

حل سیستم تک درجه آزادی دال بتن مسلح دوطرفه تحت بارگذاری انفجاری

سجاد پیمانی فروشانی^۱، سید احمد حسینی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹)

چکیده

دال‌های بتن مسلح از پرکاربردترین اعضای سازه‌ای مقاوم در برابر انفجار هستند. رفتار دال بتن مسلح در بارگذاری انفجاری پیچیده و غیرخطی است. برحسب مقدار ماده منفجره، وضعیت تکیه‌گاه‌ها، نسبت تسلیح و غیره، آسیب و خیز حداکثر در دال متفاوت خواهد بود. در این پژوهش روش تحلیلی بر مبنای حل سیستم تک درجه آزادی برای محاسبه خیز حداکثر دال بتن مسلح دوطرفه تحت بار انفجار پیشنهاد شد. با حل معادلات سیستم تک‌درجه آزادی دال، محاسبه پاسخ‌های حداکثر و مقایسه آن با نتایج تحلیل‌های غیرخطی با نرم‌افزار LS-Dyna و پاسخ‌های دستورالعمل ۳-۳۴۰-۰۲ UFC مشخص شد که در اکثر شرایط بارگذاری و هندسه دال، نتایج تحلیل تک‌درجه آزادی ارائه شده، اقتصادی‌تر از پاسخ‌های دستورالعمل UFC می‌باشد. همچنین نمودارهای پاسخ دستورالعمل ۳-۳۴۰-۰۲ UFC و رابطه ایمپالس در بازه‌های زمانی محدودی قادر به محاسبه پاسخ اعضای خمشی است اما روش تحلیلی مورد بررسی، برای تمام شرایط بارگذاری و هندسی دال پاسخگو می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: دال بتن مسلح، بارگذاری انفجاری، سیستم تک‌درجه آزادی، تحلیل غیرخطی، دستورالعمل ۳-۳۴۰-۰۲ UFC

SDOF System Solution of the Two-Way RC Slab Subjected to Blast Loading

S. Peimani, S. A. Hosseini*

Malek Ashtar University of Technology, Tehran

(Received: 03/07/2020; Accepted: 18/04/2021)

Abstract

Reinforced concrete slabs are one of the most frequently used blast-resistant structural elements. The RC slab behavior under blast loading is nonlinear and complicated. The maximum slab displacement differs by the amount of explosive, support conditions, steel ratio, etc. In the present paper, the maximum deflection of two-way RC slabs subjected to blast loading is studied. To this purpose, the RC slabs are replaced by SDOF equivalent systems with bilinear stiffnesses through determining the equivalent mass and stiffness. The results of comparing the analytical proposed method with the nonlinear analysis by the LS-Dyna software and the method specified by UFC 3-340-02 guideline show that in most loading conditions and slab geometries, the output of proposed method is more economical than the UFC guideline. In addition, whilst the UFC method is not applicable for all time ranges, the proposed method can determine the structural element response at any time range.

Keywords: RC Slab, Blast, System with a Single degree of Freedom, Non-Linear Analysis, UFC 3-340-02 Guideline

* Corresponding Author E-mail: hoseini@mut.ac.ir

۱- مقدمه

دال‌های بتن مسلح از پرکاربردترین اعضای سازه‌های مقاوم در برابر انفجار هستند. رفتار دال بتن مسلح در بارگذاری انفجاری پیچیده و غیرخطی است. برحسب مقدار ماده منفجره، وضعیت تکیه‌گاه‌ها، نسبت تسلیح و غیره آسیب و خیز حداکثر متفاوت خواهد بود. به دلیل نرخ بارگذاری بالا و غیرخطی بودن رفتار مصالح، عموماً از تحلیل‌های غیرخطی تحت بارگذاری دینامیکی برای تعیین پاسخ دال‌های تحت انفجار استفاده می‌شود [۱]. امروزه در کشورهای دنیا مطالعات گسترده‌ای در زمینه دال‌های بتن مسلح تحت بارهای انفجاری و عکس‌العمل آن‌ها در برابر موج انفجار صورت می‌گیرد. برای تعیین پاسخ دال‌های تحت بارگذاری انفجاری روش‌های تحلیلی متفاوتی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به ۲ دسته کلی (۱) روش‌های تحلیلی فرم بسته (۲) روش‌های حل عددی تقسیم کرد که هرکدام از این روش‌ها می‌توانند مزایا و معایبی نسبت به یکدیگر داشته باشند. در روش تحلیلی به فرم بسته می‌توان عضو سازه‌ای را به یک سیستم تک درجه آزادی ساده‌سازی کرد و از طریق حل معادله حرکت آن به پاسخ خیز حداکثر آن دست‌یافت. از طرفی از بین مراجع موجود، دستورالعمل وزارت دفاع ایالات متحده ۰۲-۳۴۰-۳ UFC یکی از مراجع پرکاربرد در این زمینه می‌باشد. این دستورالعمل نیز برای تعیین پاسخ خیز حداکثر دال بتن مسلح به روش حل سیستم تک درجه آزادی عمل کرده است، با این فرض که تابع ساده‌شده مثلثی را به‌عنوان تابع بارگذاری انفجاری در نظر می‌گیرد. با این وجود جزئیات حل سیستم تک درجه آزادی و نحوه محاسبه پاسخ‌ها بیان نشده است و صرفاً به ارائه خیزهای حداکثر اکتفا شده است؛ بنابراین لزوم ارائه روش‌های تحلیلی ساده و درعین حال با دقت مناسب، جهت محاسبه خیز دال‌های بتن مسلح و مقایسه آن، با روش‌های پیچیده و دقیق دینامیکی غیرخطی و روش نموداری دستورالعمل ۰۲-۳۴۰-۳ UFC احساس می‌شود.

در این زمینه مطالعاتی توسط محققین صورت گرفته که از جمله آن‌ها، در پژوهشی چانگ و همکارش [۲] یک معادله طراحی ساده برای ارزیابی حداکثر خیز الاستیک دال‌های دوطرفه تحت بارگذاری یکنواخت ارائه کردند. این معادله از طریق مبانی تئوری صفحات و نیز کالیبره کردن آن توسط تحلیل اجزاء محدود و مطالعات آزمایشگاهی به‌دست آمد. در تحقیقی دیگر رانگ با کمک همکار خود [۳] روش طراحی اعضای خمشی بتن مسلح را به‌صورت سیستم تک درجه آزادی موردبررسی قرار دادند و با مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و نتایج حاصل از سیستم معادل‌سازی شده تک‌درجه آزادی، ضرایبی را برای اصلاح روش طراحی به‌صورت سیستم تک‌درجه آزادی معادل ارائه کردند. سپس آل دهاخنی و همکاران [۴] مدل چند درجه آزادی بررسی

