

پیش‌بینی تأثیر انفجارهای داخلی متوالی بر مقاومت

یک اتاقک آزمون ساخته شده از بتن مسلح

حسین سوری^{۱*}، سید هادی معتمد الشریعتی^۲، رضا سهرابی^۳

۱- استادیار، ۲- مربی، ۳- کارشناس ارشد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

(تاریخ وصول: ۹۶/۴/۱۱، تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۷)

چکیده

از جمله آزمون‌هایی که در طراحی یک ماده منفجره با کاربرد انفجار داخلی انجام می‌شود، انفجار آن در داخل یک محیط بسته یا نیمه بسته و اندازه‌گیری و تحلیل پارامترهای موج بلاست است. در این راستا آزمون موسوم به آزمون دو اتاقک در بین محققین مورد توجه قرار گرفته است. این آزمون در دو اتاقک از جنس بتن مسلح انجام می‌شود که از طریق یک درب به هم راه دارند. نمونه ماده منفجره در داخل یکی از اتاقک‌ها منفجر شده و اثرات آن در دو اتاقک بررسی و تحلیل می‌گردد. هدف از تحقیق حاضر این است که برای اتاقک‌های از پیش ساخته شده‌ای، تعداد دفعات آزمون انفجار که منجر به تخریب سازه می‌شود پیش‌بینی گردد. در این راستا پس از صحت‌سنجی حل، از نرم‌افزار هیدرودینامیکی اتوداین برای شبیه‌سازی عددی انفجارهای متوالی استفاده شده است. پارامتر آسیب در مدل RHT بتن به‌عنوان مبنایی برای تعیین تعداد دفعات مجاز انفجار به‌کار گرفته شده است. بر این مبنا و با برون‌یابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، تعداد دفعات مجاز انفجار برای وزن‌های مختلف ماده منفجره پیش‌بینی شده است.

واژه‌های کلیدی: انفجار داخلی، بتن مسلح، شبیه‌سازی عددی، اتوداین، آسیب.

Prediction of Successive Internal Blast Effects on Resistance of a Reinforced Concrete-Built Test Room

H. Soury*, S. H. Motamedoshariati, R. Sohrabi

Malek Ashtar University of Technology, Tehran

(Received: 7/2/2017, Accepted: 1/27/2018)

Abstract

One of the regular tests used for the design of explosive materials for internal explosion is doing the explosion in a closed or partially closed environment to detect and analyzing the blast wave parameters. To this mean, researchers carry out the test, so-called two-room test. The test is performed in two reinforced concrete-built rooms which are connected by a door. The explosive material is detonated in one room and its effects are measured and analyzed in both room. The purpose of the current study is to predict the maximum number of explosions which leads to destruction of the prefabricated rooms. Hence, after validation of the solution, the numerical simulation of the successive explosions was performed by AUTODYN hydrodynamic software. The damage parameter in RHT model of concrete was used as a basis to determine the number of allowable explosions. According to the mentioned basis and with extrapolating the simulation results, maximum number of the allowable explosions was determined for different amount of explosives.

Keywords: Internal Blast, Reinforced Concrete, Numerical Simulation, AUTODYN, Damage.

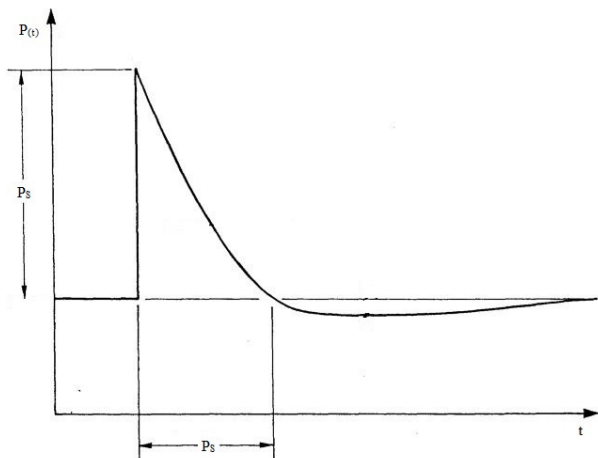
۱- مقدمه

درون یک سیلندر و یا یک واکنش هسته‌ای کنترل نشده باشد [۲]. با انفجار یک خرج انفجاری قوی، حجمی از گاز با فشار و دمای بسیار بالا تولید می‌شود. انبساط این توده گاز باعث ایجاد یک‌لایه هوای فشرده در جلوی آن می‌شود. این هوای فشرده که موج بلست^۳ نامیده می‌شود حاوی عمده انرژی ناشی از انفجار است. این مرحله از انفجار که با افزایش فشار همراه است فاز مثبت نامیده می‌شود. هم‌زمان با انبساط گازهای ناشی از انفجار و رسیدن فشار آن‌ها به فشار اتمسفر، موج بلست به اطراف منتشر شده و فشار هوا در جبهه این موج کاهش می‌یابد. در نهایت با انبساط گازهای انفجار، این گازها سرد شده و فشارشان کمی کمتر از فشار اتمسفر می‌شود. این کاهش فشار به خاطر از دست رفتن مومنتوم مولکول‌های گاز است. در اثر این پدیده که باعث ایجاد ناحیه‌ای با فشار کمتر از فشار هوا می‌شود، دوباره جریان گازهای انفجاری به سمت نقطه انفجار برقرار می‌شود. این مرحله از فرآیند انفجار را فاز منفی گویند. در آخر، فشار باز هم افزایش یافته و رفته‌رفته حالت تعادل بین گازهای ناشی از انفجار و هوا ایجاد می‌شود [۳].

معادله فشار - زمان موج بلست معمولاً به صورت یک تابع نمایی مانند معادله (۱) که به تابع فریدلندر^۴ معروف است بیان می‌شود [۳].

$$p(t) = p_s \left[1 - \frac{t}{T_s} \right] \exp\left(-\frac{bt}{T_s}\right) \quad (1)$$

در این رابطه، p فشار در لحظه t را نشان می‌دهد. T_s زمان فاز مثبت و p_s حداکثر بیش‌فشار است. b پارامتر شکل موج نامیده می‌شود و تابعی است از حداکثر بیش‌فشار (p_s). نمودار فشار-زمان انفجار در هوای آزاد در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- نمودار فشار - زمان موج بلست [۳].

۲-۱ انفجار داخلی

بر حسب اینکه ماده منفجره داخل سازه قرار گرفته باشد و یا در بیرون از آن، انفجارها به ترتیب به دو دسته داخلی و خارجی تقسیم می‌شوند.

۲- انفجار

تحلیل پاسخ سازه به وقوع انفجار در داخل آن، یک جنبه مهم در مطالعه بارگذاری انفجاری سازه‌هاست. سازوکار و آثار انتشار امواج انفجار درون یک محیط محصور شده، پدیده‌ای است که برای هر دو منظور تخریب ساختمان و یا طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد. یک نمونه از این سازه‌ها، اتاقکی است که در آن آزمایش انفجاری برای ارزیابی عملکرد و تعیین یکسری مشخصات مواد منفجره به کار می‌رود.

در این آزمایش که آزمون دو اتاق نامیده می‌شود، مواردی چون نمودار فشار انفجار بر حسب زمان، انعکاس‌های متوالی امواج شوک و روند میرایی آن‌ها، تغییرات مواد اولیه واکنش نداده و مدت زمان اتمام آن‌ها پس از وقوع انفجار و تأثیر آن‌ها بر قدرت نهایی خرج انفجاری و همچنین تأثیر ابعاد درب و پنجره بر میزان افزایش فشار حاصل از انفجار بررسی می‌شود [۱].

