

ارزیابی و مقایسه‌ی مدل‌های رفتاری بتن در شبیه‌سازی عددی دال‌های بتن مسلح تحت بار انفجار

پویا حسونند *

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی (ره)، بروجرد، ایران.

مجتبی حسینی

استاد گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.

میلاذ الماسی

کارشناس ارشد مهندسی عمران - سازه، موسسه آموزش عالی آفرینش، بروجرد، ایران.

چکیده

شبیه‌سازی رفتار دال‌های بتن مسلح به وسیله نرم‌افزارهای عددی از جمله راه‌های کم‌هزینه برای تحلیل و طراحی آنهاست. در تحقیق حاضر با تمرکز بر روی عضو سازه‌ای دال بتن مسلح معمولی تحت بار انفجار و انجام شبیه‌سازی‌های متعدد به مقایسه‌ی مدل‌ها پرداخته شد. از نرم‌افزار Ls dyna نسخه‌ی R 4.2 و مدل‌های رفتاری توانمند، پرکاربرد و در دسترس بتن Concrete damage R3، HJC، CSCM و Winfrith برای شبیه‌سازی استفاده شد. با توجه به آزمایش‌های موجود و اطلاعات ارائه شده در آنها، بار انفجار به وسیله‌ی روش نمودار فشار-زمان بر دال اعمال شد و نتایج بیشینه خیز دال حاصل از شبیه‌سازی رفتار دال با مدل‌های مصالح نام‌برده شده با هم مقایسه شدند. مدل Concrete damage R3 نسبت به سایر مدل‌ها نتایج دقیق‌تری را ارائه کرد. در این تحقیق دقت مدل‌ها به صورت کمی و بر اساس خطای نسبی (Percent Relative Error) میان نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی واقعی ارزیابی شده است. مدل HJC کمترین زمان را برای محاسبات نیاز داشت اما از نظر دقت بعد از مدل Concrete damage R3 قرار گرفت، البته لازم بود تمام شاخصهای مدل از جمله معادله‌ی حالت توسط کاربر به مدل معرفی شود. مدل CSCM دقت کمتری از مدل HJC داشت اما به کمترین شاخصهای ورودی برای معرفی به نرم‌افزار نیاز داشت، البته بیشترین زمان محاسبات مربوط به همین مدل بود. مدل Winfrith کمترین دقت را داشت.

واژه‌های کلیدی: دال بتن مسلح، بتن با مقاومت معمولی، مدل رفتاری مصالح، بار انفجار شبیه‌سازی عددی.

* نویسنده مسئول: Pouya.hassanvand@abru.ac.ir

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر، طراحی سازه‌ها در برابر ضربه و انفجار استفاده گسترده‌تری پیدا کرده است و تنها محدود به سازه‌های خاص و زیرزمینی با مقاصد نظامی نمی‌شود. علاوه بر نیاز به طراحی ساختمان‌های خاص در برابر تهدیدهای نظامی، لازم است برخی از ساختمان‌های با اهمیت نیز در برابر بارهای ضربه و انفجارهای اتفاقی و تروریستی ایمن‌سازی شوند. برای مثال اماکن زیارتی، مساجد و حسینیه‌ها، مراکز مدیریتی و حیاتی، مترو، بیمارستان‌ها، مراکز تجمع جمعیت، ورزشگاه‌ها، ساختمان‌های اطراف فرودگاه‌ها، نیروگاه‌ها، پمپ بنزین‌ها و ... از جمله ساختمان‌های در معرض بارهای انفجاری غیر نظامی هستند که سابقه وقوع انفجار در این گونه اماکن در کشورمان ایران وجود داشته است. علاوه بر دلایل فوق وضعیت خاص کشورمان و تهدیدهای روزافزون علیه ایران اسلامی، متخصصان صنعت ساخت و ساز را موظف به مطالعه و تحقیق در مورد ایمن‌سازی سازه‌ها در برابر ضربه و انفجار می‌کند. دال‌ها به عنوان اعضای که بیشترین سطح تماس را با موج انفجار دارند (دال بتن مسلح افقی در معرض بار انفجار مستقیم در فضای آزاد) هم تأثیر بسیار زیادی از بار انفجار می‌پذیرند و هم طراحی مناسب آنها نقش تعیین‌کننده‌ای در جلوگیری از سرایت آثار انفجار به سایر قسمت‌های ساختمان دارد، لذا تحلیل و طراحی مناسب آنها بسیار حائز اهمیت است.

رفتار مصالح در بارگذاری‌های انفجاری و ضربه و نفوذ می‌تواند در مقایسه با بارگذاری‌های استاتیکی و یا بارگذاری‌های دینامیکی دیگر مانند زلزله، بسیار متفاوت باشد. زیرا از طرفی شدت بسیار زیاد و مدت تداوم بسیار کوتاه بارگذاری‌های انفجاری و ضربه و نفوذ باعث ایجاد نرخ کرنش‌های از مرتبه بالا در ماده می‌شود و از طرف دیگر این نوع بارگذاری‌ها منجر به ایجاد فشارهای هیدروستاتیک و کرنش‌های حجمی قابل توجه در ماده می‌گردد، به طوری که حتی می‌تواند کرنش‌های حجمی دائمی در ماده ایجاد نماید و در نتیجه چگالی ماده را تغییر دهد. همچنین ماده تحت این نوع بارها دچار کرنش‌های بسیار بزرگ در محدوده‌ی رفتار غیر ارتجاعی می‌شود [۱].

مدل‌های رفتاری متعددی برای توصیف رفتار بتن تحت انواع

بارگذاری‌ها در نرم‌افزارهای مختلف معرفی شده‌اند. در شرایط بارگذاری انفجار نیاز به مدل‌هایی است که بتوانند اثرهایی مانند فشارهای هیدروستاتیکی بالا، نرخ کرنش‌های بالا و تغییرشکل‌های زیاد را در نظر بگیرند. مدل‌های رفتاری متنوعی برای شبیه‌سازی رفتار بتن تحت بار دینامیکی وجود دارد. مدل‌های رفتاری مختلف کاربردها و توانایی‌های مختلفی دارند که هر یک بسته به شرایط سازه‌ای و بارگذاری مسئله می‌تواند نتایج مناسبی ارائه بدهند. شناسایی مدل‌های رفتاری مناسب برای شبیه‌سازی رفتار دال بتن مسلح تحت بار انفجار هدف این تحقیق است.

تحقیق‌های متعددی بر روی توانایی مدل‌های مصالح در شبیه‌سازی مسائل انفجار و ضربه و نفوذ و مقایسه‌ی آنها انجام شده است، که از اهم تحقیقات صورت گرفته تا امروز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

یوکای وو^۱ و همکاران [۲] در مورد توانایی سه مدل معروف Winfrith، Concrete damage R3 و CSCM در شبیه‌سازی رفتار بتن تحت بار ضربه و انفجار تحقیق کردند. آنها رفتار تک المان بتنی تحت بار محوری فشاری و کششی، سه محوری فشاری و رفتار استوانه‌ی بتنی تحت بار سه محوری فشاری را با این سه مدل شبیه‌سازی کردند. سپس یک ستون بتنی تحت بار انفجار و یک دال تحت بار ضربه را شبیه‌سازی کرد. جمع‌بندی آنها این بود که مدل Concrete damage R3 محدودیت خاصی ندارد. مدل Winfrith نمی‌تواند اثر محصورکنندگی خاموت‌ها و اف‌آرپی بر رفتار بتن را به خوبی مدل کند. مدل CSCM برای بارهای جانبی کم (محصورشدگی کم) مناسب است.

ربکا برانون^۲ و همکاران [۳] چهار مدل پلاستیسیته-آسیب بتن Winfrith، Concrete damage R3، BF1، RHT و CSCM را برای نفوذ پرتابه در بتن پر مقاومت بررسی کردند. نشان دادند که مدل‌های مذکور دقت قابل قبولی در برآورد سرعت باقی‌مانده‌ی پرتابه دارند.

