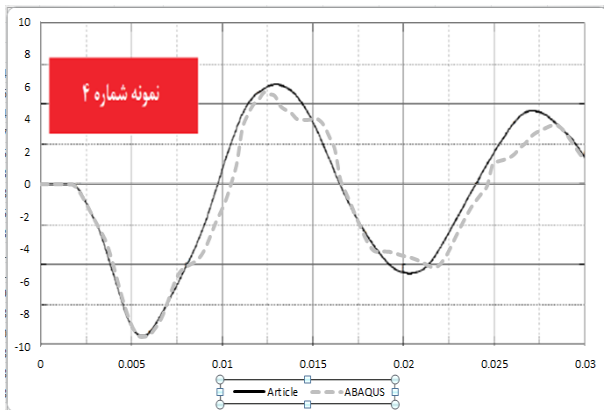
سیف الهی و مرشد در سال ۲۰۱۸، به بررسی رفتار دال‌های بتن آرمه تحت اثر انفجار پرداختند. برای حل عددی مدل‌های دال بتنی از نرم افزار المان محدود LS-DYNA که توانایی مدل‌سازی انفجار را داراست، استفاده شده است. پارامترهای مورد بررسی ابعاد و شرایط تکیه‌گاهی، محل انفجار و میزان ماده منفجره و چگونگی آرماتورگذاری 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 صورتی که درصد آرماتور به کار رفته در نمونه‌های شبیه سازی شده افزایش یابد خیز حداکثری که نمونه‌های شبیه سازی شده در شرایط یکسان تجربه کرده‌اند، به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد. همچنین تغییر شرایط تکیه‌گاهی از گیردار به ساده تأثیر بسزایی در گستردگی ایجاد ترک و تغییر سطح خرابی دال‌ها دارد. البته افزایش طول دهانه تأثیر چندانی در افزایش سطح خرابی دال‌ها نداشته است [۶].

جمعه منظری و شهبان مقدم در سال ۲۰۱۹ به بررسی تأثیر انواع بازشو و سخت‌کننده بر روی پاسخ دینامیکی صفحه‌های FGM تحت بارهای انفجاری پرداختند. در پژوهش حاضر به سنجش پارامترهایی در صفحه‌های دارای بازشو شامل نوع، درصد، موقعیت قرارگیری بازشو و مقدار جرم ماده‌ی منفجره و در صفحه‌های دارای سخت‌کننده، نوع، تعداد، آرایش سخت‌کننده و شرایط مرزی و همچنین اثر توام بازشو و سخت‌کننده با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده است. نتایج پژوهش از طرفی حاکی بر آن است که ایجاد بازشو باعث کاهش سختی صفحه و به دنبال آن افزایش مقدار تغییر مکان می‌شود؛ اما با کاهش سطح اعمال بار و افزایش درصد بازشو، تغییر مکان صفحه کاهش می‌یابد. در بررسی اثر توام این عامل‌ها مشاهده شد که ایجاد بازشو و استفاده از سخت‌کننده‌ی مناسب، مقدار تغییر مکان صفحه را تا مقدار زیادی نسبت به انواع دیگر کاهش می‌دهد [۷].

مستوفی نژاد و همکاران در سال ۲۰۲۰ به مطالعه اثرات بازشوها

¹ Kumar

و میزان آسیب حاصل از وجود بازشوهایی با اشکال و موقعیت- های مختلف تعیین و با یکدیگر مقایسه می شوند. همچنین در این پژوهش تأثیر افزایش مقاومت فشاری بتن روی عملکرد دال حاوی بازشو مورد مطالعه قرار گرفته است. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه رفتار دال بتنی در برابر انفجار مطرح شده است. اما با توجه به اهداف عنوان شده، مهمترین مسأله مورد بررسی در این تحقیق اثر وجود بازشوها (شکل و محل قرارگیری بازشو) در دال های بتنی تحت بار انفجار است.



شکل ۱- نمودار مقایسه بین نتایج سیف الهی و مرشد با نتایج

تحقیق حاضر برای نمونه ۴

۲- مدل سازی

در این پژوهش، شبیه سازی دال بتن مسلح تحت بار انفجاری توسط نرم افزار ABAQUS انجام شده است. برای مدل سازی بتن از المان Solid استفاده شد و آرماتورهای دال نیز با استفاده از المان Wire مدل سازی شدند. برای اطمینان از صحت مدل عددی، پس از انجام آنالیز، خروجی های حاصل استخراج گشته و نتایج مدل شبیه سازی شده در ABAQUS با مطالعات سیف الهی و مرشد [۶] مقایسه و صحت سنجی شدند. آنها در سال ۱۳۹۶ به بررسی رفتار دال های بتن آرمه تحت اثر انفجار پرداختند و ۱۹ نمونه دال بتنی مسلح شده با میلگردهای فولادی را مورد بررسی قرار دادند که نمونه شماره ۴ برای صحت سنجی انتخاب گردید. این نمونه، دالی به ابعاد $20 \times 30 \times 30$ سانتی متر می باشد که با دو شبکه میلگرد شامل ۳۰ عدد میلگرد نمره ۸ به فاصله ی ۱۰ سانتی متر مسلح شده است و تحت انفجار با فاصله مقیاسی $0.56 \text{ m/kg}^{1/3}$ قرار دارد. مشخصات عمومی بتن و فولاد مورد استفاده در شبیه سازی به ترتیب در جدول های ۱ و ۵ ارائه شده است.