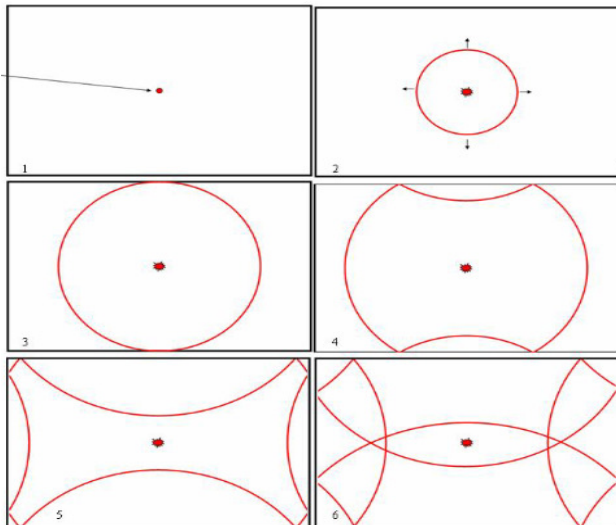
بدیهی است که برای ساخت سازه‌ای که بتوان آزمون‌هایی را در آن انجام داد می‌بایست از مصالحی استفاده کرد که مقاومت بالایی در برابر امواج انفجار داشته باشند. بتن یکی از مصالحی است که به خاطر ویژگی‌هایی همچون مقاومت فشاری بالا، ارزان بودن و سهولت تولید و همچنین قابلیت شکل پذیری، کاربرد زیادی در ساخت سازه‌های مقاوم در برابر انفجار دارد. ایراد اساسی بتن پایین بودن مقاومت کششی آن است که از تسلیح آن با عناصری همچون فولاد جهت برطرف نمودن این ضعف استفاده می‌شود.

مطالعه انفجار و بررسی اثرات آن بر سازه با استفاده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی انجام می‌شود. آزمایش‌های تجربی با وجود دقت زیاد هزینه بالایی دارند و کمتر انجام می‌شوند. شبیه‌سازی‌های عددی بر روابط ریاضی استوارند و قوانین فیزیکی پدیده انفجار را توصیف می‌کنند. مزیت‌های اصلی شبیه‌سازی‌های عددی، پایین بودن هزینه انجام آن‌ها و امکان پذیر بودن ساخت مدل‌های عددی با دقت بالاست.

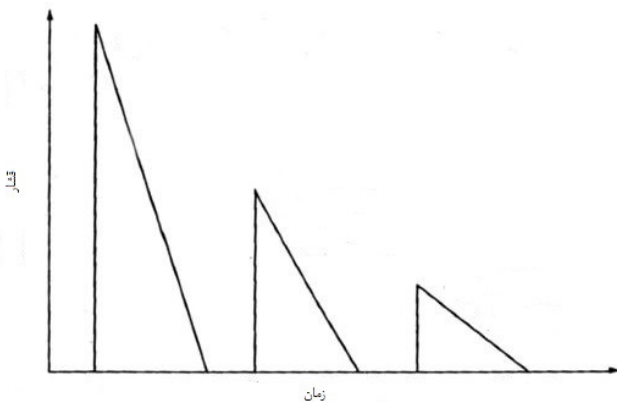
در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار اتوداین^۱ مقدار جرمی از ماده منفجره H-6 مشخص شده است که بتوان از آن به دفعات قابل توجهی در آزمون دو اتاق استفاده کرد. اتاقک به صورت پیش‌ساخته و آماده بوده و ابعاد و مشخصات آن ثابت می‌باشند. جرم H-6 به عنوان متغیر مسئله، از مقدار اولیه دو کیلوگرم پله‌پله کاهش یافته تا مقدار بهینه برای انجام آزمایش انفجاری مشخص شود.

1- Autodyn
 2- Explosion

3- Blast Wave
 4- Friedlander



شکل ۲- انتشار و انعکاس موج بلست در یک انفجار داخلی [۴].



شکل ۳- نمودار فشار - زمان امواج انعکاسی در انفجار داخلی [۵].

یک فرض ساده کننده دیگر که بیکر پیشنهاد کرده، بیان می‌کند که اگر زمان پاسخ سازه بسیار بیشتر از کل زمان بارگذاری باشد، می‌توان این‌طور در نظر گرفت که هر سه پالس با یکدیگر ترکیب شده و تشکیل یک پالس با بیش فشار p_{RT} می‌دهند:

$$p_{RT} = p_{R1} + p_{R2} + p_{R3} = 1.75 p_{R1} \quad (7)$$

این تقریبها موجب خطا در برآورد میزان بار وارده به ساختمان می‌شوند بنابراین باید در هنگام طراحی سازه به این نکته توجه داشت [۳].

تاکنون مطالعاتی در باب بررسی بارگذاری انفجاری داخلی انجام گرفته است. کیم و همکارانش آزمون دو اتاق را انجام داده و نمودارهای فشار به‌دست آمده را با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مقایسه کرده و تطابق مطلوبی مشاهده کردند [۱]. یانگ و همکارانش تأثیر انفجار داخلی بر سازه بتن مسلح را با هیدروکود ال اس داینا بررسی کرده و برای سطوح مختلف آسیب، مقدار متناظر ماده منفجره را به‌دست آوردند [۶]. ویرهیم و لیم در بررسی تأثیر انفجار داخلی بر اتاقک بتنی،

در انفجار داخلی بارگذاری روی دیوارها در دو مرحله انجام می‌شود. ابتدا موج شوک به دیوارها برخورد کرده و بارگذاری انجام می‌شود، سپس این موج از سایر دیوارها باز هم منعکس شده و برای بار دوم بارگذاری انجام می‌شود. انعکاس موج شوک از دیوارها، زنجیره‌ای از امواج بلست را تشکیل می‌دهد که به مرور میرا می‌شوند. در این مرحله امکان تشکیل امواج ماخ^۱ هم وجود دارد. هم‌چنین تجمع گازهای ناشی از انفجار به نوبه خود باعث افزایش فشار می‌شود [۳].

پروفایل بارگذاری در این حالت بسیار پیچیده است. پارامترهای موج شوک انعکاسی را می‌توان به‌دست آورد. اما به‌دست آوردن پارامترهای موج شوک دوباره منعکس شده به‌ویژه در سازه‌های نامتقارن، بسیار دشوار است. به‌همین خاطر عمده‌تاً از برنامه‌های رایانه‌ای برای تحلیل این حالت از انفجار استفاده می‌شود [۳]. شکل (۲) انتشار و انعکاس موج شوک را در انفجار داخلی نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن یک سری فرضیات ساده کننده می‌توان روابط فشار - زمان را برای پدیده انفجار داخلی به‌دست آورد. برای این منظور هر دو فشار انفجار و بازتاب به‌صورت مثلی در نظر گرفته می‌شوند. منظور از حالت مثلی این است که شکل تابع فریدلندر که در واقع به‌صورت نمایی است تقریباً به شکل مثلث در نظر گرفته شده و از فاز منفی هم صرف‌نظر می‌شود. در نتیجه برای موج بلست منعکس شده روابط زیر برقرار است:

$$p_r(t) = p_r \left(1 - \frac{t}{T_r}\right) \quad 0 \leq t \leq T_r \quad (2)$$

$$p_r(t) = 0 \quad t > T_r \quad (3)$$

در این روابط، T_r معادل زمان تداوم فاز مثبت برای موج منعکس شده و $p_r(t)$ فشار موج انعکاسی است. لازم به ذکر است که این مقدار برابر زمان تداوم فاز مثبت موج شوک اولیه (T_s) نیست [۳].