کردند و رفتار غیرخطی سازه‌های بتن مسلح، مقاومت مواد و وابستگی تغییر شکل بر روی نرخ کرنش را مورد ارزیابی قرار دادند. تحلیل‌های دینامیکی بر روی دو عضو سازه‌ای با ترکیبات متفاوت ایمپالس و فشار انفجار انجام شد. تأثیر تفاوت تعداد درجات آزادی از طریق افزایش تعداد گره‌ها بررسی و نتایج مدل چند درجه آزادی با مدل‌های تک درجه آزادی موجود مقایسه شد. نتایج حاکی از برتری مدل چند درجه آزادی نسبت به تک درجه آزادی بود. ایشان در ادامه تحقیقات خود، صحت مدل یک درجه آزادی برای دال‌های بتن مسلح دوطرفه تحت بارگذاری انفجاری را موردبررسی قرار داد. سیستم تک درجه آزادی بر اساس دستورالعمل UFC به‌صورت برنامه فرترن، برنامه‌نویسی و پاسخ این سیستم‌ها تحت بار انفجار ارزیابی شد. این برنامه بر اساس تغییر مولفه‌های ابعاد، نسبت میلگرد و شرایط تکیه‌گاهی، قابلیت ارائه نمودارهای فشار-ایمپالس برای دهانه‌های مختلف دال بتن مسلح دوطرفه را دارد. در این تحقیق همچنین برخی از محدودیت‌های سیستم تک درجه آزادی برای شبیه‌سازی دال دوطرفه نشان داده شد [۵]. محمد و همکاران [۶] در تحقیقی به حل فرم بسته^۱ برای روابط $P-\Delta$ اعضای بتن مسلح مبادرت کردند. نتایج تحقیق آن‌ها شامل روابطی برای تعیین لنگر- دوران این اعضا بود. همچنین برخی پژوهشگران معادل‌سازی اعضای یک‌طرفه خمشی را به‌صورت سیستم تک درجه آزادی تحت بار انفجار را موردتوجه قرار دادند [۹-۷]. به‌عنوان مثال استچینو و همکارش [۱۰] تیرهای بتن مسلح تحت بارهای ایمپالسی را موردبررسی قرار دادند. آن‌ها دو طرح سیستم تک درجه آزادی با در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش، برای پیش‌بینی پاسخ تیر ارائه کردند و نتایج آن را با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. هاو به‌همراه تیم تحقیقاتی خود [۱۱] در نوشتاری پاسخ‌های سازه‌ای به بارهای دینامیکی با نرخ بارگذاری‌های مختلف را بررسی و تفاوت‌های پاسخ‌های سازه تحت بار با نرخ بارگذاری کم و زیاد را ارزیابی کردند. در پژوهشی دیگر کریستوفرسن و همکاران [۱۲] پاسخ دال‌های بتن مسلح معمولی تحت بار انفجار را مورد مطالعه عددی و آزمایشگاهی قرار دادند و عملکرد این دال‌ها را ارزیابی کردند. در سال‌های اخیر نیز عده‌ای از محققین بر روی تیرها و دال‌های ساندویچی لانه‌زنبوری [۱۴-۱۳]، بتن- فولاد- بتن [۱۵] و نیز فولاد- بتن- فولاد [۱۷-۱۶] و تأثیرپذیری آن‌ها تحت بار ضربه و انفجار تحقیقات گسترده‌ای انجام دادند؛ به‌عنوان مثال منگ و همکاران [۱۸] پاسخ دینامیکی پوسته‌های ساندویچ پنل فولاد- بتن- فولاد تحت بار انفجار را بررسی و پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت سازه را تعیین نمودند. در پژوهشی دیگر وانگ و همکاران [۱۹] بر روی توسعه نمودارهای $P-I$ برای پوسته‌های ساندویچی منحنی فولاد- بتن- فولاد تحت بارگذاری

^۱ Closed formed solutions

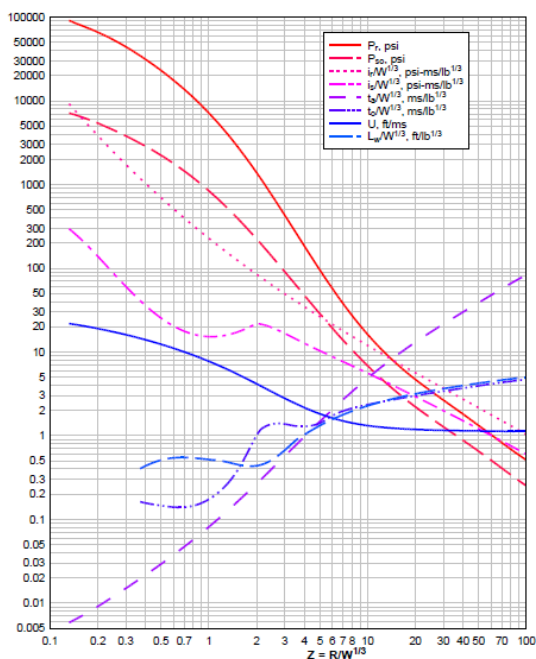
۲-۳- ضریب کاهش موج انفجار (b)

پارامتر کاهش موج در واقع توصیف کننده شکل موج می باشد. این پارامتر به عنوان فاکتوری قابل تنظیم انتخاب می شود به طوری که شرایطی را برای نمودار فشار-زمان فراهم کند تا بتواند مقدار ایمپالس مناسبی را برای موج انفجار بدهد. این پارامتر، پارامتری بدون بعد است. روش های زیادی برای تعیین این پارامتر بر اساس فشار و ایمپالس وجود دارد [۲۳].

یکی از روش های مناسب برای محاسبه پارامتر b، مساوی قرار دادن سطح زیر نمودار فشار-زمان انفجار با مقدار تکانش می باشد [۲۳].

$$i_r = \int_0^{t_d} p_r(t) dt = p_r t_d \left[\frac{1}{b} - \frac{(1 - e^{-b})}{b^2} \right] \quad (2)$$

در رابطه (۲) مقادیر i_r ، P_r و t_d برحسب وزن ماده منفجره و فاصله از محل انفجار به وسیله شکل (۲) تعیین می شود.



شکل ۲. مولفه های انفجار برای ماده منفجره TNT کروی [۲۰].

۲-۴- حل سیستم تک درجه آزادی تحت بار دینامیکی

یکی از روش های محاسبه پاسخ عضو سازه ای، معادل سازی آن به صورت سیستم تک درجه آزادی می باشد. به این صورت که جرم، میرایی و سختی عضو به صورت یک سیستم تک درجه آزادی معادل سازی می شود (شکل ۳) و معادله حرکت آن به این صورت بیان می شود:

$$F - kx - cv = Ma$$

انفجاری کار کردند و در نتیجه آن، طراحی این نوع پوسته ها در برابر انفجار با کمک نمودار فشار-ایمپالس ارائه شد.

همان طور که مشاهده شد اکثر تحقیقات مرتبط با پاسخ دال بتن مسلح تحت بار انفجار، در حوزه تحلیل های دینامیکی غیرخطی، نحوه شبیه سازی و غیره می باشند، اما در مورد تحلیل دینامیکی تک درجه آزادی دال ها تحت بار انفجار واقعی و مقایسه آن با روش های دقیق تر غیرخطی، بررسی صورت نگرفته است.

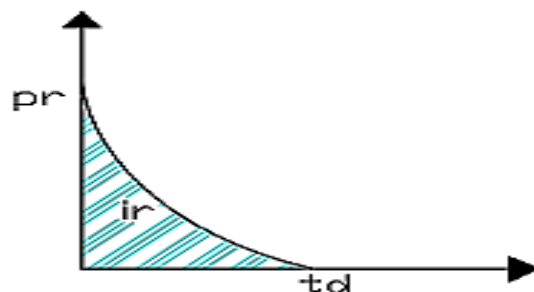
۲- میانجی تئوری و معادلات حاکم

۲-۱- رابطه فشار- زمان انفجار

هنگامی که انفجار رخ می دهد انتشار سریع انرژی از طریق هوا منتقل می شود. در شرایط ایدئال فشار در یک نقطه فوراً افزایش می یابد و به حداکثر مقدار آن می رسد، سپس با یک نرخ نمایی کاهش یافته و به فشار محیط بازمی گردد [۲۰].

کاهش نمایی نمودار فشار- زمان معمولاً با رابطه فریدلندر نمایش داده می شود. این رابطه را می توان به صورت زیر ارائه نمود [۲۱].

$$P = P_r \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-\frac{b-t}{t_d}} \quad (1)$$



شکل ۱. تابع نمایی انفجار.

در آن P فشار، Pr بیشینه فشار بازتابی، t زمان، t_d مدت زمان فاز مثبت فشار انفجار و b ضریب کاهش موج انفجار است. در این رابطه ضریب b نرخ کاهش فشار را توصیف می کند و مقدار آن بر اساس فشارهای بازتابی یا فشار رویداد متفاوت خواهد بود.

۲-۲- فاصله مقیاس شده (Z)

بار ناشی از انفجار به دو پارامتر مستقل وزن ماده منفجره (W) و فاصله از محل انفجار (R) وابسته است. فاصله مقیاس شده (Z) برابر نسبت وزن ماده منفجره به ریشه سوم فاصله می باشد که یکی از مهم ترین پارامترها برای در نظر گرفتن فاصله و وزن ماده منفجره در تعیین میزان شدت انفجار است [۲۲].

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

اما همان طور که از شکل مشخص است، این نمودارها حداکثر برای محدوده $0.1 < r_u/P < 2$ و $0.1 < T/T_N < 2.0$ قادر به تعیین پاسخ می باشد و خارج از آن نمی توان به این روش استناد کرد.

