

نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال سیزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، (پیاپی ۵۰): صص ۲۴-۱۵

علمی - پژوهشی

ارزیابی عددی ظرفیت باربری دال بتن آرمه دارای بتن با

مقاومت بالا تحت اثر بارهای انفجار

مهدی مختاری^۱، محمد ابراهیمی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۸

چکیده

بتن با مقاومت بالا که دارای شکل پذیری و چقرمگی بالایی است، به طور گسترده‌ای در ساخت سازه‌های مدرن استفاده می‌شود. مشخصه برجسته بتن با مقاومت بالا بدین گونه است که در تحمل بارهای شدید از قبیل بارهای ضربه‌ای یا انفجار از پتانسیل بسیار بالایی برخوردار است. در این مقاله به مدل‌سازی سه بعدی و تحلیل عددی یک دال بتنی با مقاومت بالا در نرم‌افزار اجزاء محدود LS-DYNA پرداخته می‌شود. برای این منظور سناریوهای مختلف بارگذاری انفجاری در نظر گرفته شده و پاسخ جابه‌جایی قائم و کانتور کرنش‌های پلاستیک دال تحت هر یک از این سناریوها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این مدل عددی، اثر نرخ کرنش نیز بر رفتار دینامیکی مواد لحاظ می‌گردد. ملاحظه گردید که دال تحت بار انفجار با شدت بیشتر و فاصله کمتر ابتدا بیشترین جابه‌جایی را تجربه و سپس با گذشت زمان جابه‌جایی آن ماندگار می‌شود؛ این در حالی است که دال در حالت بار انفجار کم و فاصله زیاد از سطح دال، نسبت به موقعیت اولیه خود با یک پیوند تقریباً یکسان نوسان کرده و دارای جابه‌جایی‌های اندکی است.

کلید واژه‌ها: دال بتن آرمه، بتن با مقاومت بالا، تحلیل عددی، انفجار

^۱ دانشجوی دکتری، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^۲ پژوهشگر قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا(ص)، تهران، ایران - (mm800295@yahoo.com) - نویسنده مسئول

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر بمب‌گذاری‌های ناشی از تهدیدات تروریستی در سراسر دنیا سبب شده است که توجه ویژه‌ای به پدیده انفجار و حفاظت ساختمان‌ها و افراد جامعه در برابر چنین تهدیداتی صورت گیرد. بار انفجار ممکن است سبب تغییر شکل‌های زیاد در اعضای سازه‌ای و نیز تغییر شکل‌های چشمگیری در کل سازه شده و در نتیجه ایمنی ساکنین و سازه را به خطر اندازد. برای این منظور ضروری است که عوامل مؤثر جهت کاهش اثرات انفجار بر سازه شناخته شود.

در طی چند دهه گذشته، استفاده از روش‌های تحلیلی متداول نتایج چندان دقیقی را ارائه نمی‌داد و در موارد حساس به ناچار باید از آزمایش‌های تجربی استفاده می‌گردید. تدابیر امنیتی و شرایط خاص مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های تجربی بر روی این موضوع باعث بالا رفتن هزینه‌ها می‌گشت و در نتیجه دیگر مراکز علمی به تنهایی قادر به انجام این تحقیقات نبودند و بنابراین سازمان‌های دیگر اعم از وزارت دفاع، سرویس‌های امنیتی و نیروهای نظامی حمایت از این تحقیقات را به عهده گرفتند. با ورود مراکز غیر علمی در انجام این پژوهش‌ها، انتشار نتایج حاصله تحت تأثیر قرار گرفت و گزارش‌ها برای انتشار عمومی می‌بایست از فیلترهای بسیاری عبور می‌کردند و در برخی موارد تا سال‌ها به صورت محرمانه باقی می‌ماندند. اما در سال‌های اخیر با رواج نرم‌افزارهای اجزاء محدود و روش‌های عددی، می‌توان نتایج رضایت‌بخشی از تحلیل‌های مورد نظر گرفت. همچنین انتشار مقالات نیز به دلیل بیشتر شدن تحقیقات رواج بیشتری یافته است. توتلموند و بولی نرخ کرنش‌های بالا در رفتار دینامیکی دال‌های دایره‌ای بتن مسلح و ساده را با استفاده از برخورد هوای فشرده مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند که کاهش قابل توجه در طول بازه اعمال ضربه، منجر به تغییر مد گسیختگی از خمش خالص (که به صورت ترک‌های قطری آشکار می‌شود) به گسیختگی خمشی - برشی (که با ایجاد ترک‌های قطری و محیطی در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها بروز پیدا می‌کند) می‌شود. همچنین بروز ترک‌ها به صورت موازی با میلگردهای تقویتی و نوع گسیختگی نیز به شدت وابسته به بیشینه فشار اعمالی و نیز طول بازه اعمال بار گزارش شد [۱]. میرس و همکاران در سال ۲۰۰۴ هم‌زمان با محققین مؤسسه مهندسیین ویلفرد باکر، رفتار مشابهی را برای دیوارهای CMU تقویت شده گزارش دادند (در هر دو مورد بالا دیوار تقویت نشده توسط نوارهای چسبیده به سطح بهسازی شده بودند) [۲]. رمنیکو و رز در سال ۲۰۰۵ [۳] به مدل‌سازی بار انفجار بر روی ساختمان‌های موجود در شهرهایی با هندسه پیچیده پرداختند و گزارش دادند که فرض در نظر گرفتن ساختمان‌ها به صورت مجزا از دیگر ساختمان‌ها می‌تواند خطاهایی در پی داشته باشد. بنابراین