بعد از انعکاس اول انعکاس‌های متوالی اتفاق می‌افتد. بیکر [۳] بر اساس یک روش منطقی فرض کرد که در هر بار انعکاس، فشار بیشینه نصف می‌شود. در نتیجه اگر زمان هر پالس ثابت باقی بماند ایمپالس هم نصف می‌شود. او هم‌چنین فرض کرد که مطابق با روابط (۴ تا ۶)، بعد از سه بار انعکاس، فشار صفر می‌شود. این موضوع در شکل (۳) نشان داده شده است.

$$p_{R3} = \frac{1}{2} \times p_{R2} = \frac{1}{4} \times p_{R1} \quad (4)$$

$$p_{R4} = 0 \quad (5)$$

$$T_r = T_{r1} = T_{r2} = T_{r3} \quad (6)$$

در شکل (۳) زمان طنین^۲ یعنی زمان بین دو بارگذاری داخلی سازه توسط موج بلست برابر مقدار ثابت $t_r = 2 \times t_a$ در نظر گرفته شده است که در این رابطه t_a برابر زمان رسیدن اولین موج بلست به سطح منعکس کننده است. این فرض البته کاملاً درست نیست چراکه سرعت و در نتیجه زمان حرکت امواج شوک متوالی با یکدیگر برابر نیست [۳].

1- Mach

2- Reverberation Time

مناسب است. این مدل که در قالب معادلات (۸ تا ۱۱) نشان داده شده است، یک حالت پیشرفته‌تر از مدل JH می‌باشد که در آن بر خلاف مدل JH نوردای سوم^۲ تنش و کرنش سختی در نظر گرفته شده است [۱۱].

$$Y_{fail}(p^*, \theta, \dot{\epsilon}) = Y_c(p^*) \times r_3(\theta) \times F_{rate}(\dot{\epsilon}) \quad (۸)$$

$$Y_c(p^*) = f'_c \times [A \times (p^* - p_{spall}^* \times F_{rate}(\dot{\epsilon}))^N] \quad (۹)$$

$$p^* = \frac{p}{f'_c} \quad (۱۰)$$

$$p_{spall}^* = \frac{f_t}{f'_c} \quad (۱۱)$$

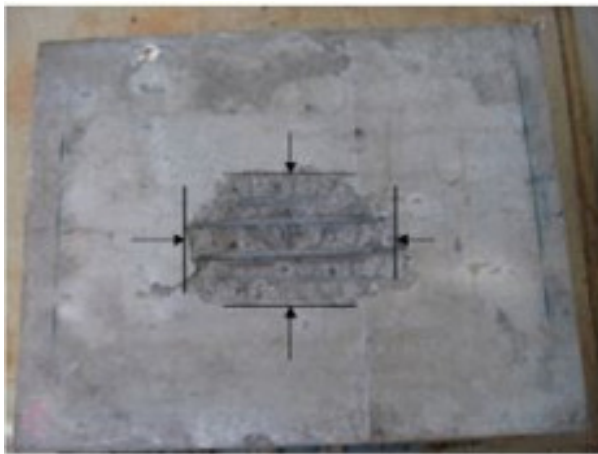
در معادلات بالا، f_c نشان‌دهنده استحکام فشاری تک محوره ماده، A و N دو پارامتر ثابت، $p^* = p/f_c$ متغیر فشار نرمالیزه شده، $p_{spall}^* = \frac{f_t}{f'_c}$ که در آن f_t مقاومت کششی تک محوره ماده و $F_{rate}(\dot{\epsilon})$ نیز بیانگر ضریب افزایش دینامیکی^۳ به صورت تابعی از نرخ کرنش $\dot{\epsilon}$ است [۱۱]. $r_3(\theta)$ را می‌توان از رابطه (۱۲) تعیین نمود:

$$r_3 = \frac{2(1-Q_2^2) \cos \theta + (2Q_2 - 1) \sqrt{4(1-Q_2^2) \cos^2 \theta - 4Q_2}}{4(1-Q_2^2) \cos^2 \theta + (1-2Q_2)^2} \quad (۱۲)$$

که در آن:

$$\cos(3\theta) = \frac{3\sqrt{3}J_3}{2^{3/2}\sqrt{J_2}} \quad (۱۳)$$

$$Q_2 = Q_{20} + BQ \cdot p^* \quad 0.5 < Q_2 < 1, BQ = 0.0105 \quad (۱۴)$$



شکل ۴- پدیده پوسته‌پوسته شدن در بتن [۱۰].

پارامتر ورودی Q_{20} نسبت مقاومت را در فشار صفر معین می‌کند [۱۱]. فاکتور افزایش دینامیکی هم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_{rate}(\dot{\epsilon}) = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^\alpha & p > f'_c, \quad for \dot{\epsilon} \leq 30 \times s^{-1} \\ \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^\beta & p < f'_c, \quad for \dot{\epsilon} > 30 \times s^{-1} \end{cases} \quad (۱۵)$$

$$\alpha = \frac{1}{5 + \frac{3}{4}f'_c} \quad (۱۶)$$

$$\beta = \frac{1}{10 + \frac{1}{2}f'_c} \quad (۱۷)$$

محدوده‌ای از شدت بارگذاری را معین کردند که در آن حالت عمده تخریب، از خمشی به برشی انتقال می‌یابد [۷]. خیراندیش و علیزاده در تحقیق خود تأثیر انفجار یک موشک سنگر شکن نفوذی بر تونل زیرزمینی با ابعاد و مختصات معین را با استفاده از نرم‌افزار UDEC Ver.4 بررسی کرده و حداقل فاصله بین حفره انفجاری و تاج تونل که در وضعیت تنش‌های انفجار به پایداری می‌رسد را تعیین کردند [۸]. طهماسب‌زاده و صفا با استفاده از نرم‌افزار اتوداین، اثر موج‌گیر بر کاهش بیشینه فشار انفجار وارد شده به داخل مسیر اصلی یک تونل با خم ۹۰ درجه را شبیه‌سازی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که موج‌گیر می‌تواند بیشینه فشار وارد شده به محل تقاطع را تا مقدار زیادی کاهش دهد. هم‌چنین هر چه بیشینه فشار وارد شده قبل از تقاطع موج‌گیر بیشتر باشد، طول مناسب (بهینه) موج‌گیر و درصد کاهش فشار، افزایش می‌یابد [۹].

همان‌طور که ملاحظه شد، در مطالعات پیشین، تأثیر یک مرحله انفجار بر سازه مطالعه شده است. اما در تحقیق حاضر تأثیرات انفجارهای متعدد مورد بررسی قرار گرفته و بر این اساس تعداد انفجارهای منجر به تخریب سازه پیش‌بینی شده است.

۳- موج تنش در بتن

برخورد موج بلست به سازه، یک موج تنش را درون آن ایجاد می‌کند که می‌تواند باعث جابه‌جایی آن شده و حتی ممکن است باعث تخریب سازه شود. اگر این موج، تنشی بیشتر از تنش حد الاستیک بتن ایجاد کند، موج شوک درون بتن شکل می‌گیرد. منظور از تنش حد الاستیک، حداکثر تنشی است که با وجود اعمال آن، ماده هنوز رفتار الاستیک دارد. تنش ناشی از موج بلست ابتدا به صورت فشاری گسترش پیدا می‌کند و با رسیدن به فصل مشترک سازه با محیطی متفاوت همچون هوا، به صورت یک موج کششی منعکس می‌شود. با توجه به اینکه مقاومت کششی بتن بسیار کمتر از مقاومت فشاری آن است، سطح پستی بتن نسبت به سطح رو به انفجار آسیب بیشتری را متحمل می‌شود [۳]. این پدیده را پوسته‌پوسته شدن^۱ می‌نامند که نمونه‌ای از آن در شکل (۴) نشان داده شده است.