در تحقیق آنها [۶] تغییر مکان حداکثر مرکز دال گزارش شده است. در شکل ۱ نمودار مقایسه بین نتایج سیف الهی و مرشد با نتایج تحقیق حاضر برای نمونه ۴ مشاهده می شود. در نمودار حاصله محور افقی نمایانگر زمان و محور عمودی نمایانگر مقدار جابجایی می باشد. تطابق بسیار خوبی بین دو مدل هم از نظر مقادیر حداکثر تغییر مکان و هم از نظر رفتار دال در طول زمان وجود دارد. به طوری که حداکثر جابجایی اندازه گیری شده در مقاله ۹/۴۵ میلیمتر و مقدار متناظر در مدل اجزا محدود ۹/۳۸ میلیمتر بوده است یعنی اختلافی در حدود ۰/۷ درصد که این نتیجه حکایت از تطابق

۲-۱ مشخصات دال بتنی شبیه سازی شده

در این بخش از دال صحت سنجی شده در قسمت قبل (دال نمونه ۴ پژوهش سیف الهی و مرشد [۶]) با ابعاد $20 \times 30 \times 30$ سانتی متر به عنوان مبنا استفاده شد، که توسط دو شبکه میلگرد شامل ۳۰ عدد میلگرد نمره ۸ به فاصله ی ۱۰ سانتی متر مسلح شده است. دال مورد مطالعه حاوی بازشو می باشد، به گونه ای که مساحت بازشوها ۲۵٪ مساحت کل دال است [۱۰]. در این پژوهش ابعاد و ضخامت دال، بار انفجاری و شرایط تکیه گاهی یکسان در نظر گرفته شد. پس از بررسی های انجام شده ابعاد هر المان مورد استفاده در مش بندی، 10×10 سانتی متر مربع در نظر گرفته شده است. برای مش بندی از تکنیک مش بندی مربعی^۱، استفاده شد که معمولاً بهترین شکل مش بندی می باشد و به دلیل منظم بودن مش با این تکنیک، نتایج دقیق تری حاصل می گردد. شکل ۲ مدل مورد استفاده در نرم افزار ABAQUS را نمایش می دهد. بازشوها در دو حالت مربع و دایره ای مورد بررسی قرار گرفته اند.

۲-۲ ویژگی مصالح

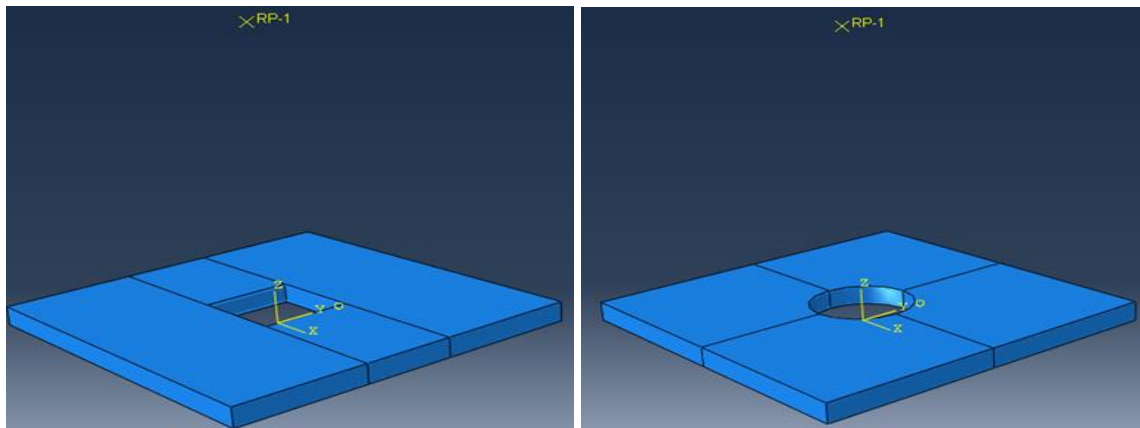
۲-۲-۱ بتن

مدل های رفتاری مختلفی جهت مدل سازی بتن وجود دارد که هر کدام مزایا و معایبی دارند. در این پژوهش از مدل رفتاری CDP^۲ استفاده شده است. مقاومت فشاری بتن 40 Mpa در نظر گرفته شده است. معادلات مختلفی برای حالت فشاری و کششی بتن ارائه

² Concrete damaged plasticity

¹ Structured

شده که در این مطالعه برای حالت فشاری از روابط پوپوویکس^۱ [۱۱] و برای حالت کششی از روابط بلاربی و اچ‌سو^۲ [۱۲] استفاده شده‌است. در شکل ۳ و ۴ به ترتیب نمودار تنش- کرنش بتن در فشار طبق روابط پوپوویکس و نمودار تنش- کرنش بتن در کشش طبق روابط بلاربی و اچ‌سو با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال دیده می‌شود.



شکل ۲- مدل مورد استفاده در نرم افزار

بتن در فشار و کشش به ترتیب در جداول ۳ و ۴ ارائه شده‌است.

جدول ۱ - مصالح بتن ورودی به نرم افزار

Mass Density (kg/m ³)	Poisson's Ratio	Young's Modulus (Pa)
2400	0/15	27897523664

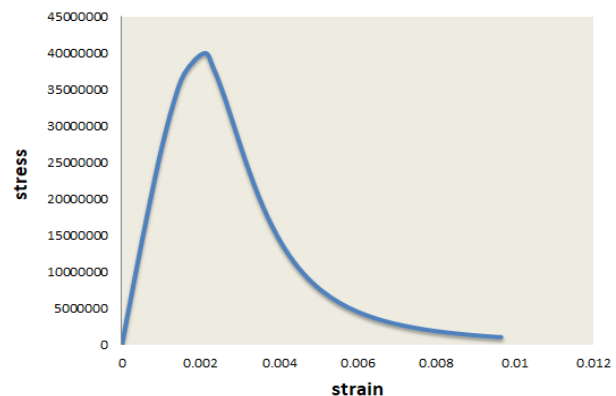
جدول ۲- مشخصات پلاستیسیته بتن

÷	K	σ_{b0}/σ_{c0}	برون محوری	زاویه اتساع
۰	۰/۶۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۰