مدل‌سازی ساختمان‌های دیگر دقت کار را افزایش می‌دهد. این نتیجه در طی مدل‌سازی دو ساختمان مجاور هم و بررسی آثار انفجار بر روی آن‌ها ارائه شده است. کای ژو و یانگ‌لو در سال ۲۰۰۶ [۴] به شبیه‌سازی عددی خردشدگی صفحه بتن مسلح زیر اثر بار ناشی از انفجار پرداختند و اعلام کردند که با شبیه‌سازی عددی به صورت سه بعدی می‌توان به جواب‌های بسیار بهتری نسبت به حالت دو بعدی دست یافت. آن‌ها همچنین بیان نمودند که در حالتی که چشمه انفجار نزدیک به سطح است، می‌توان از موج در حالت یک بعدی به جای موج در حالت سه بعدی استفاده کرد. سیلوا و بینگنگ‌لو در سال ۲۰۰۷ [۵] موضوع بهبود مقاومت دال بتنی با مصالح ترکیبی تحت اثر انفجار را مورد بررسی قرار دادند و گزارش دادند که دالی که تنها در یک سمت مسلح شود (بالا و یا پایین) صرف نظر از نوع مصالح که برای مقاوم‌سازی در نظر گرفته می‌شود، به شدت آسیب می‌بیند؛ دالی که در هر دو طرف مقاوم‌سازی شده از لحاظ مقاومتی در سطح قابل قبولی قرار می‌گیرد و در این حالت ظرفیت برشی، عامل تعیین کننده است. رزاق‌پور و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۶] موضوع نقش دورپیچ‌های GFRP در مقاوم‌سازی پانل‌های بتنی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها رفتار بسیار بهتر نمونه مقاوم‌سازی شده در مقایسه با نمونه کنترل را گزارش دادند؛ به نحوی که مقاومت حاصل ۷۵٪ افزایش یافته بود. با این وجود آن‌ها اعلام کردند که اظهار نظر نهایی نیاز به انجام آزمایش‌های عملی بیشتری دارد. وو و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۷] مقاوم‌سازی دال بتنی توسط FRP و UHPFC تحت بار انفجار را مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند که در یک بار گذاری انفجاری یکسان دال UHPFC نسبت به دال معمولی مقاوم‌سازی شده رفتار مناسب‌تر و آسیب‌دیدگی کمتری دارد. وی و اسرورات در سال ۲۰۱۰ [۸] موضوع رفتار دیوارهای بنایی تقویت نشده تحت بار انفجار را به صورت پارامتریک مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند که شرایط مرزی، مقاومت مصالح و ضخامت دیوار عامل تعیین کننده‌ای در رفتار دیوار و میزان خسارات ایجاد شده بازی می‌کنند و در این میان نقش شرایط مرزی بسیار با اهمیت است.

بتن با مقاومت بالا دارای مقاومت فشاری بالاتر از ۲۰۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی حدود ۴۰-۲۰ مگاپاسکال است، همچنین انرژی گسیختگی آن در حدود ۴۰۰۰۰-۲۰۰۰۰ ژول بر متر مربع می‌باشد که به مراتب بسیار بالاتر از بتن معمولی است [۹]. تحت شرایط نرخ بارگذاری بالا از قبیل انفجار و ضربه، عملکرد بتن با مقاومت بالا بهتر از عملکرد بتن با مقاومت متعارف است. این‌گو و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۱۰] نتایج آزمون میدانی بر روی مقاومت پانل‌های بتنی ساخته شده از بتن با مقاومت بالا

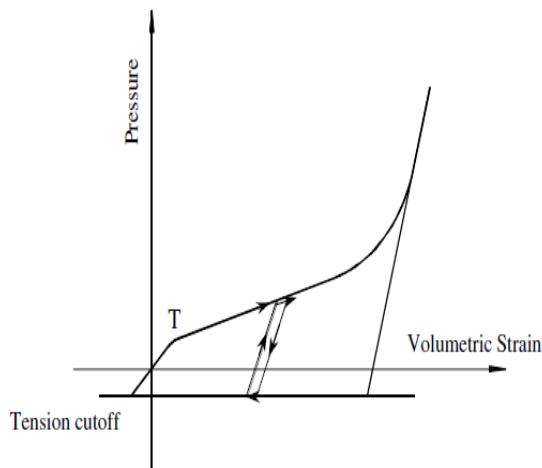
¹ Ultra-High Performance Fiber Concrete

۲-۱-۱- تانسور تنش هیدروستاتیک

برای تانسور هیدروستاتیک، مدل فشاری یک تقریب چند خطی در انرژی داخلی می‌باشد. فشار به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۱۳].

$$p = C(\epsilon_v) + \gamma T(\epsilon_v)E \quad (1)$$

که در آن، E انرژی داخلی نسبت به حجم اولیه و γ نسبت گرمای ویژه می‌باشد. کرنش حجمی ϵ_v از طریق لگاریتم طبیعی حجم نسبی تعیین می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، مدل شامل یک مسیر الاستیک از قطع کشش هیدرواستاتیک^۲ تا نقطه T از حد الاستیک می‌باشد. اگر تنش کششی بیش از قطع کشش هیدرواستاتیک باشد گسیختگی کششی اتفاق می‌افتد که متناظر با منطقه گسیختگی بالک^۳ است. هنگامی که کرنش حجمی بزرگ‌تر از نقطه T باشد، فشردگی ایجاد می‌شود و بتن به آرامی تبدیل به یک نوع ماده دانه‌ای می‌گردد و کرنش حجمی از این حالت افزایش نمی‌یابد. مسیر باربرداری، در طول باربرداری مدول بالک تا کشش قطع اتفاق می‌افتد. بارگذاری مجدد، همیشه از مسیر باربرداری تا نقطه‌ای که باربرداری شروع شده تبعیت می‌کند و روی مسیر بارگذاری ادامه می‌یابد.



شکل (۱): نمودار فشار براساس کرنش حجمی [۱۳]

۲-۱-۲- تانسور تنش انحرافی

برای تحلیل تانسور تنش انحرافی از یک مدل با سه منحنی مطابق شکل (۲-الف) استفاده می‌شود که در آن بالاترین منحنی نشان دهنده حداکثر مقاومت، منحنی میانی نشان دهنده مقاومت تسلیم و پایین‌ترین منحنی نشان دهنده مقاومت پسماند ماده گسیخته شده است.

را ارائه دادند. داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده شامل فشار انفجار و تغییر شکل‌های پانل بتنی بود که جهت ارزیابی عملکرد پانل‌های دارای بتن با مقاومت بالا و پانل‌های دارای بتن با مقاومت متعارف مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که پانل‌های دارای بتن با مقاومت بالا عملکرد بهتری در مقایسه با پانل‌های دارای بتن متعارف از خود نشان داده به طوری که پس از انفجار تنها ترک‌های جزئی‌ای مشاهده گردید. با توجه به سودمندی داده‌های حاصل از آزمون‌های انفجاری میدانی، شبیه‌سازی عددی قابل انجام بوده و نتایج حاصله می‌توانند در کنار نتایج آزمایشگاهی موجود با ارزش باشند. تیاکاراجان و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۱۱] یک مطالعه مقدماتی بر روی مدل‌سازی عددی دال‌های بتن آرمه دارای بتن با مقاومت بالا، بتن متعارف و فولاد با مقاومت بالا انجام دادند. میرهاشمی در سال ۲۰۲۰ به بررسی خیز دال‌های بتنی تقویت شده با استفاده از صفحات و میلگردهای پلیمری CFRP و GFRP پرداخت. در این مطالعه ملاحظه گردید که استفاده از ورق‌های CFRP و GFRP در کاهش مقدار جابه‌جایی دال تحت بار انفجار، جلوگیری از قله‌کشی و فروریزش آوار در دال‌ها مؤثر بوده و موجب کاهش ۲۶ درصدی تغییر مکان دال خواهد شد [۱۲].