۴- معرفی مدل مادی بتن

انجام تحلیل‌های عددی نیازمند تعریف ماده بر اساس یک‌سری مدل‌هایی است که خواص آن را تعریف می‌کنند. این مدل‌ها هم‌چنین باید بتوانند رفتار ماده را در شرایط و نرخ‌های مختلف بارگذاری به درستی پیش‌بینی کنند. معادله RHT یک مدل پلاستیسیته پیشرفته برای مواد ترد است که به‌ویژه در تحلیل بارگذاری دینامیک بتن

2- Third Invariant

3- Dynamic Increase Factor (DIF)

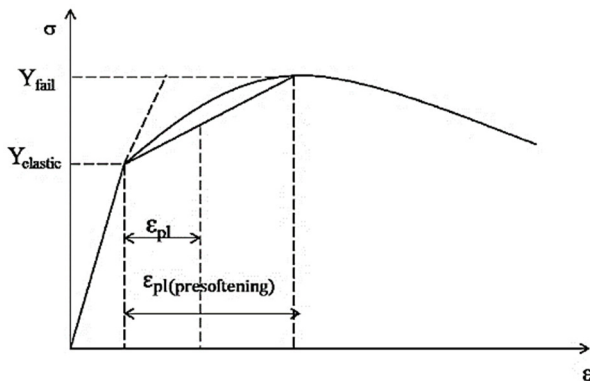
1- Spalling

$$D = \sqrt{D_1^2 + D_2^2} \leq 1.0 \quad (27)$$

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{FS(p^*)} \quad (28)$$

$\Delta \varepsilon_p$ جمع کرنش پلاستیک و D_1 و D_2 مقادیر ثابت وابسته به نوع ماده هستند [۱۱].

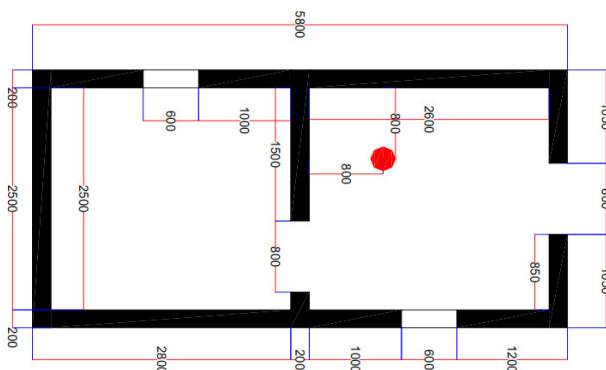
لازم به ذکر است که آسیب کلی (D) که معادلات آن در داده بالا معرفی شد، ظرفیت تحمل بار را در بتن معین کرده و در نرم‌افزار اتوداین با واژه DAMAGE نشان داده می‌شود.



شکل ۶- نمایش سخت‌شوندگی کرنشی در مدل RHT [۱۱].

۵- ابعاد و جزئیات اتاقک آزمایش انفجاری

هدف از این تحقیق، بررسی و تحلیل آسیب وارده به یک اتاقک آزمایش انفجاری از جنس بتن مسلح ناشی از انفجارهای متعدد داخلی و پیش‌بینی تعداد انفجارهای قابل انجام تا قبل از تخریب سازه است. ارتفاع این اتاقک ۲۵۰۰ میلی‌متر، طول آن ۵۸۰۰ میلی‌متر و عرض آن ۲۹۰۰ میلی‌متر است. اتاقک دارای یک درب به ارتفاع ۲۰۰۰ میلی‌متر و عرض ۸۰۰ میلی‌متر و دو پنجره به ابعاد ۶۰۰×۶۰۰ میلی‌متر است. یک درب به ارتفاع ۲۰۰۰ میلی‌متر و عرض ۸۰۰ میلی‌متر هم دو قسمت داخلی اتاقک را از هم جدا می‌کند. شکل (۷) نمای دید از بالای این اتاقک را نشان می‌دهد. در این شکل محل قرارگیری ماده منفجره به صورت یک چند ضلعی داخل اتاقک سمت راست نشان داده شده است. اتاقک‌های این چنینی به‌طور معمول برای مطالعه و اندازه‌گیری قدرت خرج‌های انفجار حجمی در محیط‌های بسته به کار می‌روند.



شکل ۷- نمای سازه آزمون دو اتاقک.

$$F_{cap}(p) = \begin{cases} 1 & \text{for } p \leq p_u = f'_c/3 \\ \sqrt{1 - \left(\frac{p-p_u}{p_o-p_u}\right)^2} & \text{for } p_u < p < p_o \\ 0 & \text{for } p \geq p_o \end{cases} \quad (18)$$

که در آن، $\dot{\varepsilon}_0 = 3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ و پارامترهای p_u و p_o در شکل (۵) نشان داده شده‌اند [۱۱].

به‌منظور بیان استحکام ماده کاملاً تخریب شده در این مدل، یک سطح استحکام پسماند به‌صورت مستقل به شکل زیر تعریف می‌شود [۱۱]:

$$Y_{residual} = B \times (p^*)^M \times \frac{[sgn(p^*)+1]}{2} \quad (19)$$

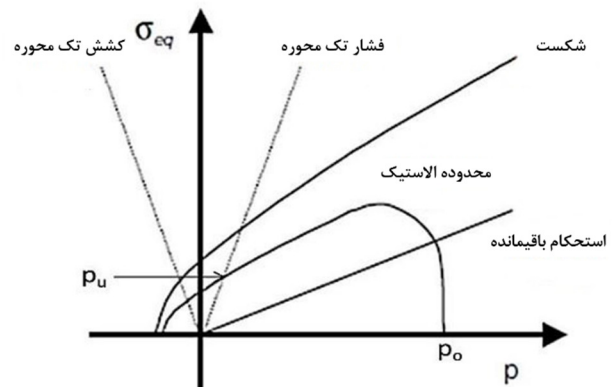
$$sgn(p^*) = \begin{cases} 1 & p^* > 0 \\ 0 & p^* = 0 \\ -1 & p^* < 0 \end{cases} \quad (20)$$

سطوح بارگذاری و پس از بارگذاری به‌صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۱]

$$Y_{loading} = Y_{elastic} + \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{pl}(\text{presoftening})} \times (Y_{fail} - Y_{elastic}) \quad (21)$$

$$Y_{fracture} = D + Y_{residual} + (1 - D) \times Y_{fail} \quad (22)$$

تعاریف ε_{pl} (presoftening) و ε_{pl} در شکل (۶) نشان داده شده است [۱۱].



شکل ۵- نمایش محدوده‌های شکست، الاستیک و مقاومت باقی‌مانده [۹].

پارامتر D در این مدل به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = \int_0^{\varepsilon_p} \frac{d\varepsilon_p}{FS(p^*)} \quad (23)$$

که در آن، $d\varepsilon_p = d\bar{\varepsilon}_p + d\mu_p$ ، مقدار افزایش جزئی کرنش پلاستیک معادل و $d\mu_p$ مقدار افزایش جزئی کرنش حجمی پلاستیک است [۱۱].

تخریب به واسطه تراکم حجمی با پارامتر D_2 نشان داده می‌شود.

$$D_2 = \int_0^{\mu_{por}(t)} \gamma \times \left(\frac{\mu_{por}(t)}{\mu_{gran}}\right)^{\gamma-1} \times \frac{d\mu_{por}(t)}{\mu_{gran}} \quad (24)$$

$$D_1 = \int_0^{\varepsilon_p} \frac{d\varepsilon_p}{FS(p^*)} \quad (25)$$

$$FS(p^*) = D_1 (p^* - p_{spall}^*)^{D_2} \quad (26)$$

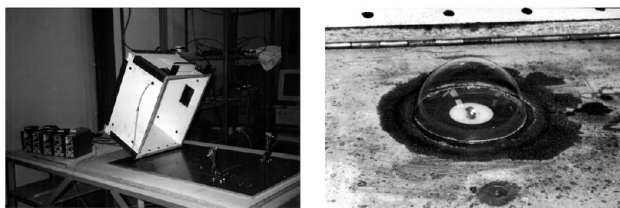
که در آن $d\varepsilon_p = d\bar{\varepsilon}_p$ [۹].