۲-۵-۲- رابطه ایمپالس

ظرفیت ایمپالسی انفجار در یک المان برای تغییر شکل محدود طبق دستورالعمل ۰۲-۳۴۰-۳ UFC به صورت زیر ارائه شده است [۲۰].

$$\frac{i_b^2}{2m_u} = r_u X_1 + \frac{m_u}{m_{up}} r_{up} (X_m - X_1) \quad (3)$$

رابطه (۳) فقط در محدوده زمانی زیر قابل استفاده است:

$$\frac{t_m}{t_d(\text{triangular})} > 3 \quad (4)$$

در رابطه (۴) t_m به این صورت محاسبه می شود:

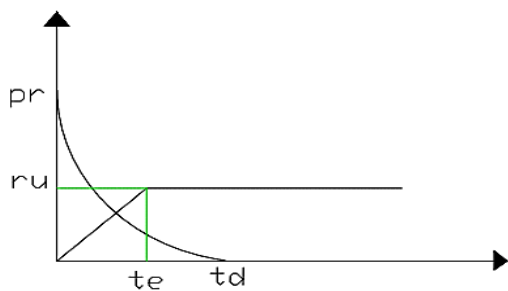
$$t_m = \frac{i_b}{r_u} \left[3 - \frac{m_u}{2m_a} \right] + \frac{1}{r_u} \left[\frac{m_u}{2m_a} - 1 \right] \left[9i_b^2 - 6m_a r_u X_E \right]^{1/2} \quad (5)$$

در روابط فوق i_b بار ایمپالس اعمال شده، X_m تغییر شکل حداکثر، X_E خیز الاستیک معادل، X_1 خیز زوال جزئی، t_m زمان رسیدن به خیز حداکثر، m_u جرم واحد مؤثر نهایی، m_{up} جرم واحد مؤثر پس از زوال جزئی، m_a میانگین جرم واحد مؤثر الاستیک و پلاستیک و r_{up} مقاومت واحد پس از زوال جزئی است.

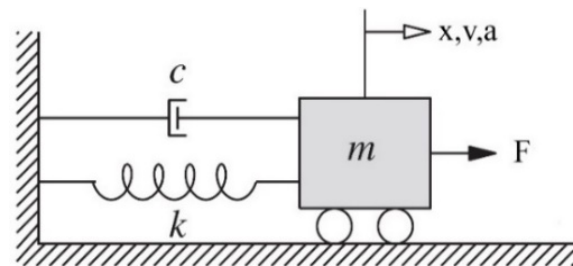
۳- تحلیل دینامیکی سیستم تک درجه آزادی دال دوطرفه بتن مسلح

برای تعیین خیز حداکثر دال دوطرفه به روش سیستم تک درجه آزادی، می توان حالت های مختلف پاسخ سازه را بر اساس زمان رسیدن به خیز الاستیک معادل (t_e) و مدت تداوم بارگذاری (t_d) به دو صورت کلی زیر تقسیم بندی کرد:

- (الف) $t_e < t_d$ (شکل ۵)
- (ب) $t_e > t_d$ (شکل ۶)



شکل ۵. رفتار سازه در حالت $t_e < t_d$.



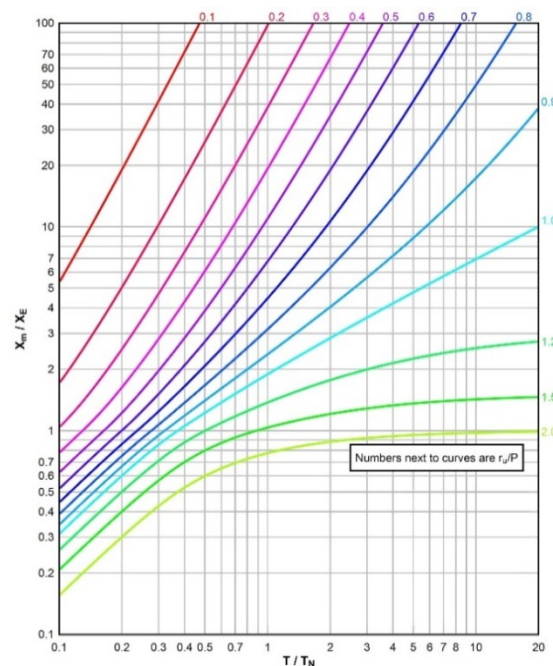
شکل ۳. معادل سازی سیستم تک درجه آزادی [۲۵].

در آن نیروی خارجی و k, c, M به ترتیب سختی، میرایی و جرم معادل سیستم تک درجه آزادی است [۲۰]. از طرفی در بارگذاری انفجاری به دلیل این که پاسخ بیشینه در سیکل اول نمودار جابه جایی برحسب زمان اتفاق می افتد و میرایی تأثیر چندانی در پاسخ سیکل اول ندارد و به علاوه انرژی که از طریق تغییر شکل پلاستیک سازه مستهلک می شود بسیار بیشتر از انرژی مستهلک شده توسط میرایی عضو است، در جهت اطمینان از میرایی عضو صرف نظر می شود [۲۰].

۲-۵-۲- محاسبه خیز حداکثر دال دوطرفه با استفاده از دستورالعمل UFC

۲-۵-۱- نمودارهای پاسخ UFC

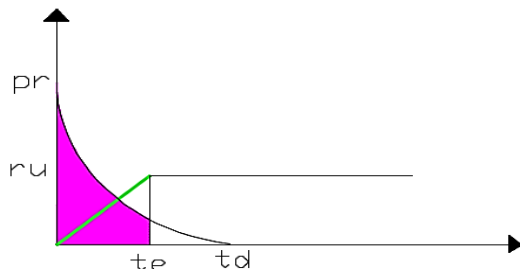
طبق دستورالعمل ۰۲-۳۴۰-۳ UFC برای تعیین میزان خیز حداکثر عضو خمشی (X_m) لازم است پس از تعیین خیز الاستیک (X_E)، میزان فشار واحد (P)، مقاومت واحد نهایی (r_u)، مدت زمان تداوم فاز مثبت (T) و دوره تناوب اصلی سازه (T_N)، با مراجعه به شکل (۴) میزان خیز حداکثر (X_m) محاسبه شود.



شکل ۴. تعیین پارامتر X_m / X_E [۲۰].

۳-۱-۱- بررسی رابطه (۶) ($t < t_e < t_d$)

در ابتدای شروع بارگذاری رفتار سیستم خطی است و رابطه نیرو- تغییر مکان خطی در نظر گرفته می‌شود. با فرض رفتار الاستیک، تغییر مکان حداکثر و زمان متناظر با آن به دست می‌آید. حال اگر زمان به دست آمده در بازه موردنظر رابطه (۶) قرار داشت و خیز حداکثر آن از خیز الاستیک معادل (X_E) کوچک‌تر بود محاسبات تمام شده تلقی می‌شود و سیستم وارد فاز پلاستیک نمی‌شود (شکل ۷). در غیر این صورت سیستم وارد مرحله بعد می‌شود.



شکل ۷. پاسخ در بازه زمانی $t < t_e < t_d$

برای حل معادله (۶)، جواب کلی به صورت جمع جواب عمومی و خصوصی معادله می‌باشد:

الف) جواب عمومی

$$u_c = C_1 \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right) + C_2 \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right) \quad (9)$$

ب) جواب خصوصی

$$u_p = (At + B)e^{-b\frac{t}{t_d}} \quad (10)$$

که در آن

$$A = \frac{-(p_r \times t_d)}{(mb^2 + kt_d^2)} \quad (11)$$

$$B = \frac{P_r t_d^2 (mb^2 - 2mb + kt_d^2)}{(mb^2 + kt_d^2)^2} \quad (12)$$

بنابراین جواب کلی به صورت خواهد بود.