واسودوان^۳ [۴] رفتار ۴ دال بتنی معمولی و پرمقاومت که با میلگرد معمولی و وانادیومی مسلح شده بودند را تحت بار انفجار با دو مدل Winfrith و Concrete damage R3 شبیه‌سازی کرد. در شبیه‌سازی بتن معمولی با میلگرد معمولی و وانادیومی برای هر دو

³ Vasudevan¹ Youcai Wu² Rebecca M. Brannon

هستند؛ بنابراین، حتی محدودیت‌ها و ساده‌سازی‌های کوچک در روش، منجر به تنوع بیشتری در نتایج می‌شوند. در مجموع، شبیه‌سازی‌های اجزای محدود، در مقایسه با آزمایش‌های میدانی پرهزینه، به‌عنوانیک روش ارزشمند و قابل دوام برای بررسی پاسخ دال‌های بتن مسلح اثبات شدند.

آسیم و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۴ به بررسی عددی رفتار پانل‌های ساندویچی بتن مسلح (RCSP) تحت بار انفجار پرداختند و هدف توسعه یک شبیه‌سازی عددی دقیق با استفاده از تحلیل المان محدود (FEA) در نرم‌افزار Abaqus بود تا رفتار این پانل‌ها تحت بارهای انفجاری مورد ارزیابی قرار گیرد و محدودیت‌های تحقیقات تجربی غلبه شود. مدل‌سازی انفجار با استفاده از مدل CONWEP و حل‌کننده دینامیک صریح صورت گرفت و برای بتن از مدل پلاستیسیته آسیب بتن استفاده شد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها با ارزیابی‌های کیفی آسیب (منحنی‌های آسیب‌پذیری) محققین دیگر مقایسه شد و دقت بسیار بالایی نشان داد، به طوری که میانگین کلی تفاوت بین آسیب پیش‌بینی شده و واقعی تنها ۱/۱۲٪ بود.

در سال ۲۰۲۵ کمار و همکاران [۱۰] به بررسی تجربی و عددی دال‌های بتن مسلح تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. نتایج مطالعات شبیه‌سازی‌های اجزای محدود که با استفاده از مدل‌های HJC و پلاستیسیته فلزی انجام شدند، آسیب‌های ایجادشده در صفحات هدف را بازتولید کردند. این شبیه‌سازی‌ها قادر به پیش‌بینی کننده شدن ورقه‌ورقه شدن بتن (spalling/scabbing) و تشکیل حفره (crater) هستند. بزرگی حداکثر فشار انفجار بر روی سطح یک صفحه با افزایش میزان ماده منفجره افزایش یافت، درحالی‌که با افزایش فاصله ایمن (standoff distance) کاهش پیدا کرد.

در تحقیق حاضر با تمرکز بر روی عضو سازه‌ای دال بتن مسلح معمولی تحت بار انفجار و انجام شبیه‌سازی‌های متعدد به مقایسه‌ی مدل‌ها پرداخته شد. دال‌های با ابعاد مختلف، فاصله‌ی مقیاس شده-ی مختلف، بتن معمولی با مقاومت فشاری مختلف و... با چهار مدل بتن پر کاربرد و در دسترس شبیه‌سازی شد. از نرم‌افزار ال‌اس‌داینا نسخه‌ی R 4.2^۲ و مدل‌های مصالح موجود در آن برای شبیه‌سازی

مدل نتایج خوبی حاصل شد، اما برای بتن پرمقاومت با میلگرد معمولی و وانادیومی مدل Winfrith نتایج بهتری داشت و مدل Concrete damage R3 خیز کمتری نسبت به آزمایش محاسبه کرده بود. لذا به نظر او مدل Winfrith نتایج بهتری را نسبت به مدل Concrete damage R3 ارائه می‌کند و برای بازه‌ی وسیع‌تری از بتن کارایی دارد و در عین حال توانایی نشان دادن ترک را هم دارد.

پولانکو^۱ و همکاران [۵] ضمن بررسی نقاط ضعف و قدرت مدل HJC با معرفی نسخه‌ی اصلاح‌شده‌ی این مدل به نام MHJC ضمن بررسی نسخه‌ی اصلاح شده به شبیه‌سازی مسائل ضربه و نفوذ می‌پردازد.

در سال ۲۰۱۶ یائو و همکاران [۶] 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.

در سال ۲۰۲۰ جان و همکاران [۷] به بررسی شبیه‌سازی عددی دال بتنی مسلح تحت بارگذاری انفجاری و ارزیابی آسیب سازه‌ای پرداختند. در این پژوهش از الگوریتم کوپلینگ سیال-سازه برای شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی سازه و رفتار شکست دال بتن مسلح تحت تأثیر انفجار TNT استفاده شده است. این روش شبیه‌سازی عددی، روند تخریب دال بتن مسلح تحت انفجار TNT، شامل شکست و فروریختن سازه بتن مسلح و فرایند تغییر شکل شبکه آرماتور، را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. نتایج مربوط به آسیب سازه‌ای بتن مسلح، شامل شعاع فروریزش و خیز (deflection)، با پدیده و داده‌های تجربی انطباق بالایی دارند. این امر اثبات می‌کند که روش مدل‌سازی و الگوریتم‌های به‌کارگرفته‌شده، امکان‌پذیر و قابل اعتماد هستند.

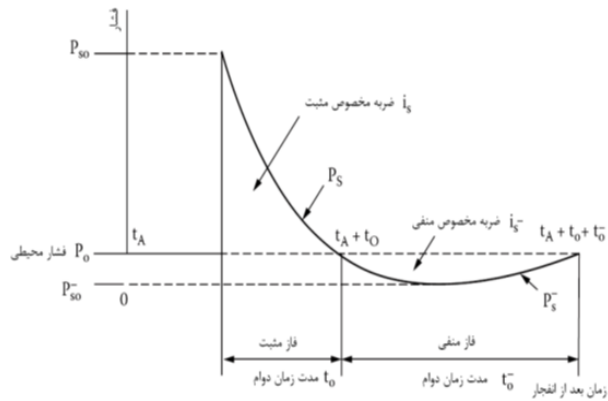
آگوستو و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۱ مطالعه‌ای درخصوص تحلیل المان محدود دال‌های بتنی آزمایش شده تحت اثر انفجار هوا انجام دادند و پس از مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با مجموعه‌ای از آزمایش‌های انفجار مشخص گردید که جابجایی‌ها در اثر بار انفجار در مرکز دال نسبت به شاخص‌های شاخصورودی حساس

² Ls-dyna 971 R.4.2

¹ Polanco

جان افراد می‌شود [۶-۸].

شکل (۱) منحنی فشار - زمان موج انفجار را برای انفجار در محیط آزاد نشان می‌دهد. این منحنی به دو فاز مثبت و منفی تقسیم می‌شود که اغلب در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار فاز منفی از اهمیت کمتری برخوردار است.



شکل ۱- تاریخچه زمانی فشار ناشی از یک موج انفجاری آزاد در هوا [۱۴]

۲-۲- انتخاب مدل رفتاری

یکی از مسائل اصلی در شبیه‌سازی مسائل ضربه و انفجار، انتخاب مدل‌های رفتاری مناسب برای نشان دادن رفتار پیچیده مصالح تحت این بارهاست. بتن رفتار غیرخطی پیچیده‌ای دارد و نمی‌توان با یک مدل ساده رفتار آن را شبیه‌سازی کرد. مدل‌های رفتاری متعددی برای شبیه‌سازی رفتار بتن تحت تنش‌ها و کرنش‌های متنوع وجود دارند، که بسیاری از این مدل‌ها در نرم‌افزار LS dyna در دسترس هستند. البته بسیاری از مدل‌های بتن موجود در کتابخانه‌ی نرم‌افزار LS dyna نیاز به شاخص‌های متعدد و پیچیده‌ای دارند که تعیین این شاخص‌ها نیاز به انجام آزمایش‌های متعدد دارد و همچنین جزئیات دقیق این شاخص‌ها هم در راهنمای نرم‌افزار به خوبی مورد بحث قرار نگرفته است. اما در برخی از این مدل‌ها، قابلیت تولید خودکار این شاخص‌های پیچیده و متعدد تنها با معرفی برخی مشخصات اصلی و ساده‌ی مصالح بوجود آمده که استفاده از این مدل‌ها را به راحتی ممکن می‌سازد. از بین مدل‌های رفتاری مناسب برای شبیه‌سازی رفتار بتن با توجه به معیارهای زیر مدل‌های Concrete damage R3، Winfrith، HJC، CSCM برای انجام مقایسه‌های دقیق‌تر انتخاب شدند. دلایل اصلی انتخاب مدل‌ها:

استفاده شد و با توجه به آزمایش‌های موجود و اطلاعات ارائه شده در آن‌ها، بار انفجار به وسیله‌ی روش نمودار فشار-زمان بر سازه اعمال شد و مدل‌های مصالح برای شبیه‌سازی رفتار دال تحت بار انفجار با هم مقایسه شدند. نوآوری اصلی تحقیق حاضر در موارد زیر است:

- مقایسه هم‌زمان چهار مدل رفتاری پرکاربرد بتن Concrete Winfrith، HJC، Damage R3، CSCM تحت شرایط مشابه بارگذاری انفجار در یک سازه واقعی (دال بتن مسلح معمولی).
- ارزیابی دقت مدل‌ها با استفاده از داده‌های دو آزمایش مستقل واقعی و بررسی تأثیر عوامل مختلفی مانند فاصله مقیاس شده انفجار، فشار منعکس شده و ایمپالس منعکس شده بر دقت هر مدل.
- تبیین روند تغییر دقت مدل‌ها با تغییر شاخص‌های فیزیکی و هندسی (مانند دوران لبه تکیه‌گاهی و مقیاس انفجار) که در مطالعات گذشته مغفول مانده بود.
- کاربرد روش نمودار فشار-زمان واقعی به جای مدل‌سازی تئوریک Conwep برای اطمینان از دقت اعمال بار انفجار، و بررسی تطبیقی نتایج این دو روش.

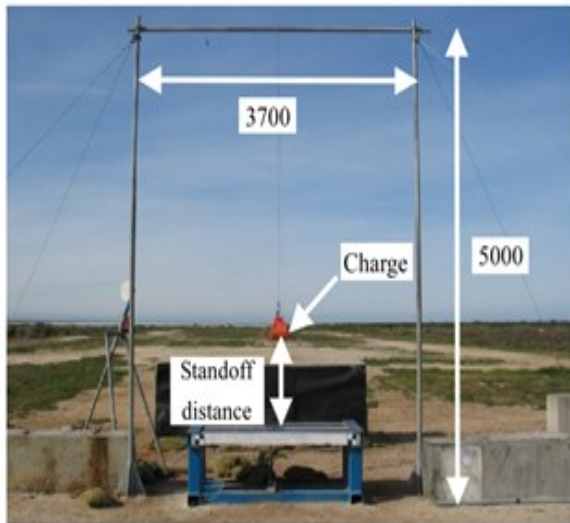
۲- مبانی نظری تحقیق

۲-۱- انفجار

انفجار، آزاد شدن بسیار سریع انرژی به صورت نور، گرما، صوت و موج ضربه‌ای می‌باشد. هنگامی که یک انفجار رخ می‌دهد، انرژی به صورت ناگهانی و در زمان بسیار کوتاه (چند میلی ثانیه) آزاد شده و اثر این آزاد شدن انرژی به صورت تشعشعات حرارتی و انتشار امواج در فضا مشاهده می‌شود.

یکی از عوامل مهم در تخریب سازه امواج ناشی از انفجار هستند که در هوا منتشر می‌شوند. این امواج با سرعتی بیش از سرعت صوت حرکت کرده و تشکیل یک جبهه موج را می‌دهند. هنگامی که جسمی در برابر این جبهه موج قرار گیرد، فشار سطح آن بالا رفته و در یک لحظه بسیار کوتاه این فشار به بیشینه اندازه خود می‌رسد. این افزایش فشار ناشی از موج انفجار می‌تواند بارهایی بسیار بزرگتر از بارهایی که سازه برای آن طراحی شده بر سازه وارد کند و سبب بروز خسارت شدید در سازه و به خطر افتادن

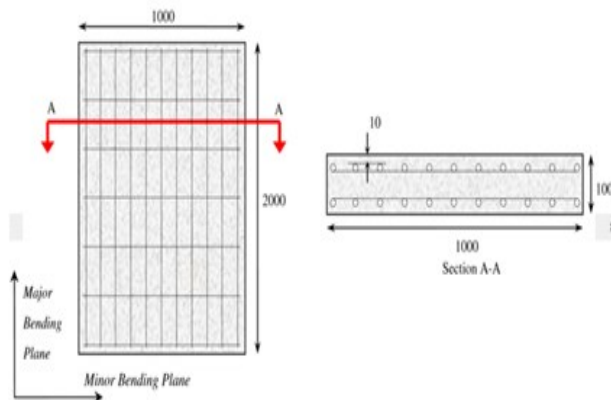
در فاصله‌ی مقیاس شده‌ی انفجار بود. طرح کلی آزمایش مطابق شکل (۲) گزارش شده بود.



شکل ۲- نمای کلی آزمایش (اعداد بر حسب میلیمتر) [۱۵]

۳-۱-۲- طرح و ابعاد و میلگردگذاری دال

تمامی دال‌ها مطابق شکل (۳) با ابعاد $1800 \times 1000 \times 100$ میلی‌متر بودند. از میلگردهای به قطر ۱۰ میلی‌متر که در فاصله‌ی ۱۰ سانتی در راستای اصلی و فاصله‌ی ۲۰ سانتی در راستای فرعی از هم قرار داشتند برای مسلح کردن بتن استفاده شده بود.



شکل ۳- ابعاد دال و میلگردگذاری (اعداد بر حسب میلیمتر) [۱۵]

۳-۱-۳- مشخصات مصالح

از بتن با مقاومت فشاری و کششی و مدول یانگ به ترتیب $39/5$ ، $8/2$ و 28300 مگاپاسکال و فولاد با مقاومت تسلیم و مدول الاستیسیته 600 و 200000 مگاپاسکال استفاده شده بود.

- در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش

- توانایی مدل کردن رفتار بتن در کرنش‌های زیاد

- امکان دیدن معادله‌ی حالت

- در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز

- کاربری آنها برای انواع المان‌ها

- کاربرد مدل‌ها در مقالات و متون علمی معتبر برای شرایط

بارگذاری انفجار

۳-۲- انتخاب روش مناسب اعمال بار انفجار

اعمال نمودار فشار-زمان انفجار، روش Conwep، روش ALE، روش ترکیبی و روش SPH از روش‌های اعمال بار انفجار بر سازه هستند که بسته به شرایط مسئله، دقت مورد نیاز، داده‌های در دسترس، توانایی کاربر در مدل‌سازی، توانایی سخت‌افزار، نسخه‌ی نرم‌افزار در دسترس و سقف زمانی انجام پروژه و... هر کدام قابل استفاده هستند. سه روش ALE، ترکیبی و SPH از جمله روش‌های جدید در زمینه‌ی شبیه‌سازی انفجار هستند و منابع کافی و دقیقی برای شبیه‌سازی انفجار با این روش‌ها در دسترس نیست و البته در مورد نقاط ضعف و قوت این روش‌ها بحث‌هایی مطرح است. در این تحقیق برای اینکه مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی و آزمایش از دقت کافی برخوردار باشد نیاز بود تا مقادیر دقیق فشار و ایمپالس منعکس‌شده‌ی گزارش شده در آزمایش بر دال وارد شود. لذا از روش اعمال نمودار فشار-زمان (با توجه به مقادیر فشار و ایمپالس بازتاب گزارش شده در آزمایش‌ها) استفاده شد.

۳- روش تحقیق و مدل‌سازی

۳-۱-۱- آزمایش ۱

از مجموعه آزمایشات انجام شده توسط وو^۱ در این تحقیق از ۴ آزمایش انفجار که بر روی بتن معمولی انجام شده بود استفاده شد، که با توجه به نتایج گزارش شده که در ادامه توضیحات لازم در مورد آنها ذکر می‌شود [۱۵].

۳-۱-۱-۱- مشخصات کلی آزمایش

چهار آزمایش بر روی دال‌های یک‌طرفه با ابعاد و میلگردگذاری و مشخصات مصالح یکسان انجام شد و تفاوت این چهار آزمایش

^۱ Wu

۳-۱-۴- بارگذاری انفجار

با توجه به سازه‌ای که برای نگهداری دال استفاده شده است و با توجه به شدت بار انفجار، دهانه‌ی مفید و باربر دال و شرایط تکیه-گاهی را می‌توان به صورت گیردار فرض کرد.

از ماده‌ی منفجره‌ی استوانه‌ای شکل با نسبت ارتفاع به قطر برابر یک ($\frac{H}{D} = 1$) استفاده شده بود. وزن و فاصله‌ی ماده‌ی منفجره مطابق جدول (۱) گزارش شده بود.