در این روابط، μ_{por} و μ_{gran} به ترتیب کرنش‌های حجمی مربوط به ماده دانه‌ای کاملاً فشرده شده و ماده متخلخل و γ ثابت مربوط به ماده است. آسیب کلی D ترکیبی از D_1 و D_2 به‌صورت زیر است [۱۱]:

۶- روش انجام تحقیق

انعکاس موج بلست در یک محیط بسته و انعکاس‌های متوالی امواج بلست و دیگری تأثیر موج بلست بر دیواره‌ها و ایجاد موج شوک در آن‌ها. بنابراین در این قسمت هر کدام از این دو فاز به‌طور مجزا بررسی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی مقایسه می‌شوند.

برای صحت‌سنجی پدیده انتشار و انعکاس موج بلست در محیط محصور شده از نتایج ارائه شده توسط زوسکفسکی [۱۲] استفاده شده است. در این مرجع ترکیبی از گازهای هیدروژن و اکسیژن با جرم و نسبت‌های استوکیومتری مختلف درون یک محفظه نیم‌کروی شیشه‌ای قرار گرفته و انرژی لازم برای انجام واکنش انفجاری از طریق یک سیم داغ به مخلوط گازی داده می‌شود. سپس یک محفظه مکعبی شکل صلب بر روی نیم‌کره شیشه‌ای قرار گرفته و با استفاده از حس‌گرهایی که در قسمت‌های مختلف این مکعب تعبیه شده، فشار ناشی از انفجار به ثبت رسیده است. شکل (۸) چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۸- چیدمان آزمایش زوسکفسکی [۱۲].

نویسندگان این مقاله در ادامه برای هر کدام از حالات مختلف مخلوط گازی، جرم معادل تی‌ان‌تی تعریف کرده و با استفاده از نرم‌افزار اتوداین انفجار این جرم‌های معادل را با شبیه‌سازی عددی تحلیل کرده‌اند. آن‌ها برای این منظور در نقاط مختلف مکعب مورد استفاده در مدل عددی فشارسنج قرار داده و نمودارهای فشار بر حسب زمان را در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی عددی با یکدیگر مقایسه کرده‌اند. شکل زیر نمای کلی موقعیت فشارسنج‌ها را در مدل عددی نشان می‌دهد. موقعیت دقیق آن‌ها در مختصات دکارتی در مرجع فوق‌الذکر ارائه شده است.

در تحقیق حاضر، در شکل (۱۰) نمودارهای فشار زمان ثبت شده توسط فشارسنج شماره ۵، مربوط به انفجار مخلوط انفجاری که جرم معادل TNT آن برابر $7/95 \times 10^{-5}$ کیلوگرم است نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نمودار تجربی در این شکل مربوط به کار زوسکفسکی می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دو نمودار شباهت بسیاری به یکدیگر داشته و می‌توان گفت پدیده انتشار موج بلست در محیط محصور شده و انعکاس آن از سطوح صلب به شکل قابل قبولی با شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار اتوداین پیش‌بینی شده است. جهت صحت‌سنجی پدیده تأثیر موج شوک بر بتن مسلح نیز از مدل

مراحل و روش تعیین مقدار بهینه ماده منفجره H-6 که می‌توان از آن به کرات برای انجام آزمایش انفجاری در اتاقک استفاده کرد، در ادامه توضیح داده شده است. برای این منظور لازم است که از شبیه‌سازی عددی استفاده شود. زیرا همان‌طور که در مقدمه گفته شد این روش هم هزینه و خطر انجام آزمایش‌های تجربی را ندارد و هم اینکه نتایج حاصل از آن دقت مناسبی دارد. در ضمن با انجام شبیه‌سازی عددی می‌توان به راحتی آزمایش‌های انفجاری را تکرار کرده و تأثیرات متغیرهای دلخواه را مشاهده نمود. نرم‌افزارهای مختلفی همچون آباکوس^۱، ال اس داین^۲ و اتوداین برای شبیه‌سازی تأثیر بارگذاری انفجاری بر سازه به کار می‌روند که از بین آن‌ها هیدروکد اتوداین در این زمینه از بقیه توانمندتر است. بنابراین در این تحقیق از نرم‌افزار اتوداین جهت پیش‌بینی آسیب وارده به اتاقک در اثر انفجار داخلی استفاده شده است. روش برآورد جرم ماده منفجره و تعداد انفجارهای مجاز هم بر مبنای وقوع پدیده پوسته‌پوسته شدن در سطوح بیرونی اتاقک و بر اساس برون‌یابی نتایج به دست آمده می‌باشد. برای این منظور بر مبنای پارامتر DAMAGE در نرم‌افزار اتوداین که همان آسیب کلی (D) در معادله RHT است، عمل می‌شود. این پارامتر همان‌طور که قبلاً گفته شد میزان تحمل بار را در بتن نشان می‌دهد و مقدار عددی آن بین صفر و یک است. اگر مقدار آن برابر صفر باشد یعنی هیچ تغییری در مقاومت بتن به وجود نیامده است. افزایش آن به معنی کاهش مقاومت بتن است و با رسیدن به مقدار یک، بتن تخریب می‌شود.

در این تحقیق چون هدف تعیین مقدار جرم ماده منفجره‌ای است که بتوان با استفاده از آن آزمون دو اتاق را تکرار کرد به‌طوری که تخریبی در سازه اتفاق نیفتد و نیز با توجه به زمان بسیار طولانی حل مسئله، با رسیدن آسیب ناشی از پوسته‌پوسته شدن به مقدار ۰/۱، حل مسئله متوقف شده و شبیه‌سازی بعدی با کاهش جرم ماده منفجره انجام می‌شود.

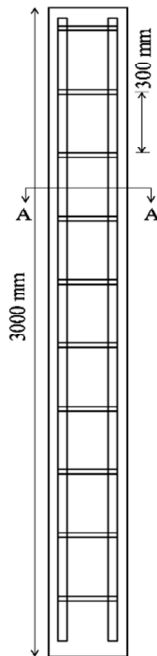
بارگذاری انفجاری سازه و پاسخ آن پدیده‌های بسیار پیچیده غیر خطی هستند. بنابراین برای اعتبارسنجی باید نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی مقایسه شوند. مهارت‌های قابل توجهی برای ارزیابی خروجی کدهای رایانه‌ای نیاز است. بدون داشتن این مهارت‌ها ممکن است ترکیبی از ایرادات مدل و تفسیر نابه‌جای خروجی‌های به دست آمده باعث نتیجه‌گیری نادرست و یا بی‌معنی شود. از این رو نخستین گام عملی در این تحقیق اثبات صحت شبیه‌سازی عددی پدیده انفجار داخلی و تأثیر موج بلست بر سازه بتن مسلح است.

۷- اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی

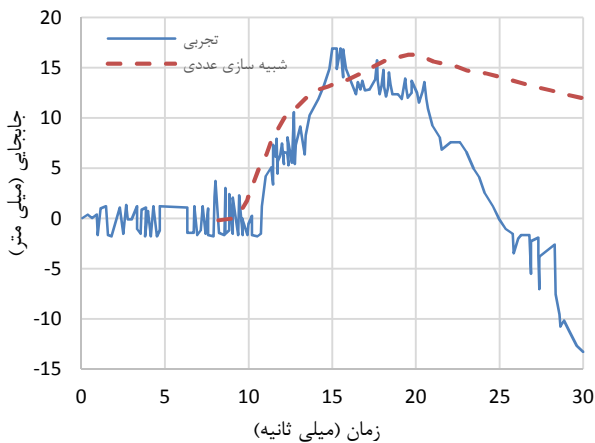
پدیده انفجار داخلی را می‌توان در دو فاز ارزیابی کرد. یکی انتشار و

1- Abaqus
2- LS-Dyna

جای خود ثابت شدند. جهت اندازه‌گیری میزان تغییر مکان در ستون از یک سنج در ارتفاع ۱۸۰۰ میلی‌متری از سطح زمین، در وجه رو به انفجار و با فاصله یکسان از سطوح جانبی ستون استفاده شده است [۱۱]. در شکل (۹) نمودارهای جابه‌جایی نقطه قرارگیری سنج در اثر انفجار در دو حالت شبیه‌سازی عددی و تجربی نتیجه تجربی [۱۱] با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند کلی تغییر مکان ستون در حالت واقعی به‌خوبی با شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار اتوداین پیش‌بینی شده است. تفاوت حداکثر تغییر مکان ستون در دو نمودار شکل (۹)، ۱/۳۳٪ است که نشان‌دهنده دقت مناسب شبیه‌سازی انجام شده می‌باشد.