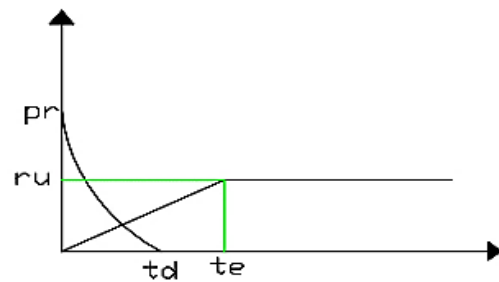
$$u_1 = u_c + u_p \quad (13)$$

برای تعیین ضرایب C_1 و C_2 از شرایط مرزی زیر استفاده می‌شود.

$$\begin{cases} u_1(0) = 0 \\ \dot{u}_1(0) = 0 \end{cases}$$

۳-۱-۲- بررسی رابطه (۷) ($t_e < t < t_d$)

در این مرحله سیستم وارد مرحله پلاستیک و سختی آن صفر می‌باشد. همان طوری که در شکل (۸) مشخص است همچنان سازه تحت تأثیر بار قرار دارد. شرایط انتهایی مرحله قبل یعنی تغییر



شکل ۶. رفتار سازه در حالت $t_e > t_d$

۳-۱-۳- محاسبه خیز حداکثر در حالت اول ($t_e < t_d$)

هنگامی که زمان رسیدن به خیز الاستیک معادل کوچک‌تر از مدت تداوم بارگذاری می‌باشد ($t_e < t_d$)، خیز حداکثر دال در یکی از حالت‌های زیر اتفاق می‌افتد:

$$m\ddot{u} + ku = P_r \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-b\frac{t}{t_d}} \quad t < t_e < t_d \quad (6)$$

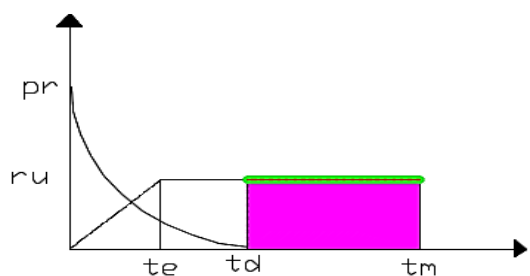
$$m\ddot{u} + r_u = P_r \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-b\frac{t}{t_d}} \quad t_e < t < t_d \quad (7)$$

$$m\ddot{u} + r_u = 0 \quad t_e < t_d < t \quad (8)$$

بدین معنا که در رابطه (۶) رفتار سازه در محدوده الاستیک است و تحت بارگذاری است، در رابطه (۷) سازه وارد فاز پلاستیک شده است ولی همچنان تحت بارگذاری قرار دارد و نهایتاً در رابطه (۸) سازه وارد مرحله ارتعاش آزاد می‌شود و در فاز پلاستیک قرار دارد.

با توجه به اینکه در روش پیشنهادی، محدوده حداکثر پاسخ به صورت روابط مجزا ارائه شده است، بنابراین در هر کدام از روابط، محدوده حداکثر پاسخ‌ها و نوع رفتار سازه (الاستیک یا پلاستیک) مشخص است و مقادیر m و k برای هر مرحله به صورت جداگانه و منحصر به فرد به دست می‌آید و نیازی به تغییر و به‌روزرسانی نیست. در روابط فوق، m همان m_e در دستورالعمل ۳-۳۴۰-۰۲ UFC است که برابر $m \times k_{lm}$ می‌باشد (در این رابطه m جرم المان است). مقدار k_{lm} بسته به این که پاسخ حداکثر در چه محدوده‌ای باشد، محاسبه می‌شود؛ مثلاً در رابطه (۶) که پاسخ حداکثر در محدوده الاستیک است، k_{lm} طبق جدول (۳-۱۳) ufc که مربوط به محدوده الاستیک پاسخ‌ها است، حساب می‌شود. در رابطه (۷ و ۸) که پاسخ حداکثر در محدوده پلاستیک قرار دارد k_{lm} از شکل (۳-۴۴) ufc به دست می‌آید.

جهت تعیین سختی در رابطه (۶) که مربوط به محدوده الاستیک است، k همان سختی معادل می‌باشد که از تبدیل نمودار واقعی مقاومت- خیز دال دوطرفه به نمودار معادل دوخطی به دست می‌آید. جزئیات این روش در بخش ۳-۱۴ دستورالعمل ufc آمده است [۲۰].



شکل ۹. پاسخ در بازه زمانی $t_e < t_d < t$

با حل این معادله جوابها به صورت زیر خواهد بود:

$$u_3 = c_1'' + c_2''t - \frac{r_u}{2m}t^2 \quad (20)$$

با توجه به شرایط مرزی، ضرایب ثابت به دست خواهد آمد:

$$\begin{cases} u_2(t_d) = u_3(t_d) \rightarrow c_1'' \\ \dot{u}_2(t_d) = \dot{u}_3(t_d) \rightarrow c_2'' \end{cases}$$

۳-۲-۲- خیز حداکثر در حالت دوم ($t_d < t_e$)

در این حالت نیز برای محاسبه زمان خیز حداکثر، معادلات زیر باید به ترتیب بررسی شود.

$$m\ddot{u} + ku = P_r \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-b \cdot t/t_d} \rightarrow t < t_d < t_e \quad (21)$$

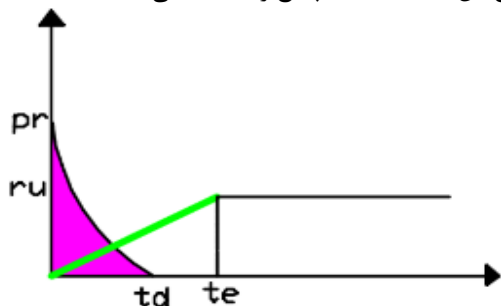
$$m\ddot{u} + ku = 0 \rightarrow t_d < t < t_e \quad (22)$$

$$m\ddot{u} + r_u = 0 \rightarrow t_d < t_e < t \quad (23)$$

بدین معنا که در رابطه (۲۱ و ۲۲) رفتار سازه در محدوده الاستیک است و به ترتیب در حالت بارگذاری اجباری و ارتعاش آزاد قرار دارد، درحالی که در رابطه (۲۳) سازه وارد محدوده پلاستیک می شود و در حالت ارتعاش آزاد قرار گرفته است.

۳-۲-۱- بررسی رابطه (۲۱): ($t < t_d < t_e$)

پاسخ این معادله همانند پاسخ رابطه (۶) می باشد.



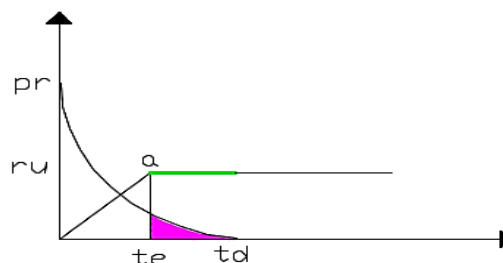
شکل ۱۰. محدوده پاسخ در بازه زمانی $t < t_d < t_e$

۳-۲-۲- بررسی رابطه (۲۲): ($t_d < t < t_e$)

با حل این معادله جواب به صورت زیر خواهد شد:

$$u = c_1' \cos \omega t + c_2' \sin \omega t \quad (24)$$

مکان و سرعت در نقطه a به عنوان شرایط اولیه این مرحله خواهد بود. با حل معادله مربوطه خیز حداکثر و زمان متناظر با آن به دست می آید. اگر زمان به دست آمده مطابق با بازه زمانی رابطه (۷) باشد، محاسبات تمام شده است، در غیر این صورت سیستم وارد مرحله بعد می شود.



شکل ۸. پاسخ در بازه زمانی ($t_e < t < t_d$)

با حل این معادله جوابها به صورت زیر خواهد بود:

الف) جواب عمومی

$$u_C = c_1' + c_2't \quad (14)$$

ب) جواب خصوصی اول:

$$u_{P1} = (A't + B') e^{-\frac{bt}{t_d}} \quad (15)$$

که در آن:

$$A' = \frac{-t_d \times P_r}{m \times b^2} \quad (16)$$

$$B' = \frac{(b-2) P_r \times t_d^2}{m \times b^3} \quad (17)$$

ج) جواب خصوصی دوم:

$$u_{P2} = \frac{-r_u}{2m} t^2 \quad (18)$$

بنابراین پاسخ معادله (۷) به این صورت خواهد بود:

$$u_2 = u_{P1} + u_{P2} + u_C \quad (19)$$

با توجه به پاسخ به دست آمده می توان ضرایب ثابت جواب

عمومی را با توجه به شرایط معادله اول به دست آورد:

$$\begin{cases} u_2(t_e) = u_1(t_e) = u_e \rightarrow c_1' \\ \dot{u}_2(t_e) = \dot{u}_1(t_e) \rightarrow c_2' \end{cases}$$

۳-۱-۳- بررسی رابطه (۸): ($t_e < t_d < t$)

در این مرحله سیستم از حالت بارگذاری اجباری خارج شده و پاسخ سیستم در حالت ارتعاش آزاد بررسی می شود. شرایط انتهایی مرحله قبل به عنوان شرایط مرزی این مرحله در نظر گرفته می شود.