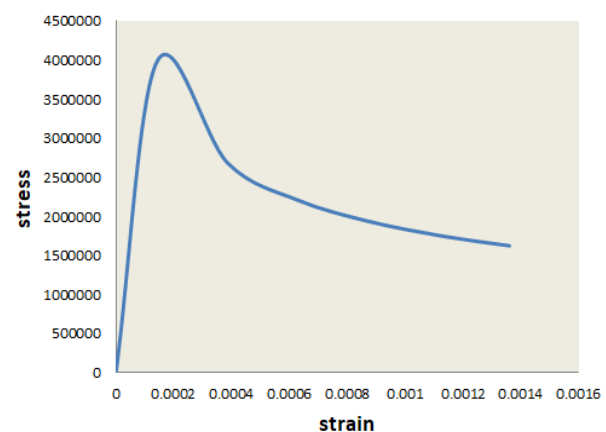
جدول ۳- مقادیر تنش، کرنش و تخریب پلاستیک بتن در فشار

طبق روابط Popovics [۱۱]

Compressive Stress (Pa)	Inelastic Strain	Compressive Damage Parameter
12000000	0	0
19248268/95	1/00366E-05	0/00434503
26701617/79	4/28678E-05	0/013258189
.	.	.
.	.	.
.	.	.
1204979/5	0/009149031	0/984506968
1115786/52	0/009381016	0/985987497
1035060/082	0/009612698	0/987297726



شکل ۳- نمودار تنش - کرنش بتن در فشار طبق روابط پوپوویکس



شکل ۴- نمودار تنش - کرنش بتن در کشش طبق روابط بلاربی و اچ‌سو

مشخصات مصالح بتن ورودی به نرم افزار در جدول ۱، مشخصات پلاستیسیته در جدول ۲ و مقادیر تنش، کرنش و تخریب پلاستیک

³ Belarbi and Hsu

² Popovics

شدن بازشو در نمونه مورد مطالعه، بار انفجار با منفجر کردن ۱۵ کیلوگرم ماده منفجره TNT در فاصله ۳ متری از بالای دال اعمال شده است. همچنین لازم است اندرکنشها و قیود احتمالی را بین سطوح تماس تعریف نمود که در این تحقیق برای تعیین اندرکنش بین میلگردها و بتن از قید Embedded region استفاده شده است.

جدول ۵- مصالح آرماتور فولادی ورودی به نرم افزار [۶]

Mass Density (kg/m ³)	Poisson's Ratio	Young's Modulus (Pa)	Yield stress (MPA)
7800	0/3	210e9	400

همچنین بارگذاری به روش Conwep که این مدل به صورت انفجار در هوا می باشد، در نرم افزار اعمال شد. شکل ۵ نحوه اعمال بار انفجار در نرم افزار آباکوس را نمایش می دهد. در این پژوهش دال از چهار طرف دارای تکیه گاه گیردار می باشد. در شکل ۶ شرایط مرزی و تکیه گاه های نمونه دیده می شود.

جدول ۴- مقادیر تنش، کرنش و تخریب پلاستیک بتن در کشش طبق روابط Belarbi and Hsu [۱۲]

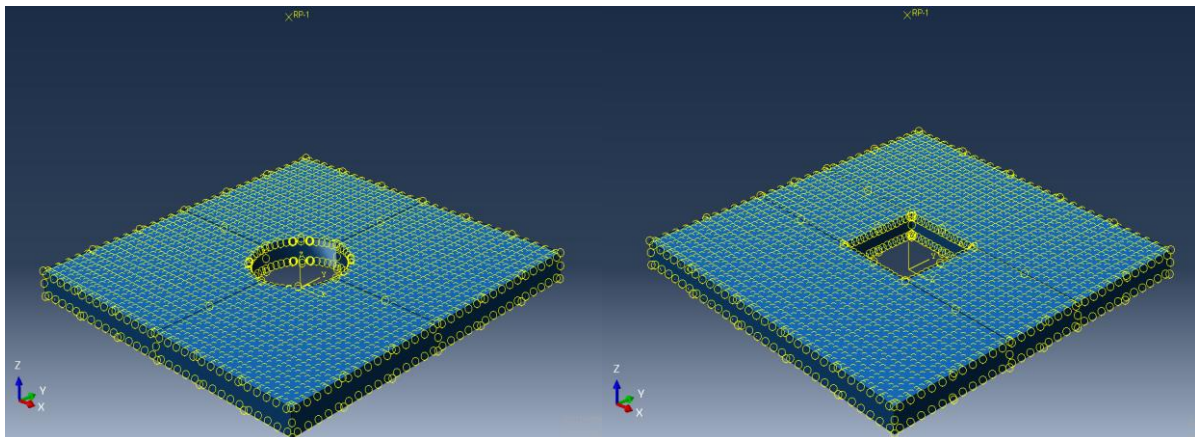
Tensile Stress (Pa)	Inelastic/Cracking Strain	Tensile Damage Parameter
3984469/85	0	0
2676249/30	0/00029036	0/731476494
1750328/53	1750328/533	0/93795935
1617547/76	0/001302173	0/95285797

۲-۲-۲- فولاد

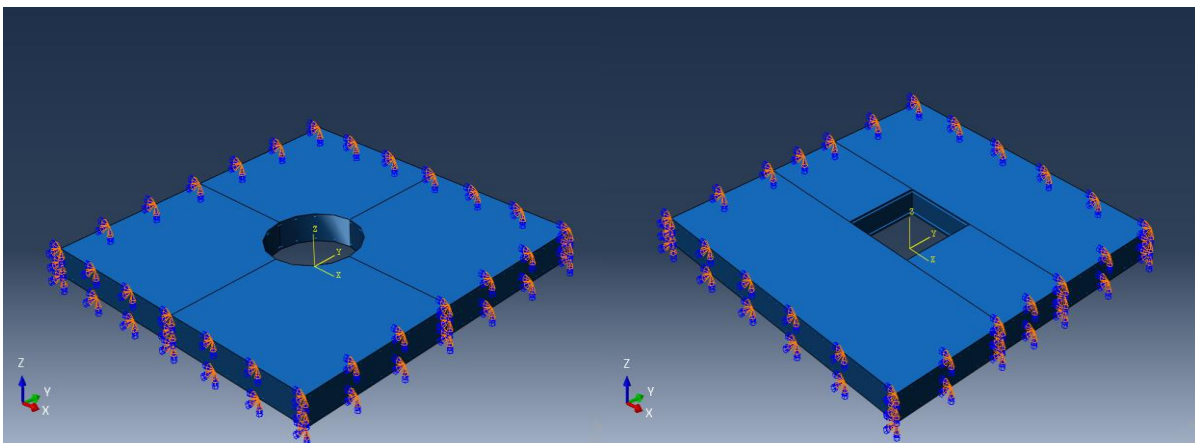
از منحنی تنش-کرنش مربوط به فولاد با تنش تسلیم ۴۰۰ Mpa برای مدل سازی آرماتور فولادی استفاده می شود. مشخصات مصالح آرماتور فولادی ورودی به نرم افزار در جدول ۵ ارائه شده است.