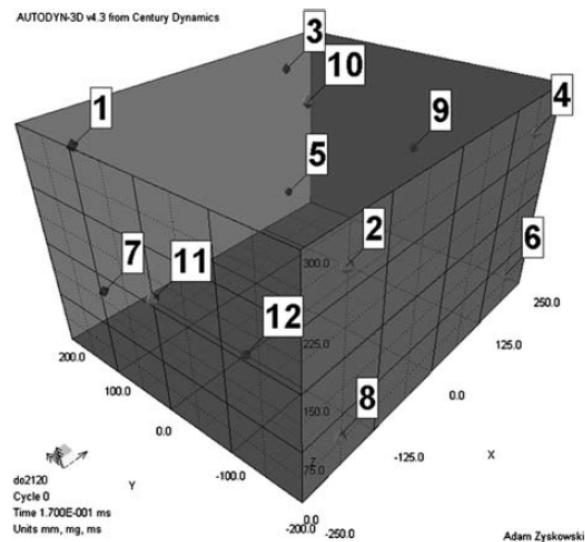


شکل ۱۱- نمای کلی ستون بتنی و عناصر تقویت کننده آن [۱۱].

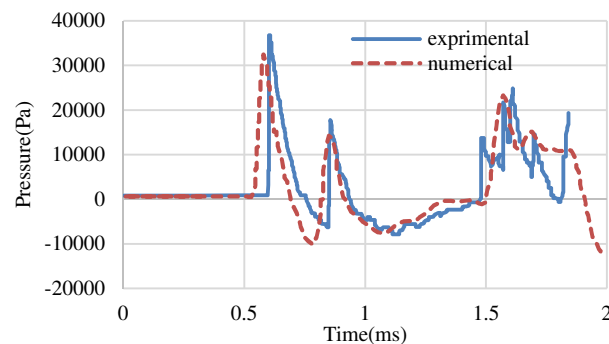


شکل ۱۲- مقایسه نتیجه حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتیجه تجربی [۱۱].

عددی و نتایج تجربی ارائه شده توسط ابلدی و برایماه [۱۱] استفاده شده است. مسئله مورد تحلیل در این مرجع، یک ستون بتنی است که توسط چهار میلگرد فولادی به‌صورت عمودی و تعدادی خاموت به‌صورت افقی مسلح شده است. ارتفاع ستون ۳۰۰۰ میلی‌متر و ابعاد سطح مقطع آن ۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر است. قطر میلگردهای عمودی و خاموت‌ها به ترتیب ۲۵ میلی‌متر و ۱۰ میلی‌متر است. ماده منفجره مورد استفاده ۷۵ کیلوگرم ANFO به‌صورت نیم‌کروی است که در فاصله ۲۶۱۰ میلی‌متری از ستون قرار دارد. شکل (۱۱) نمای کلی از ستون به همراه شبکه‌بندی میلگردها را نشان می‌دهد.



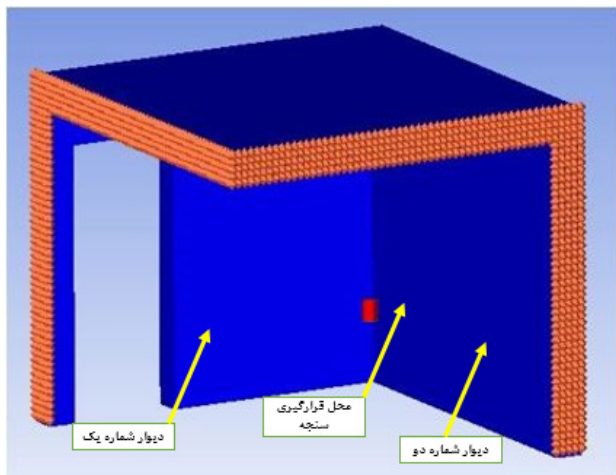
شکل ۹- موقعیت فشارسنج‌ها در مدل‌سازی عددی زوسکفسکی [۱۲].



شکل ۱۰- نمودار فشار-زمان در انفجار داخلی به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی با اتوداین در مقایسه با کار تجربی [۱۲].

در حل عددی، برای شبکه‌بندی محاسباتی بتن از المان‌های مکعبی با ابعاد ۳۰ میلی‌متر استفاده شده است [۱۱]. فاصله خاموت‌ها از یکدیگر ۳۰۰ میلی‌متر و تعداد آن‌ها ۱۰ عدد است. شرط مرزی خروج سیال جهت خروج موج شوک به همه سطوح هوا اعمال شد. فصل مشترک بین هوا و زمین هم به‌عنوان یک سطح صلب که موج شوک را منعکس می‌کند در نظر گرفته شد. دو سر ستون هم با شرط مرزی گیردار در

آسیب به دیوار وارد می‌شود، تنها دو دیوار نزدیک محل انفجار و سقف اتاقک مدل شده‌اند و بقیه دیوارها با اعمال شرایط مرزی مناسب، به صورت سطوحی صلب که در آنها شرط مرزی انعکاس کامل موج شوک برقرار است در نظر گرفته شده‌اند. در این شکل نواحی نارنجی رنگ محل اعمال شرط مرزی گیردار روی دیوارها را نشان می‌دهند. با اعمال این شرط مرزی، سرعت در هر سه جهت دستگاه مختصات برابر صفر است.



شکل ۱۳- مدل سه بعدی اتاقک در تحقیق حاضر.

بتن مورد استفاده از نوع Conc-35MPa انتخاب شده که در کتابخانه نرم افزار اتوداین موجود می‌باشد. برای مدل سازی بتن حلگر لاگرانژی به کار رفته و مشخصات این بتن در جدول (۱) نشان ارائه شده است. هم‌چنین از فولاد ۴۳۴۰ جهت مدل سازی میلگردها استفاده و مدل سازی آن با حلگر Beam انجام شده است. جدول (۲) مشخصات آن را نشان می‌دهد.

ماده منفجره H-6 با استفاده از معادله حالت JWL در نرم افزار مدل شده است. ثوابت این معادله در جدول (۳) ارائه شده است. هوای به کار رفته در شبیه سازی عددی نیز با حلگر اوپلری و با استفاده از معادله حالت گاز ایده آل و در شرایط اتمسفری مدل شده است.

۸-۱- عدم وابستگی نتایج به اندازه سلول های محاسباتی در بتن

برای بررسی عدم وابستگی نتایج به اندازه سلول های محاسباتی در بتن سه اندازه ۵۰ میلی متر، ۴۰ میلی متر و ۲۰ میلی متر برای شبکه بندی بتن در نظر گرفته شد. روی دیوار شماره دو در نقطه ای که نزدیک ترین فاصله را تا محل قرارگیری ماده منفجره دارد، سه عدد سنججه در راستای ضخامت دیوار و در امتداد مرکز ماده منفجره به فواصل ۱۰۰ میلی متر از یکدیگر قرار داده شده است. این سنججه ها از سطح داخلی دیوار تا سطح بیرونی آن به ترتیب با شماره های یک تا سه مشخص می‌شوند. متوسط حداکثر تغییر مکان دیوار بتنی در روبه روی ماده منفجره (که میانگین مقادیر به دست آمده از سنججه‌هاست) در مدت زمان ۳۰ میلی ثانیه در جدول (۴) نشان داده شده است.