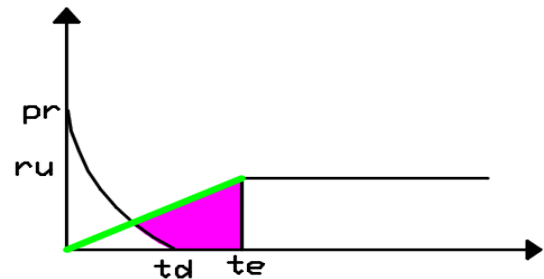
است که در آن‌ها مواد (حتی جامدات) به دلیل شدت بارهای وارده به صورت سیال رفتار می‌کنند و یکی از دلایل نام‌گذاری این نرم‌افزارها نیز همین پدیده است [۲۴]. از جمله هایدروکدهای شناخته‌شده و پرکاربرد، نرم‌افزار LS-Dyna است که به دلیل دارا بودن محدوده وسیعی از مدل‌های مواد به‌خوبی از قابلیت شبیه‌سازی انفجار بهره‌مند است [۲۵].

۴-۱- معرفی نرم‌افزار و نحوه مدل‌سازی

در این پژوهش جهت شبیه‌سازی بتن، المان Solid و مدل ماده Concrete_Damage_REL3 به‌کاررفته است. این مدل اثرات نرخ کرنش را در نظر می‌گیرد [۲۶]. به‌منظور مدل‌سازی میلگردها از المان Beam و مدل ماده Plastic Kinematic که اثرات نرخ کرنش را در نظر می‌گیرد، استفاده شده است. برای اندرکنش بین دو جسم در این نرم‌افزار از بخش Constrained استفاده می‌شود و به‌وسیله آن درجه آزادی اجسام مقید می‌شود تا به نحوی با یکدیگر حرکت کنند. به منظور تعریف اندرکنش بین میلگرد و بتن در این بخش از ابزار lagrange in solid استفاده می‌شود [۲۷]. در نرم‌افزار LS-Dyna نمودار تاریخچه فشار-زمان بارگذاری انفجاری با استفاده از روش CONWEP که یک تابع بارگذاری انفجاری به‌صورت تجربی می‌باشد و بر اساس محدوده وسیعی از داده‌ها و اطلاعات آزمایشی فراهم شده است، به‌دست می‌آید. در روش CONWEP مقدار ماده منفجره TNT و موقعیت قرارگیری آن به‌عنوان اطلاعات اولیه دریافت می‌شود و با توجه به نتایج آزمایشی فراهم شده مربوط به گستره وسیعی از انفجارها، میزان فشار وارده نسبت به زمان تعیین می‌شود. با تعیین قسمت‌هایی از هدف که انفجار به آن‌ها فشار وارد می‌کند بارگذاری حاصل از انفجار به هدف اعمال می‌شود [۲۵].

۴-۲- صحت‌سنجی مدل عددی

برای اطمینان از صحت مدل عددی پیشنهادی، از نتایج مطالعات جیای و همکاران [۲۸] استفاده شده است. ایشان یک دال بتن مسلح چهار طرف گیردار را تحت انفجارهای مختلف قرار دادند و خیز و آسیب دال را به وسیله تحلیل اجزا محدود تعیین کردند (شکل ۱۳). در شکل (۱۴) کانتور فشار پیشروی موج انفجار بر روی دال بتنی حاصل از شبیه‌سازی این تحقیق نشان داده شده و نتایج خیز دال بر اساس شبیه‌سازی عددی برای مقادیر مختلف TNT در جدول (۱) ارائه شده است.



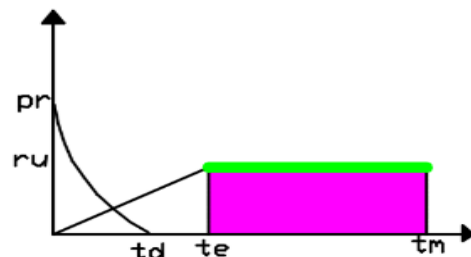
شکل ۱۱. محدوده پاسخ در بازه زمانی $t_d < t < t_e$

برای به‌دست آوردن ضرایب C'_1 و C'_2 باید شرایط مرزی حالت مذکور و بخش ۳، ۲، ۱ در زمان t_d برابر قرار داده شده و با حل دو معادله دو مجهول، ضرایب محاسبه شود:

$$\begin{cases} u_2(t_d) = u_1(t_d) \\ \dot{u}_2(t_d) = \dot{u}_1(t_d) \end{cases}$$

۳-۲-۳- بررسی رابطه (۲۳): $(t_d < t_e < t)$

پاسخ این معادله همانند پاسخ رابطه (۸) می‌باشد.



شکل ۱۲. محدوده پاسخ در بازه زمانی $t_d < t_e < t$

با توجه به شرایط مرزی زیر، ضرایب C''_1 و C''_2 محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} u_2(t_e) = u_3(t_e) \rightarrow C''_1 \\ \dot{u}_2(t_e) = \dot{u}_3(t_e) \rightarrow C''_2 \end{cases}$$

۴- شبیه‌سازی دال بتن مسلح دوطرفه تحت بار انفجار با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود LS-Dyna

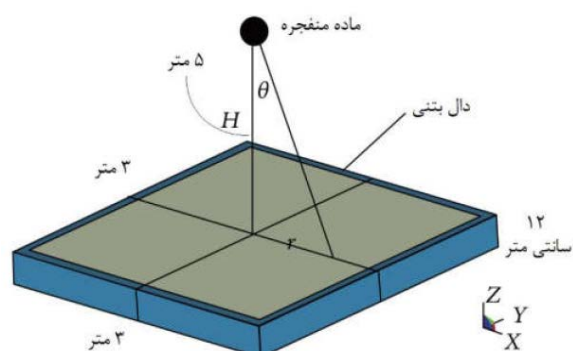
مباحث دینامیکی با نرخ بسیار بالا، از جمله مسائلی هستند که به‌شدت غیرخطی بوده و حتی با پیشرفت‌های امروزی بشر نیز رسیدن نتایج به حد انطباق بر واقعیت به‌راحتی امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین برای شبیه‌سازی این دسته از مسائل، نرم‌افزارهای ویژه‌ای تدارک دیده شده‌اند که به نام هایدروکد^۱ خوانده می‌شوند. تفاوت اصلی این نرم‌افزارها، قابلیت ویژه آن‌ها در شبیه‌سازی مسائلی

^۱ Hydrocode

مشخصات سازه‌ای و بارگذاری آن نمونه‌های مختلفی ساخته می‌شود و مورد تحلیل قرار می‌گیرند. این دال به صورت یک دال چهار طرف گیردار می‌باشد که مشخصات سازه‌ای آن در جدول (۲) قابل مشاهده است.