۳-۲- شبیه سازی بارگذاری انفجار و شرایط مرزی

در این مطالعه با توجه به نمونه صحت سنجی [۶] و همچنین اضافه



شکل ۵- نحوه اعمال بار انفجار



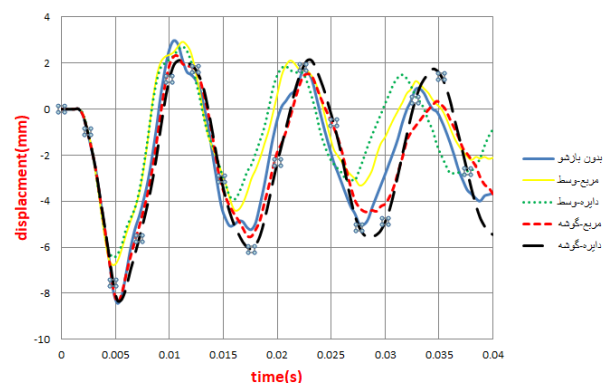
شکل ۶- شرایط مرزی و تکیه گاه های نمونه

۳- بررسی نتایج

برای تحلیل مدل‌ها از تحلیلگر صریح دینامیکی^۱ استفاده شده است. از این تحلیلگر برای تحلیل دینامیکی مدل در زمان بسیار اندک استفاده می‌گردد [۱۳]. با استناد به تحقیقات گذشته [۴] و [۶] در طی تحلیل رفتار دال برای مدت ۰/۰۴ ثانیه ثبت گردیده است. همچنین از آنجایی که هدف، جابجایی حداکثر می‌باشد با توجه به شکل ۷ این میزان می‌تواند مقداری بین یک (محیط کاملاً آسیب دیده) و صفر (محیط کاملاً سالم) داشته باشد.

۳-۱-۱- بررسی اثر شکل و موقعیت بازشوها در دال بتنی

۳-۱-۱-۱- بررسی میزان جابجایی در دال‌های مورد مطالعه در این بخش با اضافه کردن بازشو به ادامه‌ی بررسی می‌پردازیم. در ابتدا بازشو به شکل دایره و مربع با مساحت یکسان تعبیه شد، به گونه‌ای که مساحت بازشوها ۲۵٪ مساحت کل دال می‌باشد. سپس موقعیت قرارگیری بازشوها در دو حالت شامل: بازشو در مرکز دال و بازشو در گوشه دال مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش ۵ نمونه دال با شکل و موقعیت‌های مختلف بررسی شده است. نمودار حداکثر جابجایی دال در شکل ۷ و خلاصه نتایج در جدول ۶ مشاهده می‌شود.

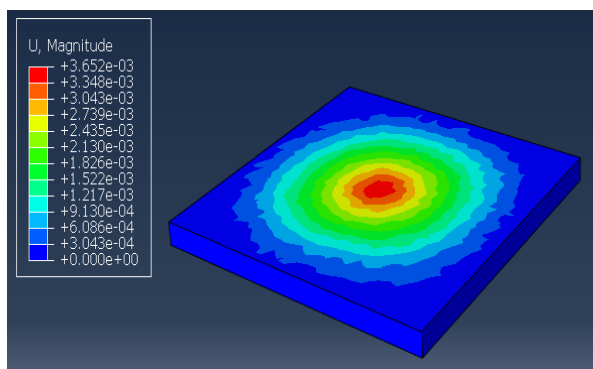


شکل ۷- نمودار تاریخچه زمانی جابجایی دال

با توجه به شکل ۸ که نمایانگر کانتور جابجایی برای دال بدون بازشو می‌باشد، مشاهده می‌شود که حداکثر جابجایی در مرکز دال اتفاق می‌افتد. بنابراین با تعبیه بازشو در مرکز دال انتظار می‌رود که تغییر مکان دال نیز کاهش پیدا کند. مقایسه اشکال و جداول این بخش نشان می‌دهد که محل قرارگیری بازشو بر روی جابجایی دال تأثیر گذار می‌باشد.

جدول ۶- خلاصه نتایج حداکثر جابجایی دال‌ها با شکل و

شماره	شکل - موقعیت بازشو	موقعیت‌های مختلف	
		حداکثر جابجایی (میلی متر)	درصد جابجایی نسبت به حالت بدون بازشو
۱	بدون بازشو	۸/۴۳	-
۲	دایره - وسط	۶/۴۳	٪۳۱/۱۰
۳	مربع - وسط	۶/۷۷	٪۲۴/۵۱
۴	دایره - گوشه	۸/۳۱	٪۱/۴۴
۵	مربع - گوشه	۸/۳۷	٪۰/۷۱



شکل ۸- کانتور جابجایی برای دال بدون بازشو

در این پژوهش در حالتی که بازشو در قسمت مرکزی دال قرار گیرد، جابجایی کمتری نسبت به حالتی که بازشو در قسمت گوشه‌ی دال قرار گیرد، به وجود می‌آورد. همچنین از مقایسه بین دو حالت بازشو مربعی و دایره‌ای این نتیجه حاصل می‌شود که: بازشو دایره‌ای دارای عملکرد مطلوب تری نسبت به بازشو مربعی می‌باشد. بنابراین توصیه می‌شود که برای ایجاد بازشو در دال از بازشوی دایره‌ای در نواحی مرکزی دال استفاده شود.