در این مقاله به مدل‌سازی عددی یک دال بتن آرمه دارای بتن با مقاومت بالا در نرم‌افزار LS-DANA پرداخته می‌شود و پاسخ‌های سازه‌ای آن تحت اثر بار انفجار به دست آورده می‌شود. همچنین اثر نرخ کرنش بر روی مشخصات دینامیکی مصالح مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها یک مطالعه پارامتری جهت بررسی اثر سناریوهای مختلف انفجار بر روی مقاومت دال بتن آرمه نیز انجام می‌گیرد.

۲- معرفی مدل‌های عددی بتن و فولاد در

نرم‌افزار LS-DAYNA

۲-۱-۲- مدل مصالح بتنی

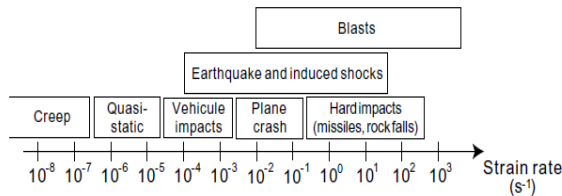
به منظور شبیه‌سازی اعضای بتنی تحت بار انفجار یک مدل ماده مناسبی می‌بایست انتخاب گردد تا بتواند مشخصات کامل بتن را بیان کند. برای این منظور مدل خسارت بتن^۱ (MAT72 R3) تحت بار دینامیکی در این مطالعه به کار گرفته می‌شود. این مدل مؤلفه‌های لازم برای بیان رفتار بتن تحت شرایط دینامیکی بالا و تنش‌های پیچیده را فراهم می‌کند. تانسور تنش، به تانسور تنش هیدروستاتیک و تانسور تنش انحرافی، تقسیم شده است. تانسور تنش هیدروستاتیک حجم بتن را تغییر می‌دهد و تانسور تنش انحرافی تغییر شکل بتن را باعث می‌شود [۱۳].

^۲ Hydrostatic Tension Cutoff

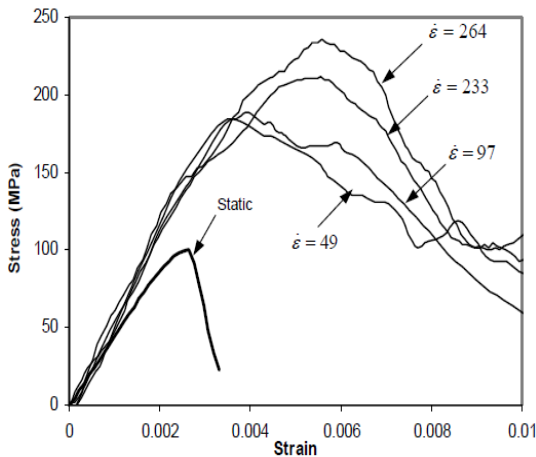
^۳ Bulk Failure Region

^۱ Concrete Damage Model

دینامیکی بتن تحت شرایط بارگذاری دینامیکی می‌تواند کاملاً متفاوت از خواص آن در شرایط با بارگذاری استاتیکی باشد. در حالی که سختی دینامیکی تفاوت زیادی با سختی استاتیکی ندارد، ولی تنش‌ها در شرایط دینامیکی برای یک مدت زمان مشخص ممکن است بسیار بالاتر از مقاومت فشاری استاتیکی باشد (شکل (۴)) [۱۴].



شکل (۳): مقادیر نرخ کرنش در موارد بارگذاری‌های مختلف [۱۵]



شکل (۴): افزایش مقاومت فشاری بتن با افزایش نرخ کرنش

برای بیان رابطه‌ای بین مقاومت بتن در حالت دینامیکی و استاتیکی از ضریب افزایش دینامیکی (DIF¹) که در واقع افزایش مقاومت دینامیکی بتن نسبت به مقاومت استاتیکی است، استفاده می‌شود. در بسیاری از مراجع این ضریب برای مقاومت فشاری بیش از ۲/۵ و مقاومت کششی بیش از ۴ ذکر شده است. شاید جامع‌ترین مدل نرخ کرنش برای بتن هم در فشار هم در کشش توسط مدل CEB ارائه شده است [۱۴].

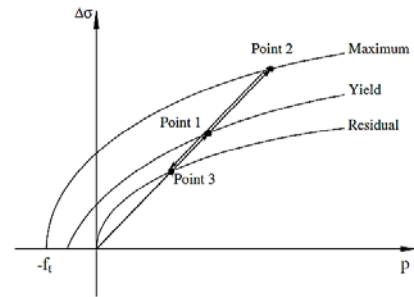
ضریب افزایش دینامیکی در حالت فشار به صورت رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$DIF = \frac{f_c}{f_{cs}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1.026\alpha} \quad \text{for } \dot{\epsilon} \leq 30 S^{-1}$$

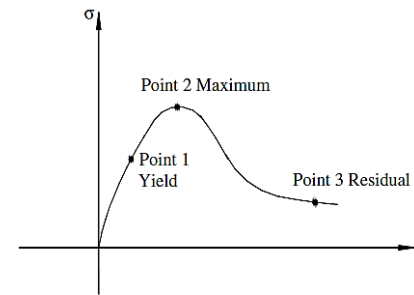
$$DIF = \frac{f_c}{f_{cs}} = \gamma \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{for } \dot{\epsilon} > 30 S^{-1}$$

(۶)

¹ Dynamic Increase Factor



(الف)



(ب)

شکل (۲): مدل مقاومت برای ماده بتن: (الف) مدل مقاومت دو-منحنی و سطح تسلیم و (ب) منحنی تنش-کرنش برآیند معمولی [۱۳] سطوح مقاومت تسلیم، مقاومت حداکثر و مقاومت پسماند به ترتیب از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$\Delta\sigma_y = \eta_y \Delta\sigma_m + (1 - \eta_y) \Delta\sigma_r \quad (۲)$$

$$\Delta\sigma_m = a_0 + \frac{p}{a_1 + a_2 p} \quad (۳)$$

$$\Delta\sigma_r = a_{0f} + \frac{p}{a_{1f} + a_{2f} p} \quad (۴)$$

که در آن، η مقدار کرنش پلاستیک مؤثر اصلاح شده است و مقدار متداول η_y برای بتن برابر ۰/۳۰۹ است. ضرایب (a_2, a_1, a_0) در معادله (۳) پارامترهای مستقل برای تعیین سطح مقاومت حداکثر ($\Delta\sigma_m$) و ضرایب (a_{0f}, a_{1f}) در معادله (۴) پارامترهای مستقل برای تعیین سطح مقاومت پسماند ($\Delta\sigma_r$) می‌باشند. مقدار p از رابطه زیر به دست می‌آید:

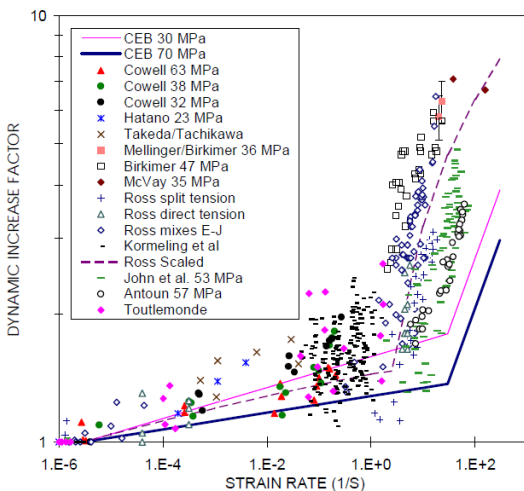
$$p = - \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} \quad (۵)$$

۲-۱-۳- اثر نرخ کرنش بر مقاومت فشاری و کششی

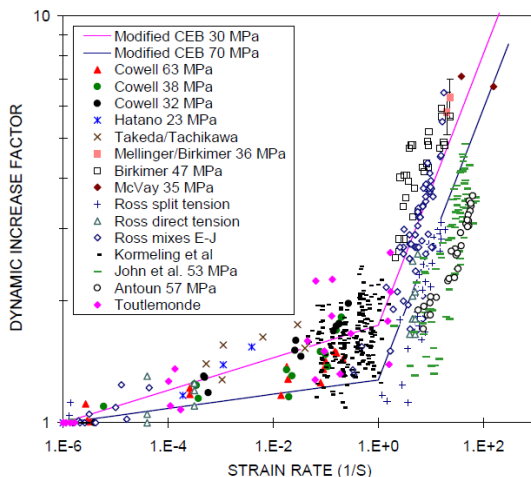
بتن

رفتار بتن بستگی به مقدار نرخ کرنش یا سرعت بارگذاری دارد که به آن تأثیر میزان نرخ کرنش و نحوه بارگذاری می‌گویند. نرخ کرنش در مصالح به نوع بارگذاری بستگی دارد. شکل (۳) نمونه‌های متفاوتی از نرخ کرنش در بارگذاری‌های مختلف مانند بارگذاری خزش، استاتیک، حادثه و غیره را نشان می‌دهد. خواص

ضریب افزایش دینامیکی در کشش برای دو مقاومت فشاری مختلف (۳۰ و ۷۰ مگاپاسکال) در شکل‌های (۵) و (۶) ترسیم شده است. همان‌طور که از نمودار log-log مشهود است، منحنی‌های به‌دست آمده دو خطی بوده و از عدم پیوستگی در شیب برخوردار هستند؛ به‌طوری‌که بر اساس رابطه CEB این ناپیوستگی در شیب در نرخ کرنش $300 S^{-1}$ رخ داده است. روابط CEB تا نرخ کرنش $300 S^{-1}$ معتبر می‌باشد، که این ضریب برای بتن با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال برابر ۳/۹ است.



شکل (۵): افزایش نسبی مقاومت فشاری بر حسب نرخ کرنش در کشش [۱۶]



شکل (۶): افزایش نسبی مقاومت فشاری بر حسب نرخ کرنش اصلاح شده در کشش [۱۶]

۲-۲- رفتار فولاد در برابر بار دینامیکی

رفتار فولاد در برابر بار دینامیکی به سرعت اعمال بار دینامیکی وابستگی زیادی دارد و هر چه سرعت بارگذاری دینامیکی افزایش یابد، نقطه تسلیم فولاد نیز بالاتر می‌رود؛ زیرا با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار کمی از تغییر شکل پلاستیک امکان رخ دادن در

که در آن، f_c مقاومت فشاری دینامیکی در $\dot{\epsilon}$ ، f_{cs} مقاومت فشاری استاتیکی در $\dot{\epsilon}_s$ ، f_{co} مقاومت استاتیکی نمونه مکعبی برابر ۱۰ مگاپاسکال (یا ۱۴۵۰ پوند بر اینچ مربع)، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش در محدوده $10^{-1} S^{-1}$ تا $300 S^{-1}$ ، $\dot{\epsilon}_s$ نرخ کرنش استاتیکی و برابر $10^{-1} S^{-1}$ و γ و α از روابط زیر به‌دست می‌آیند [۱۴]:

$$\log \gamma = 6.156\alpha - 2 \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1}{5 + 9 \frac{f_{cs}}{f_{co}}} \quad (8)$$

این روابط رفتارهای مشخصی از مصالح را دربر می‌گیرد که در زیر به آن‌ها اشاره شده است:

- $\log(DIF)$ بر حسب $\log(\dot{\epsilon})$ یک رابطه دو خطی است که شیبش در حدود $30 S^{-1}$ تغییر می‌کند.
- مقدار DIF برای بتن‌هایی با مقاومت کمتر، بیشتر است.
- همه ضرایب DIF به مقاومت اندازه‌گیری شده در نرخ کرنش مشخصی (شبه‌استاتیکی) ارتباط دارند.
- افزایش مقاومت در کشش و فشار متفاوت است.