۳-۲- آزمایش ۲

از بین چهار آزمایش اشاره شده در کار واسودوان^۱ [۴] تنها آزمایشی که در آن از دال یک‌طرفه بتن مسلح معمولی (بتن و میلگرد معمولی) استفاده شده بود، برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۱-۵- شرایط مرزی

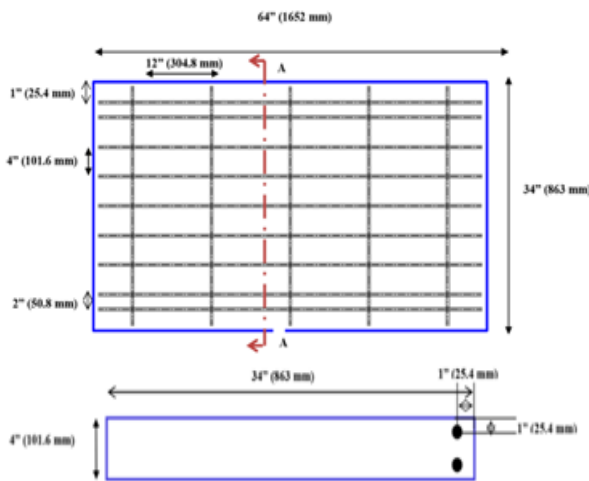
از یک قاب فلزی برای جلوگیری از حرکت قائم دال در نوسانات رفت و برگشتی و کاهش حرکات جانبی دال استفاده شده است.

جدول ۱- بارگذاری انفجار دال‌ها

	NRC1	NRC2	NRC3	NRC4
Explosive Weight (kg)	1.007	8.139	3.440	8.213
Distance to slab surface (m)	3	3	1.4	1.5
Scaled Distance (Metric)	3	1.5	0.93	0.75
Scaled Distance (English Unit)	7.56	3.78	2.34	1.89

۳-۲-۱- مشخصات کلی آزمایش

در این آزمایش با دستگاه شبیه‌ساز انفجار بار یکنواختی به صورت دینامیکی بر سطح دال بتن مسلح معمولی اعمال شد.



شکل ۴- هندسه‌ی دال و میلگردگذاری [۴]

۳-۲-۲- طرح و ابعاد و میلگردگذاری دال

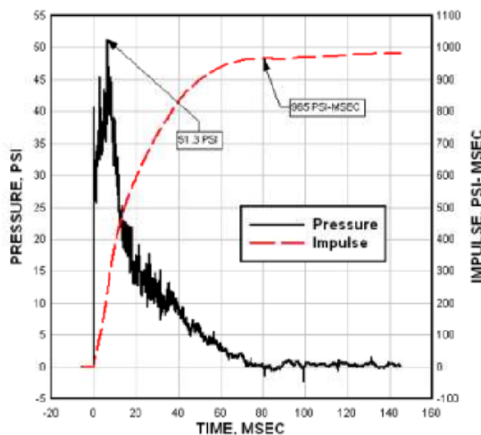
دال مطابق شکل (۴) با ابعاد ۴*۳۴*۶۴ اینچ (۱۶۵۲*۸۶۳*۱۰۱۶ میلی‌متر) مورد آزمایش قرار گرفت. از میلگردهای به قطر $\frac{3}{8}$ اینچ (۱۰ میلی‌متر) که در فاصله‌ی ۴ اینچی (۱۰/۱۶ سانتی) در راستای اصلی و فاصله‌ی ۱۲ اینچی (۳۰/۴۸ سانتی) در راستای فرعی از هم قرار داشتند، برای مسلح کردن بتن استفاده شده بود.

۳-۲-۳- مشخصات مصالح

از بتن با مقاومت فشاری و کششی و مدول یانگ به ترتیب ۲۷/۵۸ و ۳/۲۷ مگاپاسکال و ۲۰/۴۸ گیگاپاسکال و در آزمایش با میلگرد معمولی از فولاد با مقاومت تسلیم و مدول الاستیسیته ۴۷۶ مگاپاسکال و ۲۱۰ گیگاپاسکال استفاده شده بود.

۳-۲-۴- بارگذاری انفجار

بار انفجار توسط دستگاه شبیه‌ساز موج انفجار بر سازه اعمال شد، که مشخصات بار انفجار مطابق شکل (۵) بود.



شکل ۵- نمودار فشار-زمان ثبت شده در آزمایش [۴]

¹ Vasudevan

۳-۳-۲- مش بندی

سعی شد مش بندی به اندازه‌ی کافی ریز باشد تا دقت همه‌ی مدل‌ها در محدوده‌ی قابل قبولی باشد. بنابراین از بین مش بندی‌های و نتایج گزارش شده در شبیه‌سازی‌های سایر محققین ۲۰، ۱۰، ۵، ۲، ۱/۹، ۱/۲۷، ۱، ۰/۶ و ۰/۵ سانتی متری، مش بندی‌های ۱ و ۱/۲۷ سانتی متری انتخاب شدند.

مطابق جدول ۲ از مش بندی یک سانتی متری برای میلگردها و ۱*۱*۱ سانتی متر مکعبی برای دال در آزمایش‌های ۱ و مش بندی ۰/۵ اینچی (۱/۲۷ سانتی متری) برای میلگردها و ۰/۵*۰/۵*۰/۵ اینچ مکعبی برای آزمایش ۲ استفاده شد.

جدول ۲- مشخصات مش‌ها در مش بندی

	Experiment 1	Experiment 2
Rebar	1cm	0.5 inch
Slab	1 x 1 cm ²	0.5 * 0.5 inch ²

۳-۳-۳- داده‌های استفاده شده برای مدل‌های مصالح

۳-۳-۳-۱- داده‌های استفاده شده برای مدل‌های بتن

با توجه به اینکه در آزمایش‌ها تنها اطلاعات محدودی از مشخصات مکانیکی مصالح در دسترس بود، سعی شد تا از حداقل شاخص‌های لازم برای معرفی مدل‌های مصالح استفاده شود. در مورد مدل HJC چون باید تمام شاخص‌های مدل تعریف می‌شد، به غیر از شاخص‌های گزارش شده در آزمایش سایر شاخص‌ها از نزدیک‌ترین مقادیر گزارش شده در سایر متون معتبر استفاده شد. اندازه‌ی بزرگترین دانه در هیچ‌یک از آزمایش‌ها گزارش نشده بود، بنابراین با توجه به مقادیر گزارش شده در مقادیر پیش فرض مدل‌ها و مقادیر گزارش شده در شبیه‌سازی سایر محققین و با یک قضاوت مهندسی مقادیر فوق در نظر گرفته شد. منحنی نرخ کرنش برای مدل Concrete damage R3 در صورت در دسترس نبودن از انترپوله‌ی بین مقادیر گزارش شده در نرم افزار و سایر متون معتبر بدست آمد. با توجه به اینکه در آزمایش‌ها تنها اطلاعات محدودی از مشخصات مکانیکی مصالح در دسترس بود، از قابلیت تولید خودکار شاخص‌ها با ارائه‌ی حداقل شاخص‌های لازم برای معرفی مدل‌های مصالح استفاده شد، که این از قابلیت‌های بسیار قابل توجه سه مدل Concrete damage R3، CSCM، و Winfrith Concrete Damage R3 است. در سه مدل Concrete Damage R3،

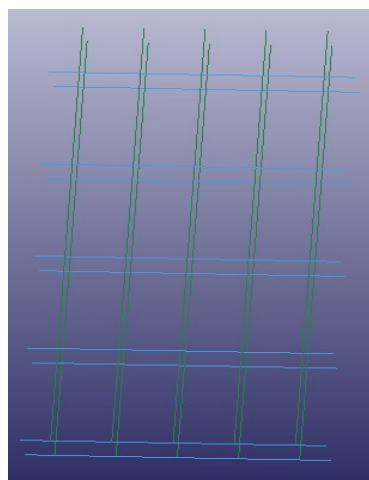
۳-۲-۵- شرایط مرزی

از یک قاب فلزی که مانع از حرکت قائم دال در نوسانات رفت و برگشتی دال می‌شد استفاده شده است.