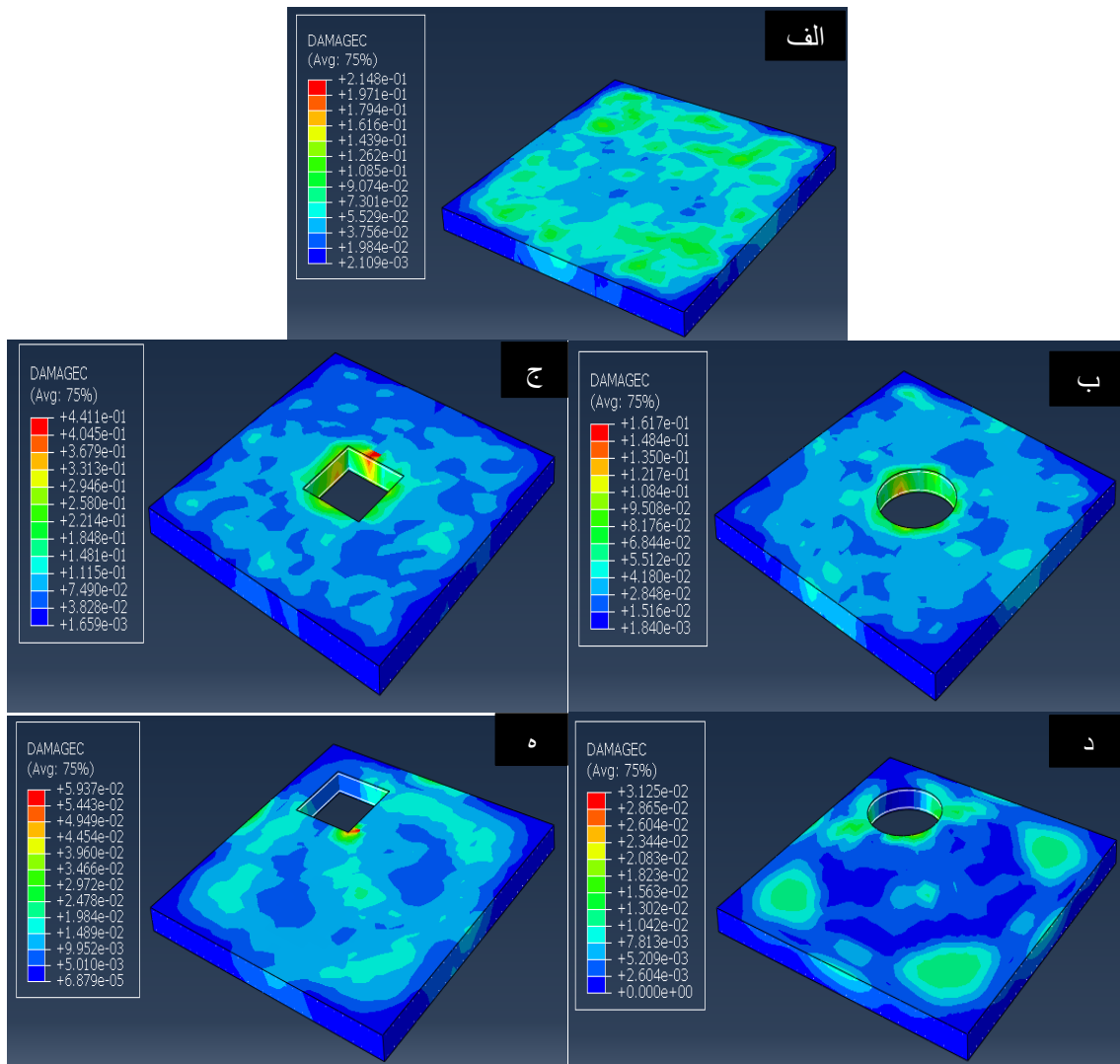
۳-۱-۲- بررسی میزان آسیب فشاری در دال‌های مورد مطالعه

آسیب (damage): روشی که برای بررسی میزان آسیب دال‌های بتنی بکارگرفته شده است، بر مبنای استفاده از مدل Concrete Damaged Plasticity در نرم افزار ABAQUS می‌باشد. مدل بتن آسیب دیده پلاستیک (CDP) مدل توانمندی است که برای بار-گذاری های گوناگون کاربرد دارد و با بیان رفتار مجزای بتن در فشار و کشش رفتار این ماده را به صورت واقعی تر بیان می‌کند. این مدل بر پایه‌ی یک مدل خمیری آسیب دیدگی می‌باشد که بر اساس

¹Dynamic Explicit

کارهای لوبلینز [۱۴] در سال ۱۹۸۹ ارائه شد و توسط لی و فنوز^۱ [۱۵] در سال ۱۹۹۸ اصلاح و تکمیل شد که تمام حالت‌های آسیب توسط یک متغیر عددی به نام خسارت^۲ بیان می‌شود [۱۶]. در این مدل برای این که نرم افزار پارامترهای آسیب را به‌عنوان خروجی ارائه نماید، بایستی در معرفی کردن مشخصات مکانیکی بتن از مشخصات Concrete و Concrete Damage Compression و Damage Tension استفاده نمود. پارامتری که در خروجی تخریب توسط نرم افزار ارائه می‌شود، در واقع متغیری است به نام dc در فشار و dt در کشش که می‌تواند مقداری بین صفر و یک داشته باشد. صفر بیانگر محیط کاملاً سالم و یک بیانگر محیط کاملاً آسیب دیده می‌باشد. معمولاً مقدار آسیب را جهت جلوگیری از

ناپایداری‌های عددی نرم افزار بیش از ۰/۹۹ گزارش نمی‌نماید. مقدار آسیب دال‌های مدل‌سازی شده در اشکال زیر آمده است. از آنجایی که مقدار نهایی آسیب فشاری وارد شده در نرم افزار ۰/۹۸۷ می‌باشد در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود که حداکثر مقدار آسیب به مقدار ۰/۹۸۷ هنوز نرسیده‌است که این امر نشان‌دهنده‌ی این است که آسیب فشاری چندان در دال‌ها ایجاد نشده‌است. با توجه به شکل ۹ و جدول ۷ که نمایش‌دهنده‌ی میزان آسیب برای ۵ دال موردنظر می‌باشد، مشاهده می‌شود که از بین این ۵ نمونه بیشترین میزان آسیب فشاری مربوط به دال حاوی بازشو مربعی در گوشه و کمترین میزان آسیب فشاری مربوط به دال با بازشو دایره‌ای در وسط می‌باشد.