ضریب افزایش دینامیکی در حالت کشش نیز به‌صورت رابطه زیر تعیین می‌شود [۱۴]:

$$DIF = \frac{f_t}{f_{ts}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1.016\delta} \quad \text{for } \dot{\epsilon} \leq 30 S^{-1} \quad (9)$$

$$DIF = \frac{f_t}{f_{ts}} = \beta \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{for } \dot{\epsilon} > 30 S^{-1}$$

که در آن، f_t مقاومت کششی دینامیکی در $\dot{\epsilon}$ ، f_{ts} مقاومت کششی استاتیکی در $\dot{\epsilon}_s$ ، f_{co} مقاومت استاتیکی نمونه مکعبی برابر ۱۰ مگاپاسکال (یا ۱۴۵۰ پوند بر اینچ مربع)، $\dot{\epsilon}_s$ نرخ کرنش در محدوده $10^{-1} S^{-1}$ تا $300 S^{-1}$ ، $\dot{\epsilon}_s$ نرخ کرنش استاتیکی و برابر $10^{-1} S^{-1}$ و β و δ از روابط زیر به‌دست می‌آیند [۱۴]:

$$\log \beta = 7.11\delta - 2.33 \quad (10)$$

$$\delta = \frac{1}{10 + 6 \frac{f_{cs}}{f_{co}}} \quad (11)$$

در این پژوهش، از المان solid شش وجهی - هشت گرهی برای شبیه‌سازی ماده بتن در نرم‌افزار LS-DYNA استفاده شده است. مشخصات ماده بتن مورد استفاده از نوع بتن با مقاومت بالا، مطابق با جدول (۱) است. میلگردهای فولادی نیز با استفاده از المان truss مدل شده و چسبندگی کامل بین بتن و میلگردها فرض شده است. قطر میلگردهای فولادی ۱۲ میلی‌متر بوده و مقاومت تسلیم آن‌ها ۳۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. دو لبه دهانه‌های کوتاه دال مطابق آزمایش صورت گرفته، توسط قطعات فولادی به منظور جلوگیری از جدایش لبه‌ها از تکیه‌گاه مقید شده‌اند. دال با ابعاد ۱۰ میلی‌متری در نرم‌افزار LS-DYNA مدل‌سازی شد. در این مدل، جابه‌جایی قائم دو لبه با دهانه کوتاه مقید شد. همچنین اثر نرخ کرنش برای هر دو مقاومت کششی و مقاومت فشاری با استفاده از روابط ذکر شده مربوط به DIF در بخش‌های قبیل در نظر گرفته شد.

جدول (۱): مشخصات ماده بتن [۱۹]

چگالی (kg/m ³)	کرنش نهایی	مقاومت نهایی (MPa)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)
۲۴۰۰	۰/۰۰۲۵	۱۲۸/۹	۰/۲۰	۵۱/۵

دال مورد نظر تحت بار انفجار به جرم معادل TNT و در فواصل مختلف در بالای دال قرار گرفت. جدول (۲) سناریوهای مختلف بارگذاری انفجاری را نشان می‌دهد. جهت اعمال فشار انفجار بر روی سطح دال، تابع Load_Blast_Enhanced در LS-DYNA برای مدل‌سازی بار انفجار به کار گرفته شده است. قابل ذکر است که به کارگیری این مدل بر اساس مدل‌های تجربی بیان شده در هندبوک TM5-855-1 بوده و این مدل رفتار بار انفجار را به صورت فشار نیم‌کروی روی زمین و به صورت فشار کروی در هوا در نظر می‌گیرد. همچنین این مدل می‌تواند تاریخچه فشار انفجار را به طور مناسبی بر اساس ورودی‌هایی شامل جرم معادل TNT، موقعیت قرارگیری ماده منفجره و نوع بار انفجار تولید نماید.

جدول (۲): سناریوهای مختلف بارگذاری انفجاری

شناسه بار	وزن معادل TNT بار انفجار (W) (kg)	موقعیت بار انفجار (R) (m)	فاصله مقیاس‌بندی شده (Z=R×W ^{-1/3}) (m/kg ^{1/3})
P8-1	۸/۰	۱/۰	۰/۵
P8-2	۸/۰	۲/۰	۱/۰
P1-1	۱/۰	۱/۰	۱/۰
P1-2	۱/۰	۲/۰	۲/۰

این زمان کوتاه را داشته و در نتیجه تنش بیشتری برای رسیدن به کرنش گسیختگی لازم است. بنابراین در این پژوهش از مدل ماده Plastic Kinematic Model (MAT3) جهت مدل‌سازی میلگردهای فولادی بهره گرفته شده است. اثر نرخ کرنش در این مدل به صورت فرمول سیموندز-کوپر ارائه شده است [۱۳].

$$DIF = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (12)$$

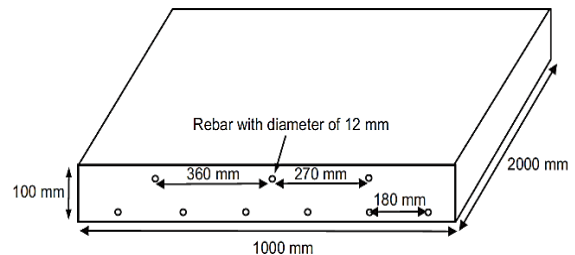
۳-۲- اندرکنش آرماتور و بتن

اندرکنش بین آرماتور و بتن، به دلیل رفتارهای متفاوتی که فولاد و بتن از خود نشان می‌دهند، باید در مدل‌سازی اعضای بتن مسلح در نرم‌افزارهای اجزاء محدود لحاظ شوند. رفتار متفاوت فولاد و بتن به دلیل مدول الاستیسیته بالاتر فولاد نسبت به بتن و تفاوت رفتار بتن در کشش و فشار، نسبت به فولاد می‌باشد.

این ناسازگاری در رفتار منجر به گسیختگی گیرایی بین فولاد و بتن می‌شود و نتیجه آن، لغزش آرماتورها، تغییر شکل‌های موضعی و ترک خوردگی می‌باشد. طبق تحقیقات وودرزبای و ویریم [۱۷ و ۱۸] هر چه نرخ بارگذاری بالاتر باشد ضریب اصطکاک استاتیکی و چسبندگی شیمیایی بین بتن و فولاد افزایش می‌یابد. در این پژوهش، به دلیل نرخ بالای بارگذاری ناشی از بار انفجار، اندرکنش بین فولاد و بتن به صورت گیرایی کامل^۱ فرض شده است.

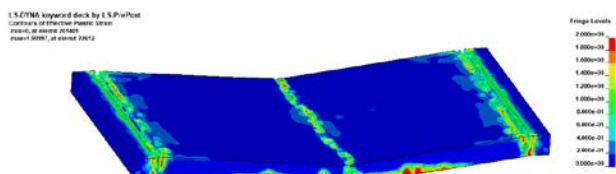
۳- مدل عددی دال بتن آرمه مورد مطالعه

جهت مدل‌سازی عددی دال بتن آرمه در نرم‌افزار LS-DYNA، از یکی از دال‌های آزمایش شده توسط لی و همکاران در سال ۲۰۱۵ استفاده شده است [۱۹]. بر این اساس، دال انتخاب شده به ابعاد ۲۰۰۰×۱۰۰۰×۱۰۰ mm است که مقطع عرضی آن و نحوه میلگردگذاری در شکل (۷) نشان داده شده است. در این دال از خاموت استفاده نشده است.