عمده تفاوت در نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و تجربی به دو علت است. نخست شرط مرزی انعکاس کامل موج شوک از سطح که در شبیه سازی عددی در نظر گرفته شده است. دوم شرط مرزی گیردار در دو سر ستون که در شبیه سازی عددی دو سر ستون در هیچ راستایی هیچ حرکتی ندارند. در حالی که در آزمایش تجربی هیچ کدام از این دو شرط به این صورت برقرار نیست.

یک سری روابط تحلیلی جهت برآورد میزان حداکثر بیش فشار ناشی از موج بلست و هم‌چنین افزایش فشار ناشی از انعکاس موج شوک در هوا موجود می‌باشد. در ادامه، نتایج حاصل از این روابط با نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی مقایسه می‌شوند.

رابطه (۲۹) که توسط میلز [۱۳] ارائه شده، حداکثر بیش فشار استاتیک را بر حسب فاصله مقیاس شده در انفجار یک خرج کروی نشان می‌دهد.

$$P_{s0} = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \quad (29)$$

که در آن، P_{s0} بر حسب کیلو پاسکال و Z بر حسب $\frac{m}{kg^{1/3}}$ می‌باشد. در انفجار ۰/۱ کیلوگرم تی‌ان‌تی و در فاصله ۰/۸ متری از آن مقدار فشاری که از رابطه (۲۹) به دست می‌آید برابر $340/836 \times 10^3$ پاسکال می‌باشد. مقدار به دست آمده از شبیه سازی عددی در این حالت برابر $350/482 \times 10^3$ پاسکال است که به میزان ۲/۸۳ درصد با مقدار تحلیلی تفاوت دارد.

رابطه (۳۰) میزان افزایش فشار ناشی از موج بلست انعکاسی از سطح صلب را بر حسب فشار موج برخوردی و فشار هوا نشان می‌دهد [۱۴].

$$P_r = 2P_{s0} \frac{7P_0 + 4P_{s0}}{7P_0 + P_{s0}} \quad (30)$$

بر اساس این رابطه چنانچه موج بلست ایجاد شده در حالت گفته شده، به سطح صلب برخورد کند، موج شوک بازتابی فشاری برابر $1345/426 \times 10^3$ پاسکال دارد. شبیه سازی عددی مقدار $1432/61 \times 10^3$ پاسکال را در این حالت پیش بینی می‌کند. این دو مقدار به اندازه ۶/۴۸ درصد اختلاف دارند.

روابط بالا برای خرج کروی به کار می‌رود. از آنجاکه خرج به کار رفته در این تحقیق استوانه ای شکل می‌باشد با استفاده از رابطه (۳۱) میزان حداکثر بیش فشار ناشی از انفجار خرج استوانه ای به دست می‌آید [۱۴].

$$P_{s0} = \frac{19210}{Z^3} - \frac{186}{Z^2} + \frac{11.34}{Z} \quad (31)$$

رابطه (۳۱) عمدتاً زمانی به کار می‌رود که $P_{s0} < 2 \text{ psi}$ و $Z > 20 \frac{lb}{ft^{1/3}}$ باشد. بر اساس این رابطه حداکثر بیش فشار در اثر انفجار چهار پوند تی‌ان‌تی در حالی که $Z = 25 \frac{lb}{ft^{1/3}}$ باشد برابر است با ۱/۳۸۵ psi که با مقدار حاصل از شبیه سازی عددی که ۱/۴۹۴ psi است به میزان ۷/۸۷ درصد اختلاف دارد.

۸- جزئیات مدل سازی مسئله تحقیق

شکل (۱۳) مدل اتاقک مورد بحث به همراه موقعیت قرارگیری ماده منفجره را نشان می‌دهد. از آنجاکه عمده آسیب ناشی از انفجار به خاطر موج فرودی از سمت ماده منفجره می‌باشد و امواج انعکاسی از دیوارها تأثیر چندانی در تخریب ندارند و در نواحی نزدیک به ماده منفجره بیشترین

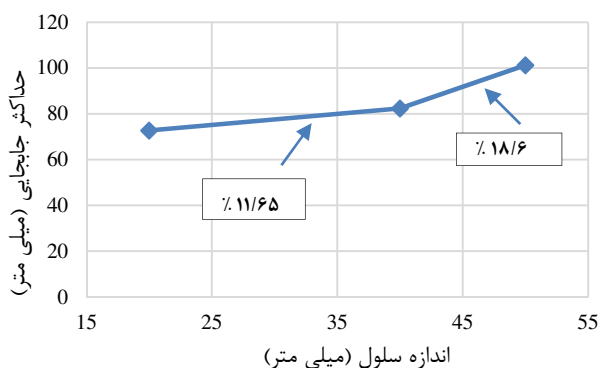
جدول ۳- مشخصات مدل مادی H-6 [۱۹].

Parameter	Value
Parameter A(kPa)	$7/580.7 \times 10^8$
Parameter B(kPa)	$8/51300.1 \times 10^6$
Parameter R ₁	۴/۹
Parameter R ₂	۱/۱
Parameter W	۰/۲
CJ Detonation velocity (m/s)	$7/47000.1 \times 10^2$
CJ Energy/unit volume (kJ/m ³)	$1/03 \times 10^7$
CJ Pressure(kPa)	$2/4 \times 10^7$

جدول ۴- تغییرات حداکثر جابه‌جایی نسبت به اندازه سلول‌های محاسباتی.

اندازه مش (میلی‌متر)	حداکثر جابه‌جایی (میلی‌متر)	زمان حل مسئله (ساعت)	درصد تفاوت نسبت به مش درشت‌تر
۵۰	۱۰۱/۲۳	۶	۱۸/۶
۴۰	۸۲/۴	۱۱	
۲۰	۷۲/۸	۳۹	۱۱/۶۵

در شکل (۱۴) نمودار تغییرات حداکثر جابه‌جایی نسبت به اندازه مش و درصد اختلاف نتایج با نتیجه حاصل از محاسبات با مش ریزتر نشان داده شده است. اگرچه با توجه به این نمودار در صورت استفاده از المان‌هایی با ابعاد ۲۰ میلی‌متر خطای کمتری ایجاد می‌شود اما از آنجاکه زمان شبیه‌سازی بسیار طولانی می‌شود و نیز با توجه به محدودیت امکانات سخت‌افزاری اندازه ۴۰ میلی‌متر برای مدل‌سازی بتن به کار رفته است.



شکل ۱۴- تغییرات حداکثر جابه‌جایی نسبت به تغییرات اندازه سلول‌های محاسباتی.

۹- نتایج و بحث

همان‌طور که قبلاً گفته شد در انفجار داخلی بارگذاری در دو فاز انجام می‌شود. نخست موج شوک به دیواره‌ها برخورد کرده و سپس منعکس می‌شود. در ادامه این موج انعکاس یافته به سایر سطوح برخورد کرده و

جدول ۱- مشخصات مدل مادی بتن [۱۷-۱۵].