شکل ۹- کانتور آسیب فشاری برای ۵ نمونه دال، (الف) بدون بازشو، (ب) بازشو دایره در وسط دال، (ج) بازشو مربع در وسط دال، (د) بازشو دایره در گوشه دال، (ه) بازشو مربع در گوشه دال

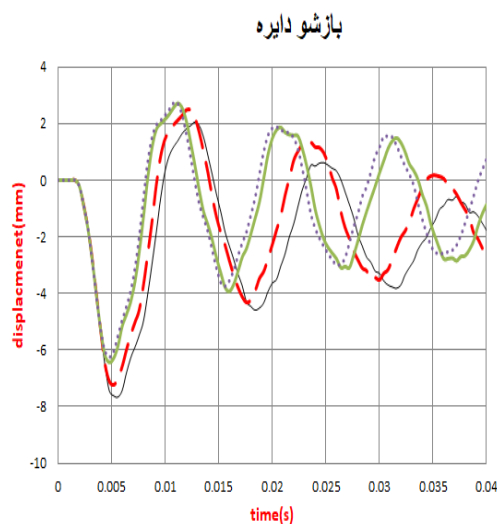
² Damage

¹ Lee and Fenves

مقاومت فشاری ۲۰، ۲۵، ۴۰ و ۴۵ مگاپاسکال استفاده شده است. در این بخش در تمامی نمونه‌ها از بازشو دایره و مربعی استفاده می‌شود اما با توجه به نتایج بخش قبل از بهترین حالت موقعیت دال یعنی زمانی که بازشو در مرکز دال قرار می‌گیرد، استفاده می‌کنیم تا به بهبود عملکرد دال برسیم.

۳-۲-۱- بررسی میزان جابجایی در دال‌های مورد مطالعه

نمودار حداکثر جابجایی دال برای دو حالت بازشو مربع و دایره در مرکز دال در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. همچنین شکل ۱۱ نمودار مقایسه حداکثر جابجایی ایجاد شده را برای ۵ دال مذکور نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است دال شماره ۲ و ۳ همان دال‌های بخش قبل می‌باشند.

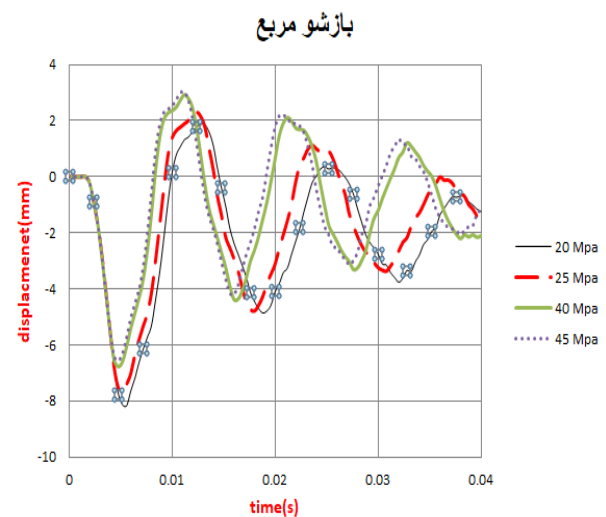


جدول ۷- نتایج حداکثر آسیب فشاری دال‌ها با شکل و موقعیت - های مختلف

نمونه دال	شکل - موقعیت بازشو	میزان حداکثر آسیب فشاری (%)
الف	بدون بازشو	۲۱/۴۸
ب	دایره - وسط	۱۶/۱۷
ج	مربع - وسط	۴۴/۱۱
د	دایره - گوشه	۳۱/۲۵
ه	مربع - گوشه	۵۹/۳۷

۳-۲-۲- بررسی اثر مقاومت فشاری بتن در دال بتنی حاوی بازشو

در این قسمت برای بررسی اثر مقاومت فشاری بتن (f_c) از ۴

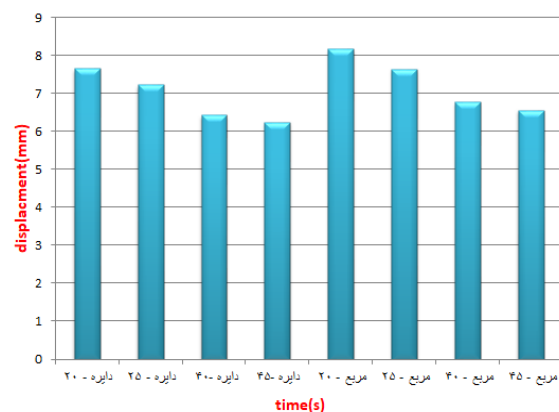


شکل ۱۰- نمودار حداکثر جابجایی دال برای دو حالت بازشو مربع و دایره

باتوجه به نتایج فوق، هرچقدر مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد، تغییر مکان کاهش می‌یابد به گونه‌ای که با افزایش مقاومت فشاری از ۲۰ مگاپاسکال به ۴۵ مگاپاسکال، شاهد ۲۳٪ کاهش تغییر مکان هستیم. همین‌طور در این بخش نیز مانند بخش قبلی مشاهده می‌شود که در صورت افزایش و کاهش مقاومت فشاری، همچنان دال با بازشوی دایره‌ای عملکرد بهتری نسبت به دال با بازشو مربعی دارد.