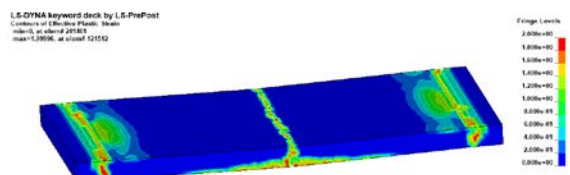


شکل (۷): ابعاد هندسی دال و نحوه میلگردگذاری [۱۹]

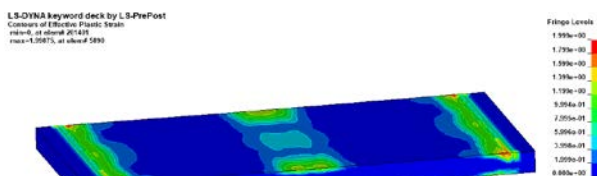
^۱ Perfect Bond



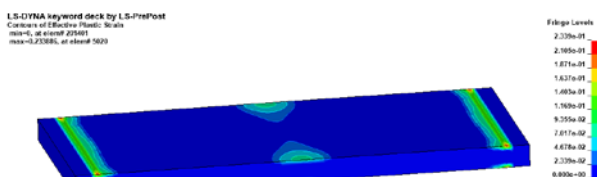
شکل (۹): کانتور کرنش پلاستیک مؤثر دال تحت سناریو P8-1



شکل (۱۰): کانتور کرنش پلاستیک مؤثر دال تحت سناریو P8-2

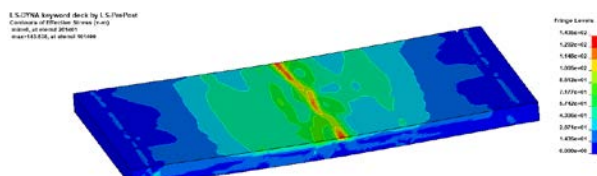


شکل (۱۱): کانتور کرنش پلاستیک مؤثر دال تحت سناریو P1-1

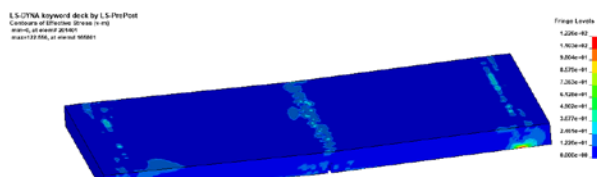


شکل (۱۲): کانتور کرنش پلاستیک مؤثر دال تحت سناریو P1-2

شکل‌های ۱۶-۱۳ کانتور حداکثر تنش ون مایز دال را تحت تأثیر سناریوهای مختلف بار انفجار نشان می‌دهد.



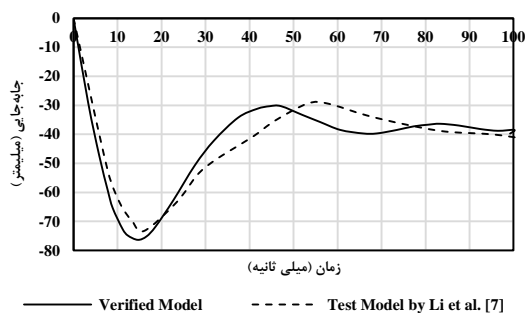
شکل (۱۳): کانتور تنش ون مایز دال تحت سناریو P8-1



شکل (۱۴): کانتور تنش ون مایز دال تحت سناریو P8-2

در جدول (۲) هر سناریو بارگذاری دارای شناسه به صورت PW-R بوده، که در آن W نمایانگر وزن معادل TNT ماده منفجره و R نمایانگر فاصله عمودی ماده منفجره تا سطح دال است. به عنوان مثال شناسه بار P8-1 یعنی دال تحت بار انفجار به میزان هشت کیلوگرم TNT در فاصله عمودی یک متر قرار دارد.

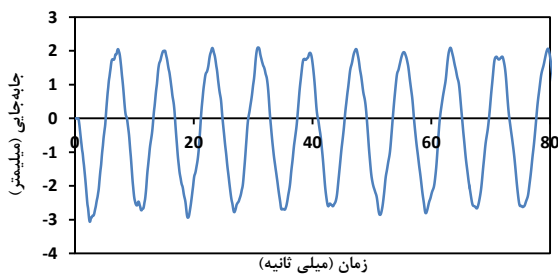
به منظور صحت‌سنجی نیز از مدل آزمایشگاهی لی [۱۹] با شناسه بار P8-1 مطابق جدول (۲) استفاده گردید به طوری که شکل (۸) جابه‌جایی‌های قائم وسط دهانه دال مورد نظر را تحت شناسه بار انفجاری P8-1 برای دو مدل آزمایشگاهی و مدل صحت‌سنجی شده نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هر دو حالت، دال ابتدا بیشترین جابه‌جایی را تجربه و سپس با گذشت زمان جابه‌جایی آن ماندگار می‌شود؛ به عبارت دیگر دال وارد ناحیه پلاستیک خود شده و دچار خرابی با جابه‌جایی‌های پسماند می‌شود.



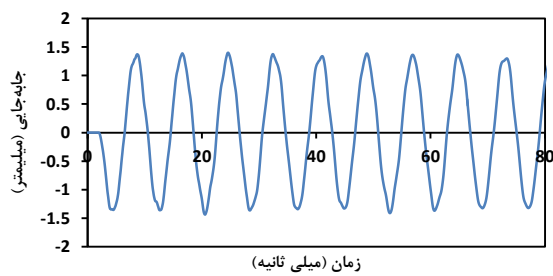
شکل (۸): مقایسه جابه‌جایی قائم وسط دهانه دال برای دو مدل آزمایشگاهی و مدل صحت‌سنجی شده

۴- نتایج و بحث

در این بخش به ارائه نتایج مربوط به جابه‌جایی وسط دهانه دال و نحوه تشکیل کانتور تنش‌ها و کرنش‌های پلاستیک تحت سناریوهای مختلف انفجار پرداخته می‌شود. شکل‌های ۹-۱۲ توزیع خرابی دال را تحت تأثیر سناریوهای مختلف بار انفجار نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود محل تشکیل کرنش‌های پلاستیک در وسط دهانه و در محل تکیه‌گاه‌ها رخ داده است که حالت P8-1 بیشترین حالت خرابی و حالت P1-2 کمترین حالت خرابی را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۹)، دال تحت بار P8-2 در فاصله مقیاس‌بندی شده ۰/۵ به‌طور کامل تخریب و ترک‌های بزرگی ابتدا در وسط دهانه سپس در محل تکیه‌گاه‌ها رخ داد. اما مطابق شکل (۱۲)، پاسخ دال تحت بار P1-2 در فاصله مقیاس‌بندی شده دو به‌صورت الاستیک بود و هیچ خسارتی مشاهده نشد.