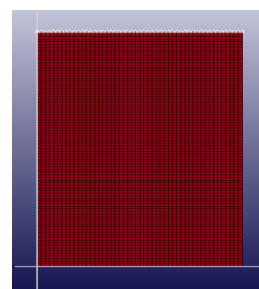
۳-۳-۳- شبیه‌سازی‌های عددی

۳-۳-۳-۱- هندسه و شرایط مرزی و اندرکنش بتن و میلگرد

همانگونه که ذکر شد برای شبیه‌سازی آزمایش‌ها از نرم افزار LS dyna استفاده شد. ابتدا هندسه‌ی دال در محیط نرم افزار رسم شد. در برخی شبیه‌سازی‌ها برای کاهش حجم محاسبات با توجه به تقارن حاکم بر مسئله یک چهارم دال مدل و شرایط تقارن بر مرزها اعمال شد. مطابق شکل (۶) از مش بندی یک سانتی متری (۰/۵ اینچی برای آزمایش ۲) برای مدل‌ها استفاده شد. اندرکنش بین میلگرد و بتن با استفاده از قید lagrange in solid تعریف و شرایط تکیه گاهی و تقارن بر مرزها با توجه به شرایط آزمایش‌ها و روند شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. نمایی از مدل‌سازی میلگردها در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۶- شکل هندسی ربع دال و نقاط تکیه-گاهی و صفحات تقارن



شکل ۷- مدل‌سازی میلگردها

• مدل Winfrith فاقد مکانیزم نرخ کرنش پیشرفته است و اثر آن تنها به صورت ضمنی از طریق روابط تنش-کرنش لحاظ می‌شود. بنابراین در تحقیق حاضر اثر نرخ کرنش هم از طریق شاخص‌های مدل در HJC و R3 و هم از طریق تنظیمات داخلی نرم‌افزار در CSCM و Winfrith اعمال شده است. در مورد مدل HJC چون باید تمام شاخص‌های مدل را تعریف می‌شد، به غیر از شاخص‌های گزارش شده در آزمایش، سایر شاخص‌ها از نزدیک‌ترین مقادیر گزارش شده در سایر متون معتبر [۱۶] استفاده شد. مشخصات عمومی بتن با توجه به مقادیر گزارش شده در آزمایش-ها مطابق جدول (۳) در نظر گرفته شدند.

HJC و CSCM اثر نرخ کرنش (Strain Rate Effect) به صورت درون مدلی در روابط رفتاری لحاظ می‌شود، اما میزان حساسیت آنها متفاوت است:

- در مدل Concrete Damage R3، منحنی نرخ کرنش بر اساس داده‌های نرم‌افزار و مقادیر میان‌یابی شده از متون معتبر تعریف شد.
- در مدل HJC، ضرایب نرخ کرنش D1 و D2 به صورت صریح از مقادیر پیشنهادی در مطالعات (Polanco (2008) و Bush (2010) وارد مدل شدند.
- مدل CSCM دارای تابع نرخ کرنش داخلی است که با مقادیر پیش فرض نرم‌افزار فعال شد.

جدول ۳- اطلاعات استفاده شده برای شبیه‌سازی بتن در مدل‌های مورد بررسی

	Experiment 1	Experiment 2
General specifications	Fc(Mpa)	39.5
	F _t (Mpa)	8.2
	E (Gpa)	28.3

Conwep و نتایج آزمایش و عدم هم‌خوانی آنها با هم تصمیم بر این شد که از روش Conwep استفاده نشود. بنابراین برای اطمینان از دقت اعمال بار انفجار با توجه به مقادیر فشار و ایمپالس گزارش شده در آزمایش‌ها در شبیه‌سازی‌ها از روش اعمال منحنی فشار-زمان به صورت یکنواخت بر کل دال استفاده شد. منحنی فشار-زمان ثبت شده در آزمایش ۲ مطابق شکل (۸) بود، که این منحنی پس از کمی ساده‌سازی مطابق منحنی شکل (۹) به مدل معرفی شد.

همچنین در شکل (۱۰) اعمال نمودار فشار-زمان بر کل سطح رو به انفجار دال به طور یکنواخت نشان داده شده است. در تحقیق حاضر، بار انفجار به صورت فشار یکنواخت متغیر با زمان (Pressure-Time Curve) بر سطح بالایی دال اعمال شده است. این کار در نرم‌افزار LS-DYNA از طریق تعریف کارت‌های (DEFINE CURVE) برای مشخص کردن تاریخچه‌ی فشار-زمان استخراج شده از آزمایش واقعی Wu (2009) و LOAD_SEGMENT_SET و برای اعمال فشار به سطح دال انجام شد. منحنی فشار-زمان به صورت تابعی نمایشی کاهنده در نظر گرفته شد.

۳-۳-۲- داده‌های استفاده شده برای مدل میلگرد رفتار میلگردها با استفاده از مدل Plastic kinematic با استفاده از مشخصات گزارش شده در آزمایش و مطابق جدول (۴) تعریف شد.

جدول ۴- اطلاعات استفاده شده برای شبیه‌سازی میلگرد

	Experiment 1	Experiment 4 NR
Fy (Mpa)	600	496
E (Gpa)	200	210

جدول ۵- مدل‌سازی انفجار

	Experiment 1	Experiment 2
The shape of the explosive material	Horizontal cylinder with $\frac{D}{H} = 1$	-
Explosion charge method	Apply pressure-time curve	Apply pressure-time curve

۳-۳-۴- مدل‌سازی انفجار

برای اعمال بار انفجار در آزمایش ۱ ابتدا از روش Conwep استفاده شد. با مقایسه‌ی نتایج فشار و ایمپالس بازتاب شده از روش

شبیه‌ساز انجام نشده بود، مقادیر فشار و ایمپالس منعکس شده در المان مرکزی در سطح دال بدست آمد و همچنین مقادیر بیشینه خیز دال برای بارگذاری انفجار به روش Conwep ذکر شد. در آزمایش NRC3 از آزمایش ۱ نتایج مربوط به فشار رویداد با استفاده از روش ALE شبیه‌سازی شد، که نتایج آن ذکر شده است. روش Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) در تحقیق حاضر برای بررسی انتشار موج انفجار در محیط هوا و اندرکنش آن با دال بتنی به کار رفته است. در این روش، محیط هوا به صورت شبکه اویلری و دال به صورت شبکه لاگرانژی مدل‌سازی شده است و اندرکنش میان آن‌ها از طریق کارت CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID برقرار گردیده است. به منظور تعریف ویژگی‌های محیط هوا و ناحیه انفجار نیز از کارت ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP استفاده شده است.

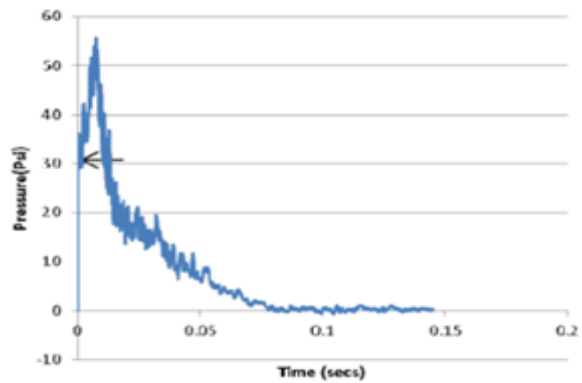
۴-۱-۱- نتایج شبیه‌سازی آزمایش ۱

۴-۱-۱-۱- نتایج انفجار

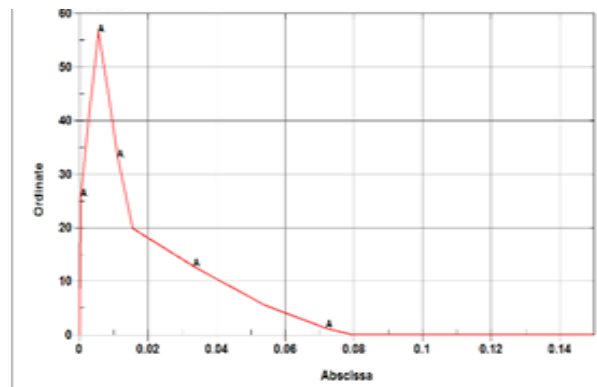
نتایج فشار و ایمپالس منعکس شده در جدول (۶) آورده شده است. نتایج مربوط به شاخصهای انفجار در آزمایش NRC4 با توجه به نزدیک بودن انفجار و محدودیت ابزار اندازه‌گیری گزارش نشده بود، لذا نتایج انفجار آن با سایر روش‌ها هم ذکر نشد. همانگونه که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، در تمام موارد به جز ایمپالس منعکس شده‌ی آزمایش NRC3 نتایج حاصل از روش Conwep کمتر از مقادیر آزمایش است.