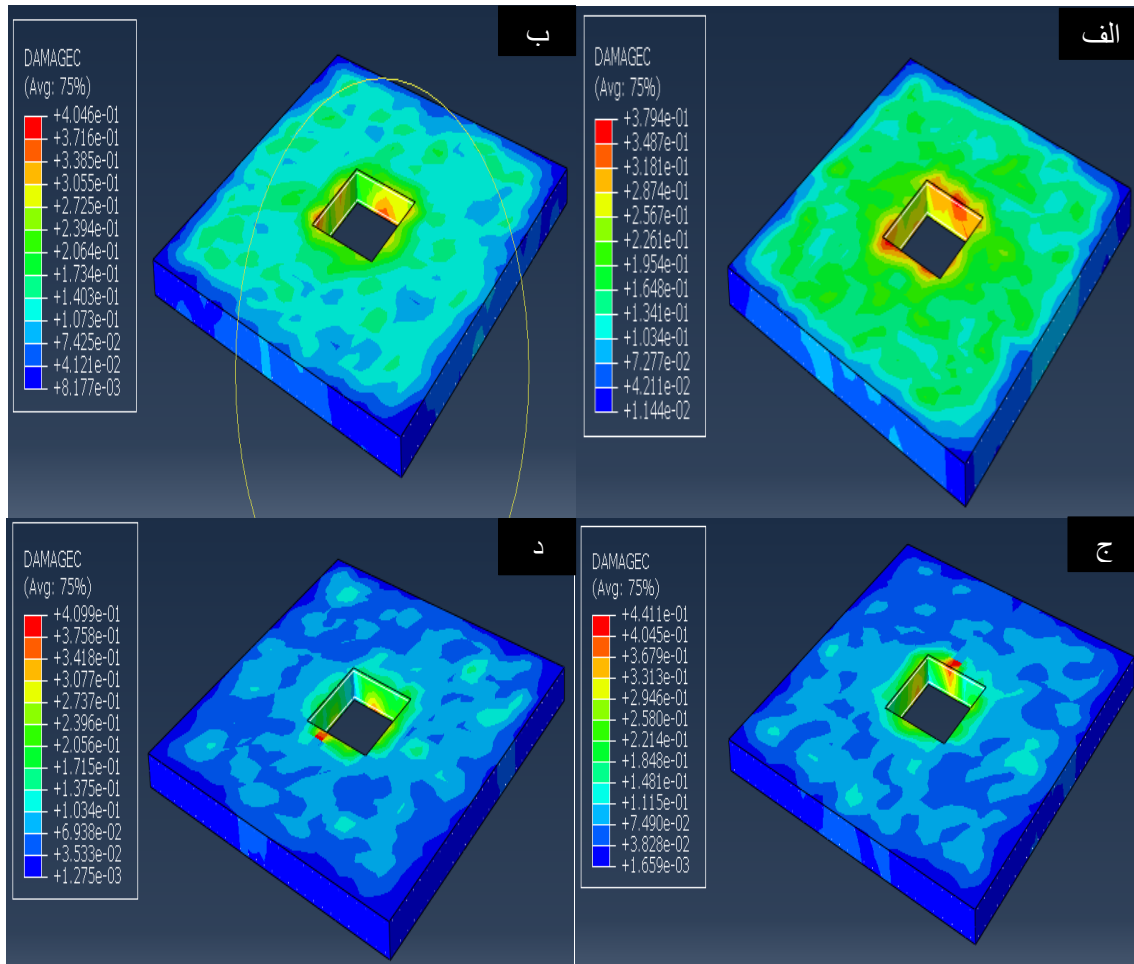
۳-۲-۳- بررسی میزان آسیب فشاری در دال‌های مورد مطالعه

در این قسمت برای بررسی تأثیر مقاومت فشاری روی میزان آسیب فشاری دال‌ها، ۴ نمونه دال حاوی بازشو مربعی با ۴ مقاومت فشاری



شکل ۱۱- نمودار مقایسه حداکثر جابجایی دال‌ها با مقاومت فشاری مختلف

گوناگون ۲۰، ۲۵، ۴۰ و ۴۵ مگاپاسکال در شکل ۱۲ آورده شده است. مشاهده می شود که هرچه مقاومت فشاری بتن افزایش می یابد، میزان آسیب کاهش یافته به طوری که بیشترین آسیب مربوط به دال با مقاومت فشاری ۲۰ مگاپاسکال است که به سطح وسیع تری از دال



شکل ۱۲- کانتور آسیب فشاری برای ۴ نمونه دال، (الف) مقاومت فشاری ۲۰ مگاپاسکال، (ب) مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال (ج) مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال، (د) مقاومت فشاری ۴۵ مگاپاسکال

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار دال های بتنی با حضور بازشو تحت بار انفجاری مورد مطالعه قرار گرفت و تحلیل مدل ها توسط نرم افزار المان محدود Abaqus صورت پذیرفت. بدین صورت که دو پارامتر حداکثر جابجایی و میزان آسیب بررسی گردید. نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

- از بررسی نتایج بدست آمده می توان نتیجه گیری نمود که محل قرارگیری بازشو بر روی جابجایی دال تأثیرگذار می باشد و در حالی که بازشو در قسمت مرکزی دال قرار گیرد، جابجایی

جدول ۸- نتایج حداکثر آسیب فشاری برای دال های حاوی بازشو مربع با مقاومت فشاری مختلف

نمونه دال	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)	میزان حداکثر آسیب فشاری (%)
الف	۲۰	۳۷/۹۴
ب	۲۵	۴۰/۴۶
ج	۴۰	۴۴/۱۱
د	۴۵	۴۰/۹۹

“Experimental and numerical study on the dynamic response of RC slabs under blast loading,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 66, pp. 120-129, 2016.

[5] Abdollahi.S.M, Ranjbara.M.M, Ilbegianb.S, “Shear Capacity of Reinforced Concrete Flat Slabs Made with High-strength Concrete: A Numerical Study of the Effect of Size, Location, and Shape of the Opening,” *International Journal of Engineering*, Vol.30, No.2, pp.162-171, 2017.