جدول ۲. مشخصات سازه‌ای دال مینا

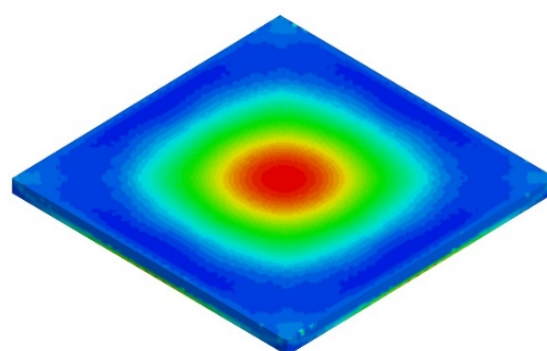
ضخامت (cm)	عرض (m)	طول (m)
۳۰	۴	۸
تنش تسلیم فولاد (MPa)	مقاومت فشاری بتن (MPa)	مساحت میلگرد (cm ² /m)
۴۵۰	۲۷	۴/۸۶



شکل ۱۳. هندسه دال بتنی [۲۸]

۵-۲- تعیین خیز حداکثر دال مینای دوطرفه تحت انفجارهای مختلف

برای اینکه دقت روش تحلیلی پیشنهادی در انفجارها با شدت مختلف بررسی شود، ابتدا پاسخ دال مینا تحت انفجار بافاصله و مقادیر مختلف ماده منفجره TNT مورد بررسی قرار گرفت. برای نیل به این مقصود، دال مینا تحت بارگذاری‌های انفجاری با فواصل



شکل ۱۴. کانتور فشار پیشروی موج انفجار بر روی دال بتنی

مقیاس شده (Z) ۳/۶، ۴/۸ و ۸/۳ (m/kg^{1/3}) و فواصل انفجاری مختلف قرار گرفت. در شکل‌های (۱۵ و ۱۶) و به عنوان نمونه خیز حداکثر دال مینا تحت فاصله مقیاس شده

۳/۶ و ۸/۳ (m/kg^{1/3}) نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است در فاصله مقیاس شده ۳/۶ که جزو انفجارهای حوزه نزدیک محسوب می‌شود و شرایط ایمپالس حاکم می‌باشد نتایج رابطه ایمپالس و رابطه تحلیلی پیشنهادی تقریباً بر هم منطبق بوده و اختلاف کمی (کمتر از ۱۰ درصد) با نتایج مدل دقیق اجزا محدود دارد. شکل‌های (۱۵ و ۱۶) نشان می‌دهد که نتایج حاصل از نمودارهای پاسخ دستورالعمل UFC محافظه کارانه می‌باشد به نحوی که نتایج آن نسبت به روابط پیشنهادی (تا ۰.۴۰) و نسبت به مدل دقیق عددی (تا ۰.۶۰) اختلاف دارد.

نتایج مدل عددی پیشنهادی، با دقت خوبی با نتایج تحقیق جیای و همکاران [۲۸] تطابق دارد؛ بنابراین می‌توان از مدل عددی پیشنهادی برای تعیین دقت روش تحلیلی پیشنهادی این پژوهش و روش‌های دستورالعمل ۲-۳۴۰-۳ UFC استفاده کرد.

۵-۱- مقایسه روش‌های تعیین خیز دال بتنی

۱-۱- مشخصات دال مینا

برای بررسی روش‌های تعیین خیز بیان شده در این پژوهش، ابتدا یک دال بتنی به عنوان دال مینا در نظر گرفته می‌شود و با تغییر

جدول ۱. مقایسه نتایج صحت‌سنجی

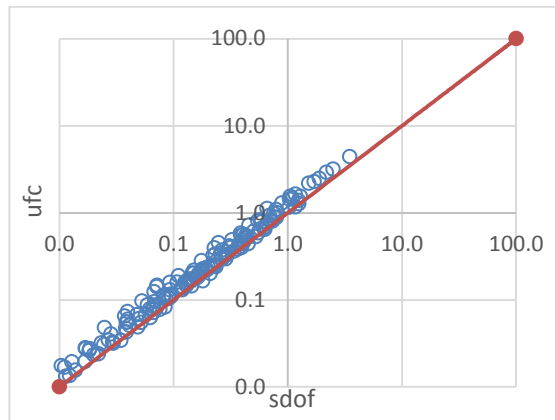
وزن ماده منفجره (kg)	بیشینه جابه‌جایی وسط دال (cm)			بیشینه بار انفجار (Mpa)		
	نتایج تحقیق [۲۸]	نتایج صحت‌سنجی	درصد اختلاف	نتایج تحقیق [۲۸]	نتایج صحت‌سنجی	درصد اختلاف
۱۰	۰/۶۹۹	۰/۶۸	۲/۷۲	۰/۴۲	۰/۴۲۲	۰/۴۸
۳۰	۱/۹۹۶	۲	۰/۲۰	۱/۲۲۰	۱/۲۲۱	۰/۰۸
۵۰	۴/۷۲۱	۴/۴۴۷	۵/۸۰	۲/۰۳۰	۲/۰۲۷	۰/۱۵
۷۵	۸/۴۲۸	۸/۶۵	۲/۶۳	۳/۰۳۰	۳/۰۳۱	۰/۰۳
۱۰۰	۱۵/۸۰۸	۱۴/۵۹۸	۷/۶۵	۴/۰۲۰	۴	۰/۵۰

جدول ۳. محدوده تغییرات مشخصات هندسی ۳۵۰ نمونه دال مورد بررسی

ضخامت (m)	عرض (m)	طول (m)
۰/۳ - ۰/۵	۱ - ۸	۲ - ۸
نسبت عرض به طول		مساحت میلگرد (cm ² /m)
۱ - ۰/۵		۶۶ - ۴/۹

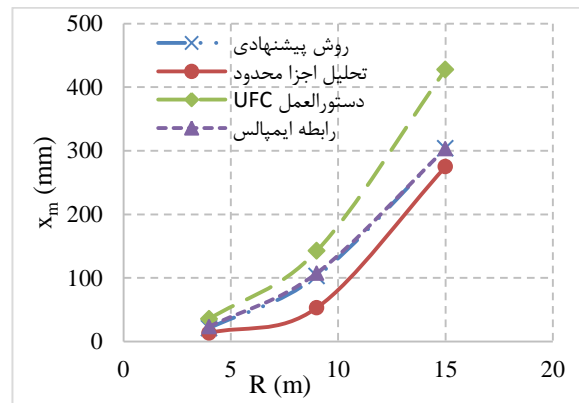
نتایج حاکی از آن است که از ۳۵۰ نمونه ساخته شده پاسخ ۲۷ درصد موارد از نمودارهای دستورالعمل UFC قابل تعیین نیست، به دلیل اینکه نسبت زمان بارگذاری به دوره تناوب سازه (T/T_N) و همچنین نسبت فشار بار انفجار به مقاومت نهایی سازه (P/r_{II}) در بازه‌های مشخص شده نمودار قرار نمی‌گیرد.

در شکل (۱۷)، نمودار نسبت پاسخ UFC به پاسخ مدل پیشنهادی در ۳۵۰ مدل مذکور نشان داده شده است. همان‌طور که از این نمودار مشخص است پاسخ‌های UFC در ۹۰ درصد موارد، نسبت به مدل پیشنهادی محافظه‌کارانه بوده و اختلاف پاسخ‌هایی تا ۵۰ درصد به دست آمده است.

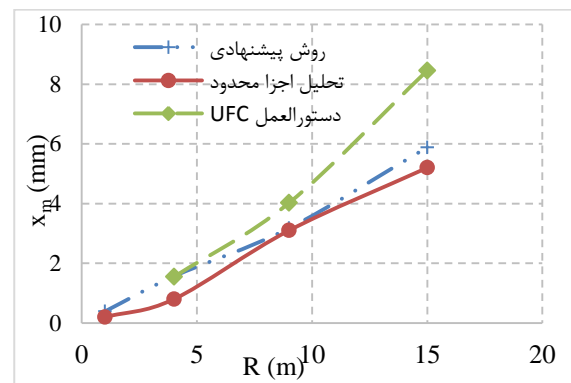


شکل ۱۷. نمودار نسبت پاسخ UFC به پاسخ روش پیشنهادی در نمونه های بررسی شده

برای تعیین پاسخ رابطه ایمپالس ابتدا لازم است شرط محدوده زمانی رابطه (۲۴) برقرار باشد. این شرط تنها برای ۲۲ درصد نمونه‌ها برقرار است و برای تعیین پاسخ باقی نمونه‌ها نمی‌توان از رابطه ایمپالس استفاده کرد. همان‌طور که در شکل (۱۹) مشخص است نتایج نشان می‌دهد این شرط در اکثر موارد برای حالت ارتعاش آزاد ($\frac{t_m}{t_d} > 1$) صدق می‌کند. همچنین در اکثر نمونه‌ها (۷۴٪)، اختلاف پاسخ رابطه ایمپالس با پاسخ حاصل از روش پیشنهادی، کمتر از ۲۰ به دست آمده است.