برای مشاهده‌ی دقت روش ALE و مقایسه‌ی توانایی آن در شبیه‌سازی موج انفجار فشار رویداد حاصل از شبیه‌سازی انفجار با دو روش Conwep و ALE در جدول (۷) آورده شده است. برای مشاهده‌ی اثر اندازه‌ی مش بر دقت نتایج در روش ALE، نتایج برای دو مش‌بندی ۵ و ۴ سانتی‌متری ذکر شد. برای انجام این بررسی آزمایش NRC3 به دلیل فاصله‌ی کمتر ماده‌ی منفجره تا سطح دال انتخاب شد تا حجم محاسبات کمتر باشد.

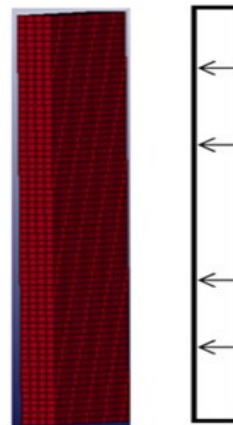
همانگونه که در جدول مشاهده می‌شود مقدار فشار رویداد Conwep اختلاف قابل توجهی با مقدار گزارش شده در آزمایش دارد. اما مقادیر فشار رویداد به‌دست آمده از روش ALE دقت بهتری دارند و با کاهش ابعاد مش مقادیر دقیق‌تر می‌شوند.



شکل ۸- منحنی فشار-زمان اعمال شده در آزمایش [۴]



شکل ۹- منحنی فشار-زمان اعمال شده در شبیه‌سازی آزمایش



شکل ۱۰- اعمال نمودار فشار-زمان به صورت یکنواخت بر کل دال

۴- نتایج تحقیق

پس از انجام شبیه‌سازی‌ها و انجام محاسبات توسط نرم‌افزار نتایج زیر به دست آمد. برای هر آزمایش نتایج شبیه‌سازی با مدل‌های Winfrith و HJC، CSCM، Concrete damage R3 برای بیشینه خیز دال (خیز المان مرکز دال) قرائت شد. در آزمایش ۱ با توجه به اینکه مقادیر ماده‌ی منفجره و فاصله‌ی ماده-ی منفجره تا مرکز دال در دسترس بود و آزمایش توسط دستگاه

جدول ۶- مقایسه‌ی فشار و ایمپالس منعکس شده در روش Conwep و نتایج آزمایش

Experiment name	Reflected pressure (MPa)			Reflected Impulse (Mpa.ms)		
	Experiment 1	Conwep		Experiment 2	Conwep	
		Paper	Resent study		Paper	Resent study
NRC1	0.42	0.24	0.23	0.187	0.153	0.154
NRC2	2.39	1.58	1.54	0.715	0.668	0.667
NRC3	6.38	6.20	6.15	0.705	0.992	0.993

جدول ۷- مقایسه‌ی فشار رویداد در روش Conwep و ALE و نتایج آزمایش

Experiment name	Event Pressure (MPa)				
	experiment	Conwep	Three-dimensional ALE method		Two-dimensional ALE method
			4 cm mesh	5 cm mesh	8 cm mesh
NRC3	1.43	0.34	0.703	0.627	0.488

۴-۱-۲- نتایج خیز
 در جدول (۸) نتایج مربوط به بیشینه خیز دال در شبیه‌سازی انفجار با روش Conwep و اعمال نمودار فشار-زمان آورده شده است. همان‌گونه که از جدول (۸) مشاهده می‌شود، در آزمایش NRC1 با توجه به اینکه مقادیر فشار و ایمپالس منعکس شده آزمایش (استفاده شده در روش نمودار فشار-زمان) بیشتر از Conwep است، نتایج بیشینه خیز دال هم با اعمال نمودار فشار-زمان بیشتر از روش Conwep به‌دست آمد، در NRC2 این روند برای مدل‌های Concrete damage R3 و Winfrith صادق است و بر خلاف انتظار برای دو مدل دیگر نتایج روش اعمال نمودار کمتر از Conwep است (البته برای مدل HJC این اختلاف بسیار ناچیز است). کمتر بودن نتایج خیز در روش اعمال نمودار فشار-زمان نسبت به روش Conwep در آزمایش NRC2 ممکن است ناشی از کمتر بودن مدت زمان تداوم فاز مثبت انفجار در روش اعمال نمودار باشد.

جدول ۸- بیشینه خیز دال

Experiment name	NRC1	NRC2	NRC3	NRC4					
Explosion range	far	far	Average	Average					
Scaled distance $\frac{m}{kg^{\frac{1}{3}}}$	3	1.5	0.93	0.75					
$\frac{ft}{lb^{\frac{1}{3}}}$	7.51	3.87	2.34	1.89					
Experiment result	1.5	10.5	13.9	38.9					
Explosion charge method	Conwep	Diagram	Conwep	Diagram	Conwep	Diagram	Conwep	Diagram	
Result of simulation with material model	Concrete damage R3	1.98	2.39	9.64	11.01	12.88	11.95	31.95	-
	CSCM	2.15	2.7	13.72	13.54	18.22	14.87	38.15	-
	HJC	2.03	2.44	9.68	9.67	12.45	10.3	24.5	-
	Winfrith	2.3	2.87	13.26	13.74	17.7	14.95	36.7	-

۴-۲-۲- نتایج شبیه‌سازی آزمایش ۲

۴-۲-۱- نتایج انفجار

با توجه به اینکه در این آزمایش از دستگاه شبیه‌ساز انفجار استفاده شده بود، هیچ شبیه‌سازی‌ای برای بار انفجار انجام نشد و بار انفجار فقط با روش نمودار فشار-زمان بر دال اعمال شد.

۴-۲-۲- نتایج خیز

بیشینه خیز مرکز دال مطابق جدول (۹) بدست آمد. در این شبیه‌سازی-ها نتایج دو مدل Concrete damage R3 و HJC تقریباً به هم نزدیک بود و نتایج دو مدل CSCM و Winfrith هم نزدیک به هم بدست آمد. اما در اینجا برخلاف آزمایش ۱ نتایج مدل-های Concrete damage R3 و HJC بیشتر از نتایج Winfrith و CSCM و همچنین بیشتر از نتایج آزمایش بدست آمد.

در آزمایش NRC3 مقدار فشار منعکس شده با روش Conwep کمتر از فشار منعکس شده‌ی آزمایش، و ایمپالس منعکس شده با روش Conwep بیشتر از فشار منعکس شده‌ی آزمایش است و نتایج بیشینه خیز با روش Conwep بیشتر از روش اعمال نمودار فشار-زمان است. این مسئله نشان می‌دهد که پاسخ دال در آزمایش NRC3 تابعی از ایمپالس است (نه پیک فشار)، که این حالت از خصوصیات مسائل انفجار نزدیک است. از جدول ۸ می‌توان مشاهده کرد که نتایج دو مدل Concrete damage R3 و HJC بسیار به هم نزدیک هستند و همچنین نتایج این دو مدل کمتر از نتایج آزمایش و نتایج دو مدل Winfrith و CSCM است و به عبارتی غیر محافظه‌کارانه هستند. همچنین نتایج دو مدل Winfrith و CSCM هم به هم نزدیک هستند و هر دو بیشتر از نتایج آزمایش و به عبارتی محافظه‌کارانه هستند.

جدول ۹- بیشینه خیز مرکز دال (in)

Explosion range		average
Pressure applied	(bar)	3.89
	(psi)	56.5
Experiment name		NR
Experiment result		8.7
Material model simulation	Concrete damage R3	8.28
	CSCM	7.26
	HJC	8.75
	Winfrith	7.44

و اثر نرخ کرنش هم در نظر گرفته نشده بود، معادله‌ی حالت مدل Winfrith به صورت دستی وارد شده بود، و برای مدل Concrete damage R3 مقاومت کششی و ضریب پواسون هم به مدل معرفی شده بود که این با روند شبیه‌سازی در آزمایش ۱ تطابق نداشت. اما در تحقیق حاضر قطر بزرگترین دانه حدود ۱۷ میلیمتر و اثر نرخ کرنش هم در نظر گرفته شد، از حداقل شاخصهای لازم برای تعریف مدل‌ها استفاده شد. این با روند شبیه‌سازی در آزمایش ۱ تطابق بیشتری داشت.