[6] Seifollahi.H, and Morshed.R, “Behavior of Reinforced Concrete Slabs against the Blast Wave,” *Amirkabir J. Civil Eng*, vol. 49, pp. 687-696, 2018.

[7] jome manzari.R, and Shahabian Moghaddam.F, “A Survey of the Effect of Opening and Stiffener on Dynamic Response of FGM Plates under Blast Loads,” *journal of structure & steel*, 13 (26), pp.17-32, 2019.

[8] Mostofinejad.D, Jafarian.N, Naderi.A, Mostofinejad.A.M, and Salehi.M, “Effects of openings on the punching shear strength of reinforced concrete slabs,” *Structures*, Vol.25, pp.760-773, 2020.

[9] Kumar. V, Kartik. K.V, and Iqbal. M.A, “Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading,” *Engineering Structures*, vol. 206, 110125, 2020.

[10] Khajehdehi.R, Panahshahi.N, “Effect of openings on in-plane structural behavior of reinforced concrete floor slabs,” *Journal of Building Engineering*, Vol.7, pp.1-11, 2016.

[11] Popovics. S, “A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol.3, No.5, pp. 583-599, 1973.

[12] Blarbi. A, zhang. L, and hsu. T, “constitutive laws of reinforced concrete membrane elements,” *Eleventh Word Conference on Earthquake Engineering*, 1996.

[13] Karlson. H, and Inc. S, “ABAQUS/Explicit User’s Manual, Version 6.9,” V I & II, 2000.

[14] Lubliner.J, “Plasticity Theory,” *University of California, Berkeley*, 1989.

[15] Lee.J, and Feneves.G, “Plastic Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures,” *Structural Engineering*, pp.892-900, 1998.

[16] Ghalenoie.M, and Shayanfar.M, “Behavioral study of stress-strain equations of uniaxial concrete,” *International Conference of Civil Engineering*, 2003.

کمتری نسبت به حالتی که بازشو در قسمت گوشه‌ی دال قرار گیرد، به وجود می‌آورد، که به دلیل افزایش برش در گوشه‌های دال می‌باشد. بنابراین توصیه می‌شود حداقل امکان بازشو در مرکز دال تعبیه شود.

- باتوجه به اینکه بازشو به دو شکل مختلف دایره‌ای و مربعی با مساحت یکسان مدل‌سازی شده است، مشاهده می‌شود که بازشو دایره‌ای عملکرد بهتری نسبت به بازشو مربعی دارد و میزان آسیب در دال حاوی بازشو دایره نسبت به دال حاوی بازشو مربعی کمتر است، که بدلیل بیشتر بودن تمرکز تنش در گوشه‌های بازشوهای مربعی می‌باشد.

- با مشاهده کانتور آسیب از میان دال‌ها با شکل و موقعیت گوناگون بازشو دیده می‌شود در حالتی که بازشو به صورت دایره ای در مرکز دال قرار می‌گیرد مقدار و سطح کمتری از دال دچار آسیب می‌گردد در صورتی که بیشترین مقدار و مساحت آسیب برای دال با بازشوی مربعی در گوشه است.

- هرچقدر مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد، تغییر مکان حاصل کاهش می‌یابد به گونه ای که با افزایش مقاومت فشاری از ۲۰ مگاپاسکال به ۴۵ مگاپاسکال، شاهد ۲۳٪ کاهش تغییر مکان هستیم.

- حداکثر مقدار آسیب در تمام حالت‌ها در اطراف بازشو اتفاق افتاده است.

۵- مراجع

[1] Ruggiero.A, Bonora.N, Curiale.G, De Muro.S, Iannitti.G, Marfia.S, Sacco.E, Scafati.S, and Testa.G, “Full scale experimental tests and numerical model validation of reinforced concrete slab subjected to direct contact explosion,” *International Journal of Impact Engineering*, 2019.

[2] Pedro, and Silva, “Improving the blast resistance capacity of RC slabs with innovative,” *Composites Part B* 38/ 523-534, 2007.

[3] Tai.Y.S, Chu.T. L, Hu. H.T, and Wu.J.Y., “Dynamic Response of a Reinforced Concrete Slab subjected to Air Blast Load,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 56, pp. 140-147, 2011.

[4] Yao.S, Zhang.D, Chen.X, Lu.F, and Wang.W,

Evaluation of the behavior of concrete slabs with opening under explosive loading

Mahshid Ebrahimi *

M.Sc student, Department of Civil Engineering, Deylaman Institute of Higher Education, Gilan, Iran.

Benyamin Ganjeh Khosravi

Faculty member of Civil Engineering Department, Deylaman Institute of Higher Education, Gilan, Iran.

Abstract

Looking at the terrorist incidents in recent years, the protection of buildings under explosions is not only a concern of military institutions but also an important concern for design engineers. Due to the importance of the slabs during the explosion in the building, their correct design according to technical and security standards, especially passive defense standards, is essential. In designing slabs, it is necessary to consider openings for various purposes, including the passage of pipes, installation and electrical ducts, and elevators. In general, opening changes the behavior of the slabs. Therefore, in this study, the behavior of the slabs with the opening was dynamically analyzed by ABAQUS and to achieve the optimal state, the effect of the shape and position of the opening and also the effect of increasing the compressive strength of concrete on the performance of the slab containing the opening was investigated. In this study, the dimensions and thickness of the slab, the explosive load and the abutment conditions were considered the same and the maximum displacement and damage were investigated. The results show that circular openings have better performance than square openings and when the opening is in center, it creates less displacement than the opening is in corner. In addition, in the slab with circle opening in center, less amount and surface is damaged. Therefore, it is recommended to be located the opening in the central areas of the slab. The results also show that as the compressive strength increases, the displacement decreases.

Keywords: reinforced concrete slabs, blast loading, opening, maximum displacement, passive defense.

* Corresponding Author: benyamin.g510@yahoo.com