شکل (۱۹): جابه‌جایی قائم وسط دهانه دال تحت سناریو P1-1



شکل (۲۰): جابه‌جایی قائم وسط دهانه دال تحت سناریو P1-2

حداکثر جابه‌جایی‌ها و تنش‌های ون‌مایز به‌دست آمده دال مورد نظر تحت هر یک از شناسه‌های بار انفجاری به‌صورت مقادیر جدول (۳) است.

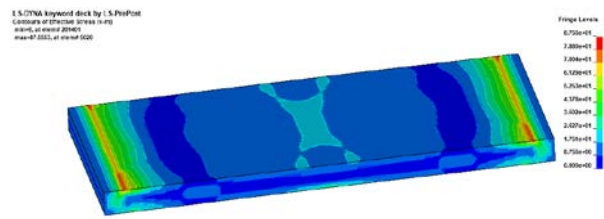
جدول (۳): حداکثر پاسخ دال تحت بارگذاری‌های انفجاری مختلف

شناسه بار	حداکثر جابه‌جایی (mm)	حداکثر تنش ون‌مایز (Pa)
P8-1	۷۴/۸۲	۱۴۳/۵۴
P8-2	۱۹/۴۸	۱۲۲/۵۶
P1-1	۳/۰۶	۸۷/۵۵
P1-2	۱/۴۴	۳۶/۹۷

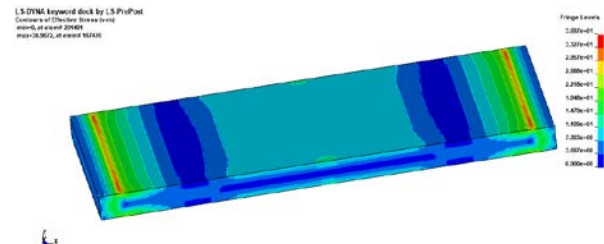
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا مدل‌های عددی رایج برای مصالح فولادی و بتنی و روابط حاکم بر آن‌ها تحت بار انفجار ارائه گردیدند. سپس در ادامه به مدل‌سازی سه بعدی و تحلیل عددی یک دال بتن‌آرمه آزمایش شده توسط لی و همکاران در نرم‌افزار LS-DYNA پرداخته شد. برای این منظور سناریوهای مختلف بارگذاری انفجاری در نظر گرفته شد و پاسخ جابه‌جایی قائم و کانتور کرنش‌های پلاستیک دال تحت هر یک از این سناریوها مورد بررسی قرار گرفت. در این مدل عددی، اثر نرخ کرنش نیز بر رفتار دینامیکی مواد لحاظ گردید. اهم نتایج به‌صورت موارد زیر حاصل گردید:

- محل تشکیل کرنش‌های پلاستیک در وسط دهانه و در محل تکیه‌گاه‌ها رخ داده است که حالت P8-1 بیشترین حالت خرابی و حالت P1-2 کمترین حالت خرابی را نشان می‌دهد.

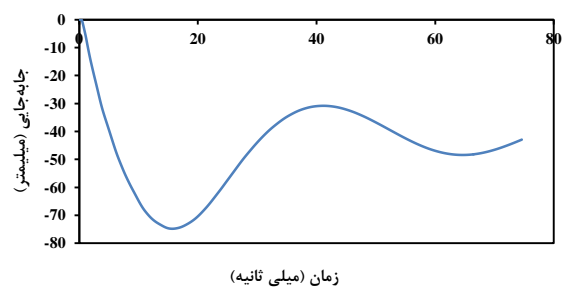


شکل (۱۵): کانتور تنش ون‌مایز دال تحت سناریو P1-1

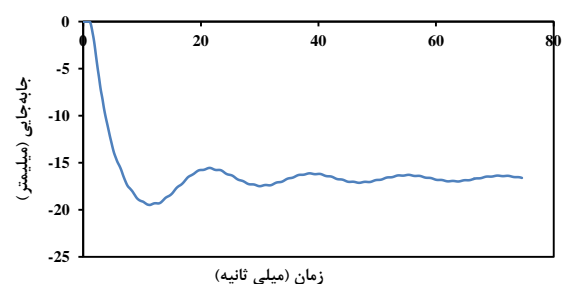


شکل (۱۶): کانتور تنش ون‌مایز دال تحت سناریو P1-2

شکل‌های (۲۰-۱۷) جابه‌جایی‌های قائم وسط دهانه دال تحت سناریوهای مختلف بارگذاری نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مطابق شکل‌های (۱۷ و ۲۰) دال تحت بار انفجار با شدت بیشتر و فاصله کمتر ابتدا بیشترین جابه‌جایی را تجربه و سپس با گذشت زمان جابه‌جایی آن ماندگار می‌شود؛ به عبارت دیگر دال وارد ناحیه پلاستیک خود شده و دچار خرابی با جابه‌جایی‌های پسماند می‌شود. این در حالی است که دال در حالت بار انفجار کم و فاصله زیاد از سطح دال، نسبت به موقعیت اولیه خود با یک پیروید تقریباً یکسان نوسان کرده و دارای جابه‌جایی‌های اندکی خواهد بود که این امر نشان دهنده رفتار الاستیک دال در مقابل اینگونه بارگذاری‌ها می‌باشد.