۴-۲-۳- نتایج شبیه‌سازی واسودوان

واسودوان با دو مدل Winfrith و Concrete damage R3. همین آزمایش را شبیه‌سازی کرد که نتایج آن در جدول ۱۰ با نتایج شبیه‌سازی تحقیق حاضر مقایسه شد. همان‌گونه که از جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی واسودوان از این جهت که بیشینه خیز پیش‌بینی شده توسط مدل Concrete damage R3 کمتر از مدل Winfrith است با نتایج آزمایش ۱ تطابق بهتری دارد در شبیه‌سازی واسودوان قطر بزرگترین دانه حدود ۶ میلیمتر فرض

جدول ۱۰- مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی تحقیق حاضر و شبیه‌سازی واسودوان

		Simulation of Vasudevan study	Simulation of resent study
Experiment name			NR
Experiment result			8.7
Simulation with Material Model	Concrete damage R3	8.9	8.28
	Winfrith	9.9	7.44

۳-۴- بررسی اثر عوامل مختلف بر دقت مدل‌های مصالح
 غیر متعارفی نسبت به سایر آزمایش‌ها نشان داد. ممکن است این خطا ناشی از خطای اندازه‌گیری در آزمایش باشد (با توجه به مقدار بسیار کم خیز)، اما اگر فرض بر این باشد که نتایج آزمایش کاملاً دقیق است، شاید بتوان قضاوت کرد که هیچ یک از مدل‌ها برای انفجار دور (به عبارتی انفجار ضعیف نه دور) دقت مناسبی ندارند. درصد خطای نسبی مدل‌های مورد بررسی در برآورد بیشینه خیز دال در جدول (۱۱) آورده شد. نتایج شبیه‌سازی NRC1 برای همه‌ی مدل‌ها خطای بسیار زیاد و

جدول ۱۱- درصد خطای نسبی مدل‌ها بر اساس آزمایش‌ها

Experiment no.	Experiment name	Maximum experiment result (mm)	Percent relative error of model compared to experiment				Absolute magnitude average of errors
			Concrete damage R3	CSCM	HJC	Winfrith	
1	NRC1	1.5	59.33	80	62.67	85.33	71.67
	NRC2	10.5	4.86	28.95	-7.90	30.86	19.12
	NRC3	13.9	-14.03	6.98	-25.90	7.55	16.47
2	NR	8.7	-4.83	-16.55	0.57	-14.48	9.11

۳-۴-۱- بررسی اثر فاصله‌ی مقیاس شده‌ی انفجار بر دقت مدل‌ها
 استثنای آزمایش NRC1)، و دقت این مدل در انفجار خیلی نزدیک NRC3 کم و غیرمحافظة کارانه بود. دقت مدل CSCM و Winfrith از روند خاصی تبعیت نکرد و به صورت تناوبی با کاهش فاصله‌ی مقیاس شده‌ی انفجار دقت آن‌ها کم و زیاد شد. دقیق‌ترین نتایج این دو مدل در NRC3 که کمترین فاصله‌ی مقیاس شده را داشت بدست آمد. در آزمایش ۱ با افزایش فاصله‌ی مقیاس شده دقت نتایج CSCM و Winfrith به شدت کم می‌شود، اما در آزمایش ۲ این روند معکوس است. همانطور که از مقادیر فاصله‌ی مقیاس شده در آزمایش ۱ از پراکندگی بهتری برخوردار است و لذا نتایج آن برای نتیجه‌گیری در این زمینه به مراتب قابل اعتنا تر است.

جدول ۱۲- درصد خطای نسبی مدل‌ها به ترتیب فاصله‌ی مقیاس شده‌ی انفجار

Experiment name	Scaled distance		Concrete damage R3	CSCM	HJC	Winfrith	Absolute magnitude average of errors
	$\frac{ft}{lb^{\frac{1}{3}}}$	$\frac{m}{kg^{\frac{1}{3}}}$					
NRC3	2.34	0.93	-14.03	6.98	-25.90	7.55	13.61
NRC2	3.78	1.5	4.86	28.95	-7.90	30.86	18.14
NRC1	7.51	3	59.33	80	62.67	85.33	71.83

۳-۴-۲- بررسی اثر فشار منعکس شده بر دقت مدل‌ها
 برای بررسی اثر فشار منعکس شده بر دقت نتایج درصد خطای نسبی مدل‌ها بر اساس فشار منعکس شده در جدول (۱۳) مرتب شدند. مشهودترین نتیجه‌ی جدول ۱۳ این است که دقت مدل HJC با کاهش فاصله‌ی مقیاس شده‌ی انفجار کمتر و غیرمحافظة کارانه تر شد (به استثنای آزمایش NRC1). با توجه به اینکه رابطه‌ی مستقیمی بین فشار منعکس شده و مقدار فاصله‌ی مقیاس شده‌ی انفجار وجود دارد، نتایج گزارش شده در قسمت فاصله‌ی مقیاس شده برای فشار منعکس شده برقرار است.

جدول ۱۳- درصد خطای نسبی مدل‌ها به ترتیب فشار منعکس شده

Experiment name	Pr (Mpa)	Concrete damage R3	CSCM	HJC	Winfrith	Absolute magnitude average of errors
NR	0.353	-4.83	-16.55	0.57	-14.48	9.11
NRC1	0.42	59.33	80	62.67	85.33	71.83
NRC2	2.39	4.86	28.95	-7.90	30.86	18.14
NRC3	6.38	-14.03	6.98	-25.90	7.55	13.61

جدول ۱۴- درصد خطای نسبی مدل‌ها به ترتیب فشار منعکس شده برای آزمایش ۱

Experiment name	Pr (Mpa)	Concrete damage R3	CSCM	HJC	Winfrith	Absolute magnitude average of errors
NRC1	0.42	59.33	80	62.67	85.33	71.83
NRC2	2.39	-4.86	28.95	-7.90	30.86	18.14
NRC3	6.38	-14.03	6.98	-25.90	7.55	13.61

۴-۳-۳- بررسی اثر ایمپالس منعکس شده بر دقت مدل‌ها
 به منظور بررسی اثر فشار منعکس شده بر دقت نتایج درصد خطای نسبی مدل‌ها بر اساس ایمپالس منعکس شده در جدول ۱۵ مرتب شدند.
 در مدل Concrete damage R3 با افزایش مقدار ایمپالس منعکس شده تا حدود زیادی می‌توان روند افزایش دقت و کاهش خطا را مشاهده کرد. در مورد سایر شبیه‌سازی‌ها روند حاکی قابل تشخیص نیست.
 در مدل‌های CSCM و Winfrith اگر آزمایش ۱ را در نظر گرفته نشود، با افزایش ایمپالس منعکس شده نتایج نادقیق‌تر می‌شوند و خطای بیشتری را نشان می‌دهند. مدل HJC در آزمایش ۱ با افزایش ایمپالس منعکس شده نتایج دقیق‌تری می‌دهد.

جدول ۱۵- درصد خطای نسبی مدل‌ها به ترتیب ایمپالس منعکس شده

Experiment name	ir (Mpa.ms)	Concrete damage R3	CSCM	HJC	Winfrith	Absolute magnitude average of errors
NRC1	0.186	59.33	80	62.67	85.33	71.83
NRC3	0.705	-14.03	6.98	-25.90	7.55	13.61
NRC2	0.715	4.86	28.95	-7.90	30.86	18.14
NR	6.653	-4.83	-16.55	0.57	-14.48	9.11

۴-۳-۴- بررسی اثر دوران لبه‌ی تکیه‌گاهی بر دقت مدل‌ها
 دوران لبه‌ی تکیه‌گاهی را می‌توان به‌عنوان معرفی از کرنش متوسط به‌وجود آمده در طول دال در نظر گرفت و از این جهت در جدول (۱۶) درصد خطای مدل‌ها بر مبنای دوران لبه‌ی تکیه‌گاهی مرتب شد. در آزمایش ۱ مدل Concrete damage R3 با افزایش دوران لبه‌ی تکیه‌گاهی نتایج منفی‌تر و غیرمحافظه‌کارانه‌تری را ارائه کرد، و بدون در نظر گرفتن آزمایش NRC1 با افزایش دوران لبه‌ی تکیه‌گاهی روند افزایش خطا بر نتایج حاکم بود. مدل HJC روند دقیقی را نشان نمی‌دهد اما می‌توان گفت که با افزایش دوران لبه‌ی تکیه‌گاهی نتایج منفی‌تر و غیرمحافظه‌کارانه‌تری نشان می‌دهد. در مدل‌های CSCM و Winfrith با افزایش دوران لبه‌ی تکیه‌گاهی نتایج دقیق‌تری مشاهده شدند.