شکل ۱۵. نمودار مقایسه خیز حداکثر دال دوطرفه با استفاده از روش‌های مختلف در ($Z=۳/۶ \text{ m/kg}^{-۰.۳۳}$)

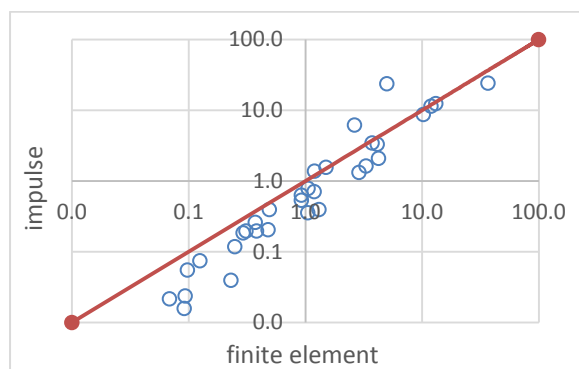


شکل ۱۶. نمودار مقایسه خیز حداکثر دال دوطرفه با استفاده از روش‌های مختلف در ($Z=۸/۳ \text{ m/kg}^{-۰.۳۳}$)

رابطه ایمپالس همان‌طور که در رابطه (۴) بیان شده است، برای همه شرایط پاسخگو نیست. نمودارهای دستورالعمل UFC ۳-۳۴۰-۰۲ نیز تنها برای محدوده $۰/۱ < r_{II}/P < ۲$ و همچنین این $۰/۱ < T/T_N < ۲۰$ قادر به تعیین پاسخ می‌باشد. همچنین این نمودارها، پاسخ سازه را تحت بار ساده‌سازی شده مثالی ارائه می‌دهند. اما روش پیشنهادی برای تمام حالات پاسخ مناسب ارائه می‌دهد.

۳-۵- تعیین و مقایسه میزان دقت و کارایی انواع روش‌های بحث شده در این تحقیق

به جهت ارزیابی میزان کارایی و دقت روش پیشنهادی در شرایط مختلف هندسه سازه تحت بارگذاری‌های گوناگون، تعداد ۳۵۰ نمونه دال بتن مسلح دیگر مورد بررسی قرار گرفت. این نمونه‌ها با تغییر مشخصات هندسی دال مینا و با در نظر گرفتن شرایط مختلف بارگذاری ایجاد شد. محدوده تغییر پارامترهای دال مینا برای ساختن ۳۵۰ نمونه دال بتنی در جدول (۳) قابل مشاهده است.



شکل ۲۲. نمودار مقایسه پاسخ ایمپالس و تحلیل اجزا محدود

نتایج به دست آمده از این شکل‌ها به شرح ذیل است:

در شکل (۲۰)، برای ۴۵٪ از مدل‌ها اختلاف حداکثر خیز روش پیشنهادی به نرم‌افزار، کمتر از ۵۰٪ می‌باشد.

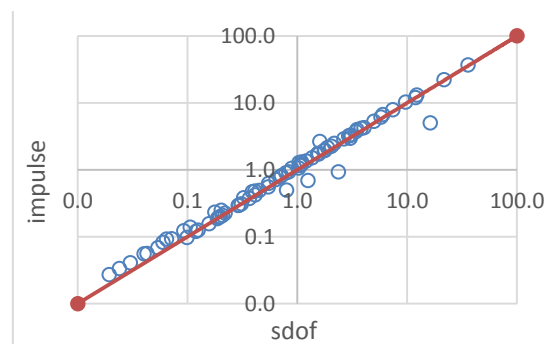
همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد به دلیل محدودیت در محاسبه خیز دال از نمودارهای دستورالعمل UFC، تعدادی از نمونه‌ها جهت مقایسه کاسته شد. در ۳۲٪ از باقی مدل‌ها اختلاف حداکثر خیز نمودارهای پاسخ دستورالعمل UFC ۳-۳۴۰-۰۲ به حداکثر خیز حاصل از نرم‌افزار، کمتر از ۵۰٪ می‌باشد (شکل ۲۱).

مطابق توضیحات ارائه شده، به دلیل محدودیت در محاسبه خیز دال به روش ایمپالس، تعدادی از نمونه‌ها جهت مقایسه کاسته شد. در ۳۰ درصد از مدل‌های باقی‌مانده، اختلاف حداکثر خیز حاصل از رابطه ایمپالس به خیز حداکثر نرم‌افزار، کمتر از ۵۰٪ می‌باشد (شکل ۲۲).

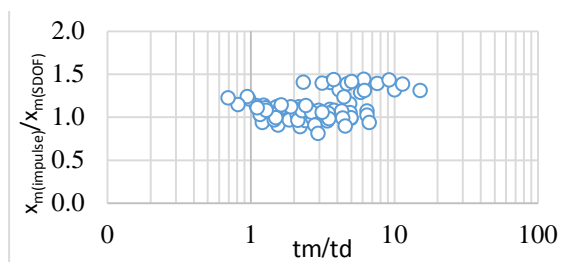
همان‌طور که از نمودارهای فوق (شکل‌های ۱۷ تا ۲۲) و خلاصه نتایج ذکر شده مشخص است روش پیشنهادی هیچ محدودیتی در محاسبه خیز حداکثر برخلاف نمودارهای UFC و روش ایمپالس ندارد. همچنین نتایج روش پیشنهادی بیش از نتایج حاصل از نمودارهای دستورالعمل UFC و رابطه ایمپالس به مدل اجزا محدود نزدیک‌تر است.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق خیز حداکثر دال‌های بتن مسلح دوطرفه تحت روش‌های مختلف و مقایسه دقت آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. یکی از مهم‌ترین روش‌های موجود برای محاسبه خیز دال، نمودارهای پاسخ دستورالعمل UFC ۳-۳۴۰-۰۲ و همچنین روش روابط ایمپالس می‌باشد. با توجه به فرضیات ساده کننده و محدودیت‌های روش نمودارهای پاسخ UFC و رابطه ایمپالس، در این تحقیق به ارائه یک روش تحلیلی ساده و

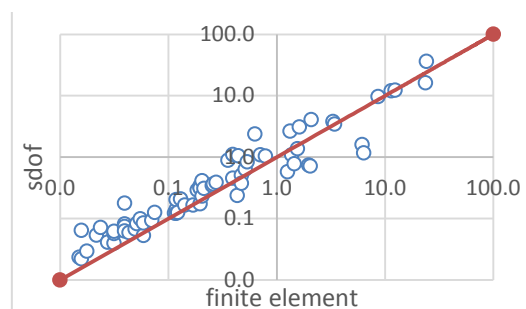


شکل ۱۸. نمودار نسبت پاسخ رابطه ایمپالس به پاسخ روش پیشنهادی

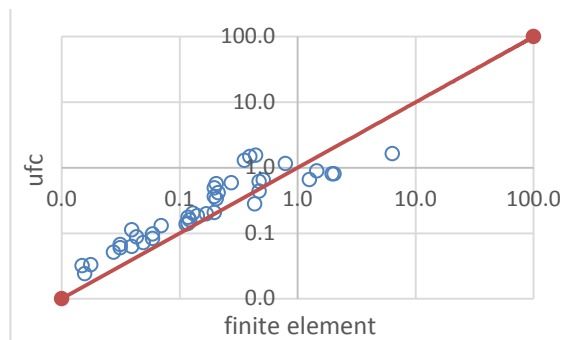


شکل ۱۹. نمودار نسبت پاسخ رابطه ایمپالس به پاسخ روش پیشنهادی به ازای نسبت زمان خیز حداکثر به زمان بارگذاری

جهت مقایسه میزان دقت و کارایی انواع روش‌های بحث شده در این تحقیق (در مقایسه با نتایج دقیق مدل اجزا محدود)، در شکل‌های (۲۰ - ۲۲)، به ترتیب نسبت خیز حداکثر مدل تحلیلی پیشنهادی، نمودارهای دستورالعمل UFC و رابطه ایمپالس به خیز حداکثر مدل اجزا محدود ارائه شده است.