شکل (۱۷): جابه‌جایی قائم وسط دهانه دال تحت سناریو P8-1



شکل (۱۸): جابه‌جایی قائم وسط دهانه دال تحت سناریو P8-2

- Panels Reinforced with Externally Bonded GFRP Laminates,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 38, no. 5–6, pp. 535–546, Jul. 2007.
- [7] C. Wu, D. J. Oehlers, M. Rebenrost, J. Leach, and A. S. Whittaker, “Blast Testing of Ultra-High Performance Fibre and FRP-Retrofitted Concrete Slabs,” *Eng. Struct.*, vol. 31, no. 9, pp. 2060–2069, Sep. 2009.
- [8] X. Wei and M. G. Stewart, “Model Validation and Parametric Study on the Blast Response of Unreinforced Brick Masonry Walls,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 37, no. 11, pp. 1150–1159, Nov. 2010.
- [9] S. J. Barnett, J.-F. Lataste, T. Parry, S. G. Millard, and M. N. Soutsos, “Assessment of Fibre Orientation in Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete and its Effect on Flexural Strength,” *Mater. Struct.*, vol. 43, no. 7, pp. 1009–1023, 2010.
- [10] T. Ngo, P. Mendis, and T. Krauthammer, “Behavior of Ultrahigh-Strength Prestressed Concrete Panels Subjected to Blast Loading,” *J. Struct. Eng.*, vol. 133, no. 11, pp. 1582–1590, 2007.
- [11] G. Thiagarajan, A. K. Vasudevan, and S. Robert, “Numerical Modeling of Concrete Slabs Reinforced with High Strength Low Alloy Vanadium Steel Bars Subjected to Blast Loads,” *Spec. Publ.*, vol. 281, pp. 1–16, 2011.
- [12] S. N. Mirhashemi, “Investigating the Deflection of Concrete Slabs Reinforced with CFRP and GFRP Plates and Bars,” *Passive Defense Quarterly*, vol. 11, no. 3, pp. 55–65, 2020 (In Persian).
- [13] Ls-Dyna, “Keyword User’s Manual Volume I,” 2007 و [Online] Available: www.lstc.com.
- [14] F. Toutlemonde and P. Rossi, “Review of Strain Rate Effects for Concrete in Tension. Discussion and closure,” *ACI Mater. J.*, vol. 96, no. 5, pp. 735–739, 1999.
- [15] L. J. Malvar and C. A. Ross, “Review of Strain Rate Effects for Concrete in Tension,” *ACI Mater. J.*, vol. 95, no. 6, pp. 735–739, 1998, doi: 10.14359/418.
- [16] L. J. Malvar and J. E. Crawford, “Dynamic Increase Factors for Concrete,” *Naval Facilities Engineering Service Center Port hueneme CA.*, 1998.
- [17] J. Weathersby, “Investigation of Bond Slip between Concrete and Steel Reinforcement under Dynamic Loading Conditions,” Louisiana
- دال تحت بار P8-2 در فاصله مقیاس‌بندی شده ۰/۵ به‌طور کامل تخریب و ترک‌های بزرگی ابتدا در وسط دهانه سپس در محل تکیه‌گاه‌ها رخ داد. اما تحت بار P1-2 در فاصله مقیاس‌بندی شده دو به‌صورت الاستیک بود و هیچ خسارتی مشاهده نشد.
 - دال تحت بار انفجار با شدت بیشتر و فاصله کمتر ابتدا بیشترین جابه‌جایی را تجربه و سپس با گذشت زمان جابه‌جایی آن ماندگار می‌شود؛ به عبارت دیگر دال وارد ناحیه پلاستیک خود شده و دچار خرابی با جابه‌جایی‌های پسماند می‌شود.
 - این در حالی است که دال در حالت بار انفجار کم و فاصله زیاد از سطح دال، نسبت به موقعیت اولیه خود با یک پیوند تقریباً یکسان نوسان کرده و دارای جابه‌جایی‌های اندکی خواهد بود که این امر نشان دهنده رفتار الاستیک دال در مقابل اینگونه بارگذاری‌ها می‌باشد. به‌طوری که حداکثر جابه‌جایی به‌دست آمده از تحلیل عددی دال تحت بار با شناسه P1-2 برابر ۱/۴۴ میلی‌متر به‌دست آمد. در حالی که طبق روابط الاستیک دینامیک سازه‌ها تحت بار ضربه‌ای معادل حداکثر جابه‌جایی الاستیک ۲/۵ میلی‌متر حاصل گردید که علت این تفاوت می‌تواند ناشی از عدم در نظر گرفتن سختی میلگردهای به‌کار رفته در روابط تحلیلی باشد.
- ## ۶- مراجع
- [1] B. Toutlemonde and M. Boulay, “Dynamic Failure Modes of Concrete Slabs: Experimental Evidence and Questions,” *Vicksburg, Mississippi*, 1993.
- [2] J. Myers, A. Belarbi, and K. El-Domiaty, “Blast Resistance of Un-Reinforced Masonry Walls Retrofitted with Fiber Reinforced Polymers,” *Rep. 02-24*, Center for Infrastructure Engineering Studies, Rolla, MO, Jan. 2004.
- [3] A. M. Remennikov and T. A. Rose, “Modelling Blast Loads on Buildings in Complex City Geometries,” *Comput. Struct.*, vol. 83, no. 27, pp. 2197–2205, Oct. 2005.
- [4] K. Xu and Y. Lu, “Numerical Simulation Study of Spallation in Reinforced Concrete Plates Subjected to Blast Loading,” *Comput. Struct.*, vol. 84, no. 5–6, pp. 431–438, Jan. 2006.
- [5] P. F. Silva and B. Lu, “Improving the Blast Resistance Capacity of RC Slabs with Innovative Composite Materials,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 38, no. 5–6, pp. 523–534, Jul. 2007. d
- [6] A. Ghani Razaqpur, A. Tolba, and E. Contestabile, “Blast Loading Response of Reinforced Concrete

- Threats. NATO Science for Peace and Security Series Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht., 2008, pp. 217–238.
- [19] J. Li, C. Wu, and H. Hao, “An Experimental and Numerical Study of Reinforced Ultra-High Performance Concrete Slabs under Blast Loads,” *Mater. Des.*, vol. 82, pp. 64–76, Oct. 2015.
- State University and Agricultural & Mechanical College., 2003.
- [18] J. (Jaap) Weerheijm, A. Doormaal, and J. M. Villa, “Concrete Structures Under Blast Loading Dynamic Response, Damage, and Residual Strength,” In: Pasman, H.J., Kirillov, I.A. (eds) *Resilience of Cities to Terrorist and other*

Numerical Assessment of the Reinforced Ultra-High Performance Concrete Slab Subjected to Blast loading

M. Mokhtari, M. Ebrahimi*

Abstract

The ultra-high performance concrete which has high ductility and toughness, is widely used in the construction of new structures. The key feature of ultra-high performance concrete is that it has a very high potential in bearing strong loads such as impact loads or explosions. In this paper a 3D model of an ultra-high performance concrete slab is modeled and subjected to blast loading in LS-DYNA finite element software. To this end, different scenarios of blast loading are selected and the responses including the vertical displacement and the plastic strain contour of the slab are determined under each scenario. In this numerical model, the effect of strain rate on the dynamic behavior of materials is also considered. It is observed that when the slab is subjected to a shorter distance and stronger blast load, it first experiences the largest displacement and after that the displacement decreases and remains constant. However, in the case of exposure to a weaker blast load at a longer distance from the surface of the slab, the slab fluctuates relative to the initial position with an almost constant fluctuation period and has little displacements.

Key Words: *RC Slab, Ultra-High Performance Concrete, Numerical Analysis, Blast*