جدول ۱۶- درصد خطای نسبی مدلها به ترتیب دوران لبه‌ی تکیه‌گاهی در جهت اصلی

Experiment name	$\frac{2\Delta}{l} = \theta$	Concrete damage R3	CSCM	HJC	Winfrith	Absolute magnitude average of errors
NRC1	0.0008	59.33	80	62.67	85.33	71.83
NR	0.0053	-4.83	-16.55	0.57	-14.48	9.11
NRC2	0.0058	4.86	28.95	-7.90	30.86	18.14
NRC3	0.0077	-14.03	6.98	-25.90	7.55	13.61

۵- نتیجه‌گیری

ارائه کرد اما مدل محافظه کارانه‌ای بود. بنابراین در کنترل تغییر شکل دال‌ها با اطمینان بیشتری می‌توان از این مدل استفاده کرد. در ضمن استفاده از این مدل به حداقل شاخص‌ها برای معرفی به نرم-افزار نیاز دارد، که این از ویژگی‌های قابل اعتنای مدل CSCM است.

باید توجه کرد که نتایج گزارش شده در این تحقیق مربوط به دال-های بتن مسلح معمولی با ابعاد و ویژگی‌های گزارش شده در فصول قبل است و در مورد سایر بتن‌ها و سایر اعضای بتنی در این تحقیق ادعایی مطرح نشده است. اما با توجه به شباهت رفتار تیرها با دال‌های یک‌طرفه مقایسه‌ی مدل‌های صورت گرفته در مورد آزمایش‌های ۱ و ۲ را می‌توان به تیرها هم تعمیم داد.

۶- مراجع

- [1] Wai-Fah, Chen. 2007 Plasticity in reinforced concrete. McGraw-Hill. New york.
- [2] Youcai Wu et al. 2012 Performance of LS-DYNA Concrete Constitutive Models. 12th International LS-DYNA Users Conference.
- [3] Rebecca M. Brannon et al. 2009 Survey of Four Damage Models for Concrete. Sandia National Laboratories.
- [4] Anirudha Kadambi Vasudevan. 2012 Finite element analysis and experimental comparison of doubly reinforced concrete slabs subjected to blast loads. Doctoral Thesis. Missouri-Kansas City University.
- [5] M. Polanco-Loria et al. 2008 Numerical predictions of ballistic limits for concrete slabs using a modified version of the HJC concrete model. International Journal of Impact Engineering, 35(5), 290-303.
- [6] S. Yao et al. 2016 Experimental and numerical study on the dynamic response of RC slabs under blast loading. Engineering Failure Analysis, 35, 120-129.
- [7] Wu, Jun et al. 2020 Numerical simulation of

در استفاده از روش Conwep باید توجه کرد که اگر چه مقادیر بیش‌فشار و ایمپالس منعکس شده‌ی انفجار حاصل از روش کانوپ در بیشتر موارد کمتر از نتایج اندازه‌گیری شده در آزمایش‌هاست، اما استفاده از این روش در محاسبه‌ی خیز دال، لزوماً خیز کمتری بدست نمی‌دهد. همچنین استفاده از روش کانوپ ممکن است منجر به خطاهای بسیار زیادی بشود، لذا در استفاده از این روش باید دقت کافی به خرج داد و ضرایب اطمینان بزرگتری تعریف کرد.

به هر صورت مدل Concrete damage R3 در عین دقت بسیار خوب نسبت به سایر مدل‌ها سرعت محاسبات مطلوبی دارد. البته باید توجه کرد که مدل Concrete damage R3 اگر چه دقت خوبی داشت، اما مدل غیر محافظه کارانه‌ای بود و هنگام استفاده از این مدل باید این مسئله را مد نظر داشت. باید توجه کرد که این مدل با تعریف چند شاخص محدود که اغلب در مورد بتن در دسترس است و در آزمایش‌ها گزارش می‌شود (البته منحنی نرخ کرنش باید توسط کاربر ارائه شود)، این دقت خوب را ارائه کرده است. شاخص‌ترین ویژگی مدل HJC را می‌توان سرعت بسیار خوب محاسبات دانست و بنابراین برای سازه‌های بزرگ مقیاس که نیاز به تعداد زیادی المان دارد این مدل بسیار مناسب است. در استفاده از این مدل باید تمام شاخصها توسط کاربر به مدل معرفی شوند که این مسئله کاربرد این مدل را محدود می‌کند. نتایج خیز این مدل غیر محافظه کارانه است و باید در استفاده از این مدل از ضرایب اطمینان مناسب استفاده کرد. مدل Winfrith اگر چه به نسبت مدل Concrete damage R3 و HJC دقت کمتری داشت اما مدل محافظه کارانه‌ای بود. در ضمن توانایی نشان دادن ترک در سه راستای عمود برهم قابلیت بسیار مهمی است که در مدل Winfrith وجود دارد که برای بررسی الگوی ترک-خوردگی مناسب است. مدل CSCM اگر چه کمترین دقت را

reinforced concrete slab subjected to blast loading and the structural damage assessment. *Engineering Failure Analysis*, 118: 104926.

[8] Augusto, A. S. et al. 2021 Finite Element Analysis of Experimentally Tested Concrete Slabs Subjected to Airblast. *Defence Science Journal*, 71(5), 630-638.

[9] Abbas, Asim. et al. 2024 Numerical study on the behavior of reinforced concrete sandwich panels (RCSPs) under blast load. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48(5), 3049-3068.

[10] Kumar, V. et al. 2025 Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading. *Engineering Structures*, 206, 110125.

[11] FEMA426. 2003 Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks against Building. Federal Emergency Management Agency. Chapter 4, 1-20.

[12] FEMA427. 2003 Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks. Federal Emergency Management Agency. Chapter 4, 1-10.

[13] Bangash, N. Y. H.; Bangash, T. 2009 Shock, Impact and Explosion. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 388-393.

[14] Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-02). 2008 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. US Department of Defense. Washington DC.

[15] C. Wu et al. 2009 Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs. *International Journal of Engineering Structures*. 31(9), 2060-2069.

[16] Blake Marshall Bush. 2010 Analytical Evaluation of Concrete Penetration Modeling Techniques. Doctoral Thesis. faculty of North Carolina State University.

Investigating and comparing the concrete constitutive models in the numerical simulation of reinforced concrete slabs under explosion load

Pouya Hassanvand *

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.

Mojtaba Hosseini

Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran.

Milad Almasi

Master of Science in Civil Engineering - Structural Engineering, Afarinesh Institute of Higher Education, Boroujerd, Iran.

Abstract

The simulation of the behavior of reinforced concrete (RC) slabs using numerical software is a cost-effective method for their analysis and design. In the present study, by focusing on an ordinary RC slab element subjected to blast loading and conducting multiple simulations, a comparison of the models was performed. The software LS-DYNA, version R 4.2, and the capable, widely used, and available concrete material models: Concrete Damage R3, HJC, CSCM, and Winfrith, were used for the simulation. Based on existing tests and the information provided within them, the blast load was applied to the slab using the pressure-time history method, and the results for the maximum slab deflection obtained from the simulation using the mentioned material models were compared. The Concrete Damage R3 model provided more accurate results than the other models. In this research, the accuracy of the models was evaluated quantitatively based on the Percent Relative Error (PRE) between the simulation results and the actual laboratory data. The HJC model required the least computation time but its accuracy was second to the Concrete Damage R3 model; however, it was necessary for the user to introduce all parameters, including the equation of state, to the model. The CSCM model had lower accuracy than the HJC model but required the fewest input parameters for introduction to the software; paradoxically, this model required the longest computation time. The Winfrith model had the lowest accuracy.

Keywords: Reinforced concrete slab, normal strength concrete, material Constitutive model, blast load, Numerical Simulation.

* Corresponding Author: Pouya.hassanvand@abru.ac.ir