شکل ۲۰. نمودار مقایسه نتایج روش پیشنهادی و تحلیل اجزا محدود



شکل ۲۱. نمودار مقایسه پاسخ UFC و پاسخ تحلیل اجزا محدود

- [5] El-Dakhkhni, W. W.; Mekky, W. F.; Rezaei, S. C. "Validity of SDOF Models for Analyzing Two-way Reinforced Concrete Panels Under Blast Loading"; *J. Perform Constr. Fac.* 2010, 24, 311-325.
- [6] Muhamad, R.; Ali, M. M.; Oehlers, D.; Sheikh, A. H. "Load-slip Relationship of Tension Reinforcement in Reinforced Concrete Members"; *Eng. Struct.* 2011, 33, 1098-1106.
- [7] Carta, G.; Stochino, F. "Theoretical Models to Predict the Flexural Failure of Reinforced Concrete Beams Under Blast Loads"; *Eng. Struct.* 2013, 49, 306-315.
- [8] Low, H. Y.; Hao, H. "Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs Under Explosive Loading"; *Struct. Saf.* 2001, 23, 157-178.
- [9] Stochino, F. "RC Beams Under Blast Load: Reliability and Sensitivity Analysis"; *Eng. Fail. Anal.* 2016, 66, 544-565.
- [10] Stochino, F.; Carta, G. "SDOF Models for Reinforced Concrete Beams Under Impulsive Loads Accounting for Strain Rate Effects"; *Nucl. Eng. Des.* 2014, 276, 74-86.
- [11] Hao, H.; Hao, Y.; Li, J.; Chen, W. "Review of the Current Practices in Blast-Resistant Analysis and Design of Concrete Structures"; *Adv. Struct. Eng.* 2016, 19, 1193-1223.
- [12] Kristoffersen, M.; Pettersen, J. E.; Aune, V.; Børvik, T. "Experimental and Numerical Studies on the Structural Response of Normal Strength Concrete Slabs Subjected to Blast Loading"; *Eng. Struct.* 2018, 174, 242-255.
- [13] Ebrahimi, H.; Someh, L. K.; Norato, J.; Vaziri, A. "Blast-Resilience of Honeycomb Sandwich Panels"; *Int. J. Mech. Sci.* 2018, 144, 1-9.
- [14] Qi, C.; Remennikov, A.; Pei, L. Z.; Yang, S.; Yu, Z. H.; Ngo, T. D. "Impact and Close-In Blast Response of Auxetic Honeycomb-Cored Sandwich Panels: Experimental Tests and Numerical Simulations"; *Compos. Struct.* 2017, 180, 161-178.
- [15] Zhao, C.; Lu, X.; Wang, Q.; Gautam, A.; Wang, J.; Mo, Y. L. "Experimental and Numerical Investigation of Steel-Concrete (SC) Slabs Under Contact Blast Loading"; *Eng. Struct.* 2019, 196, 109337.
- [16] Ghalehnovi, M.; Yousefi, M.; Karimipour, A.; de Brito, J.; Norooziyan, M. "Investigation of the Behaviour of Steel-Concrete-Steel Sandwich Slabs with Bi-Directional Corrugated-Strip Connectors"; *Appl. Sci.* 2020, 10, 8647.
- [17] Golmohammadi, M.; Ghalehnovi, M.; Yousefi, M. "Experimental Investigation of Steel-Concrete-Steel Slabs with Stud Bolt Connectors Subjected to Punching Loading"; *Amirkabir Journal of Civil Engineering.* 2019, 3, 93-106.
- [18] Meng, L.; Wang, Y.; Zhai, X. "Modeling and Dynamic Response of Curved Steel-Concrete-Steel Sandwich Shells Under Blast Loading"; *Int. J. Steel Struct.* 2020, 20, 1663-1681.

درعین حال دقیق برای رفع این محدودیت‌ها پرداخته شد. در این روش پیشنهادی، تحلیل دینامیکی غیرخطی دال دوطرفه بتن مسلح تحت بار انفجار واقعی و به شکل نمایی، با استفاده از روش حل تک‌درجه آزادی انجام شد. برای برآورد دقت نتایج مدل پیشنهادی و دیگر روش‌های محاسبه خیز حداکثر دال، از الگوی دقیق اجزا محدود استفاده شد.

خلاصه نتایج و دستاوردهای این تحقیق به شرح ذیل است:

(۱) دستورالعمل ۰۲ - ۳۴۰ - ۳ UFC برای تعیین پاسخ عضو خمشی در برابر بار انفجار دارای محدودیت‌ها و فرضیات ساده کننده‌ای است. از جمله این فرضیات، ساده‌سازی بار انفجار به صورت مثلثی است. همچنین نمودارهای تعیین خیز حداکثر تنها در محدوده $0.1 < r_u/P < 2$ و $0.1 < T/T_N < 20$ قابلت ارائه پاسخ دارد و خارج از آن نمی‌توان از این روش محاسبه نمود. به علاوه این روش حالت سازه در هنگام پاسخ حداکثر (الاستیک یا پلاستیک) را تعیین نمی‌کند.

(۲) رابطه ایمپالس برای تعیین خیز حداکثر دال بتنی دارای

$$\text{محدودیت زمانی } 3 > \frac{t_m}{t_{d(\text{triangular})}} \text{ است.}$$

(۳) روش پیشنهادی پژوهش حاضر که به صورت حل سیستم تک درجه آزادی تحت تابع نمایی بارگذاری انفجاری است، در تمامی محدوده‌های زمانی قادر به محاسبه پاسخ عضو سازه‌ای است. در این روش بارگذاری انفجاری به صورت تابع نمایی که نزدیک به حالت واقعی می‌باشد در نظر گرفته شده است. همچنین محدوده الاستیک، پلاستیک، ارتعاش آزاد یا اجباری پاسخ سازه در روش پیشنهادی ارائه شده است.

(۴) دقت روش پیشنهادی برای تعیین خیز حداکثر دال دوطرفه بتن مسلح تحت انفجار نسبت به رابطه ایمپالس و دستورالعمل UFC بهتر ارزیابی شد.

۷- مراجع ها

- [1] Du, H.; Li, Z. "Numerical Analysis of Dynamic Behavior of RC Slabs Under Blast Loading"; *Trans. Tianjin Univ.* 2009, 15, 61-64.
- [2] Chang, K.Y.; Hwang, S.J. "Practical Estimation of Two-way Slab Deflections"; *J. Struct. Eng.* 1996, 122, 150-159.
- [3] Rong, H.C.; Li, B. "Deformation-controlled Design of Reinforced Concrete Flexural Members Subjected to Blast Loadings"; *J. Struct. Eng.* 2008, 134, 1598-1610.
- [4] El-Dakhkhni, W. W.; Changiz Rezaei, S. H.; Mekky, W. F.; Razaqpur, A. G. "Response Sensitivity of Blast-Loaded Reinforced Concrete Structures to the Number of Degrees of Freedom"; *Can. J. Civ. Eng.* 2009, 36, 1305-1320.

- [24] Hamzeh, M.; Khosravi, F.; Behbahani, H. P. "Investigation of Explosion Effects on the Border Concrete Tunnels"; *Adv. Defence Sci. & Technol.* 2017, 9, 349-358 (In Persian).
- [25] Seifollahi, H.; Morshed, R. "Behavior of Reinforced Concrete Slabs against the Blast Wave"; *Amirkabir Journal of Civil Engineering.* 2018, 687-696 (In Persian).
- [26] Hallquist, J. O. "LS-DYNA® Keyword User's Manual Volume II Material Models"; Livermore, California, USA, 2013.
- [27] Manual, LS-DYNA Keyword User's, and I. Volume. "Livermore Software Technology Corporation (LSTC)." Volume II: material models. Version 971, 2012.
- [28] Jia, H.; Yu, L.; Wu, G. "Damage Assessment of Two-Way Bending RC Slabs Subjected to Blast Loadings"; *Sci. World J.* Article ID 718702, 2014, 2014, 4-8.
- [19] Wang, Y.; Zhai, X. "Development of Dimensionless PI Diagram for Curved SCS Sandwich Shell Subjected to Uniformly Distributed Blast Pressure"; *Front. Struct. Civ. Eng.* 2019, 13, 1432-1445.
- [20] "Structures to Resist the Effect of Accidental Explosions"; Unified Criteria UFC 3-340-02, Department of Defense, USA, 2014.
- [21] Hetherington, J.; Smith, P. "Blast and Ballistic Loading of Structures"; CRC Press, 2014.
- [22] Uddin, N. "Blast Protection of Civil Infrastructures and Vehicles Using Composites"; Woodhead Publishing, 2010.
- [23] Karlos, V.; Solomos, G.; Larcher, M. "Analysis of the Blast Wave Decay Coefficient Using the Kingery-Bulmash Data"; *Int. J. Prot. Struct.* 2016, 7, 409-429.