Parameter	Value	Parameter	Value
Equation of State	P alpha	Thermal Conductivity (J/mKs)	۰/۰۰
Reference density (g/cm ³)	۲/۷۵	Compaction Curve	Standard
Porous density (g/cm ³)	۲/۳۱۴	Strength	RHT Concrete
Porous sound speed (m/s)	۲/۹۲	Shear Modulus (GPa)	۱۶/۷۰
Initial compaction pressure (kPa)	۲/۳۳	Compressive Strength (fc) (MPa)	۳۵/۰۰
Solid compaction pressure (GPa)	۶/۰۰	Tensile Strength (ft/fc)	۰/۱۰
Compaction exponent	۳/۰۰	Shear Strength (fs/fc)	۰/۱۸
Solid EOS	Polynomial 1	Elastic Strength / ft	۰/۷۰
Bulk Modulus A1 (GPa)	۳۵/۲۷	Elastic Strength / fc	۰/۵۳
Parameter A2 (GPa)	۳۹/۵۸	Failure	RHT Conc.
Parameter A3 (GPa)	۹/۰۴	Damage Constant, D1	۰/۰۴
Parameter B0	۱/۲۲	Damage Constant, D2	۱/۰۰
Parameter B1	۱/۲۲	Minimum Strain to Failure	۰/۰۱
Parameter T1 (GPa)	۳۵/۲۷	Residual Shear Modulus Fraction	۰/۱۳
Parameter T2 (kPa)	۰/۰۰	Tensile Failure	Hydro (Pmin)
Reference Temperature (K)	۲۹۵/۰۰	Erosion	Geometric Strain
Specific Heat (J/kgK)	۶۵۴/۰۰	Erosion Strain	۲
		Type of Geometric strain	Instantaneous

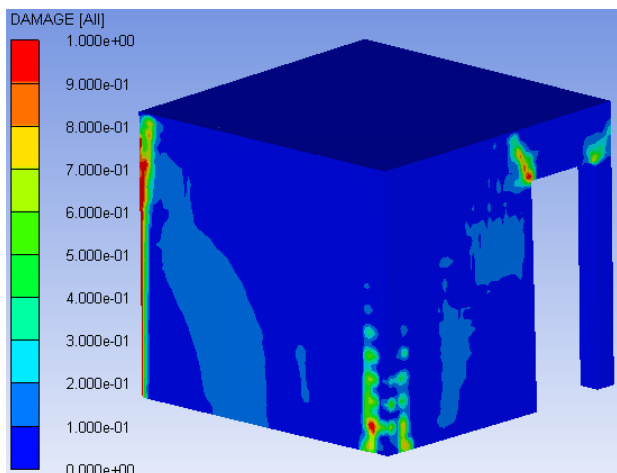
جدول ۲- مشخصات مدل مادی فولاد [۱۸].

Parameter	Value	Parameter	Value
Equation of State	Linear	Melting Temperature (K)	۱۷۹۳/۰۰
Reference Density (g/cm ³)	۷/۸۳	Strain Rate Constant	۰/۰۱۴
Bulk Modulus (GPa)	۱۵۹/۰۰	Strain Rate Correction	1st Order
Reference Temperature (K)	۳۰۰/۰۰	Failure	Principal stress
Specific Heat (J/kgK)	۴۷۷/۰۰	Principal Tensile Failure Stress (MPa)	۶۰۰/۰۰
Strength	Johnson Cook	Melting Temperature (K)	۱۷۹۰/۰۰
Shear Modulus (GPa)	۷۷/۰۰	Ref. Strain Rate (/s)	۱/۰۰
Yield Stress (MPa)	۴۰۰/۰۰		

برقرار است (سطح گیردار). در گوشه‌های اتاقک به دلیل وجود گوشه تیز، تمرکز تنش افزایش یافته و لذا آسیب شدیدی وارد شده است. در سطوحی هم که با اعمال شرط مرزی گیردار، ثابت نگه داشته شده‌اند چون مقاومت زیادی در برابر تغییر شکل و جابه‌جایی وجود دارد و همانند گوشه‌های تیز عمل می‌کند، بنابراین سازه در این نواحی تنش زیادی را متحمل شده و در نتیجه تخریب می‌شود. ناحیه سومی که متحمل آسیب شده است، نواحی وسیعی از سطوح پشتی است که در آنجا پدیده پوسته‌پوسته شدن رخ داده است.

جهت کاهش آسیب ناشی از تمرکز تنش در گوشه‌ها و نواحی تیز سازه می‌توان در این قسمت‌ها انحنا ایجاد کرد تا گوشه‌های تیز حذف شوند. اما در خصوص آسیب ناشی از پوسته‌پوسته شدن باید گفت که بدون تغییری اساسی در مشخصات سازه از قبیل افزایش مقاومت بتن و یا تقویت شبکه‌بندی میلگردها نمی‌توان انتظار کاهش آن را داشت. از آنجاکه در کار حاضر مشخصات سازه ثابت بوده و تنها متغیر مسئله، جرم ماده منفجره است، بنابراین تنها راهکار برای کاهش آسیب ناشی از پوسته‌پوسته شدن، کاهش جرم H-6 است. لذا در ادامه آنچه در این تحقیق مبنای تخمین عمر سازه و تعیین تعداد دفعات مجاز انفجار در اتاقک خواهد بود، وقوع پدیده پوسته‌پوسته شدن در سطوح پشتی سازه است.

با توجه به اینکه در انفجار دو کیلوگرم H-6، در سازه مورد تحقیق پدیده پوسته‌پوسته شدن دیوارها روی داده، بنابراین تحمل انفجار داخلی این مقدار ماده منفجره را ندارد. در ادامه مقاومت سازه در برابر انفجار با وزن‌های پایین‌تر بررسی می‌شود.



شکل ۱۷- آسیب وارده به وجه بیرونی سازه در اثر انفجار دو کیلوگرم H-6

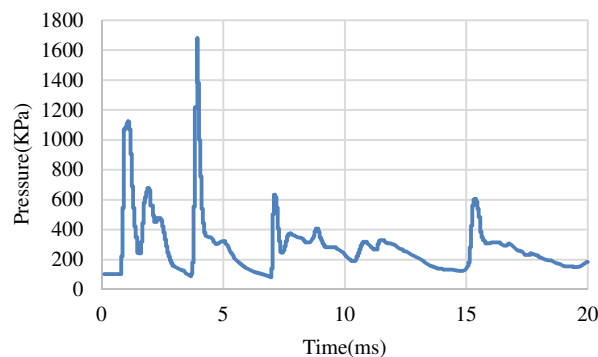
۹-۲- یک کیلوگرم H-6

با کاهش جرم ماده منفجره به یک کیلوگرم در سومین انفجار پوسته‌پوسته شدن در وجه بیرونی دیوار شماره دو رخ می‌دهد. در شکل (۱۸) محل وقوع پوسته‌پوسته شدن نشان داده شده است.

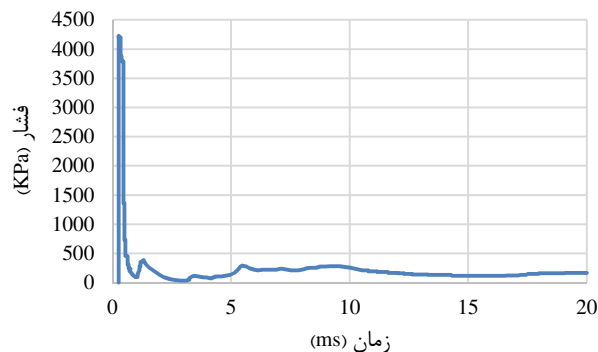
زنجیره‌ای از انعکاس‌های متوالی را به وجود می‌آورد. در شکل (۱۵) انعکاس متوالی امواج بلست در مرکز سقف اتاقک را در اثر انفجار دو کیلوگرم H-6 نشان داده شده است.

در ابتدای تحقیق گفته شد که عمده آسیب ناشی از انفجار در اثر برخورد موج بلست فرودی از سمت ماده منفجره رخ داده و امواج انعکاسی تأثیر چندانی در تخریب و یا آسیب رساندن به سازه ندارند. شکل (۱۶) این مطلب را نشان می‌دهد. این شکل نمودار فشار-زمان موج بلست را در محل سنج شماره یک (نقطه روبه‌روی مرکز خرج در سمت داخلی دیوار شماره دو) نمایش می‌دهد.

پاسخ سازه به بارگذاری‌های با قدرت مختلف در ادامه بررسی و تحلیل شده است. متغیر مورد بررسی، پارامتر آسیب است که محدوده مقادیر آن در نواحی مختلف با کانتورهای رنگ‌های نمایش داده شده است. جرم اولیه H-6 دو کیلوگرم است که با توجه به نتایج حاصله، پله‌پله کاهش می‌یابد.



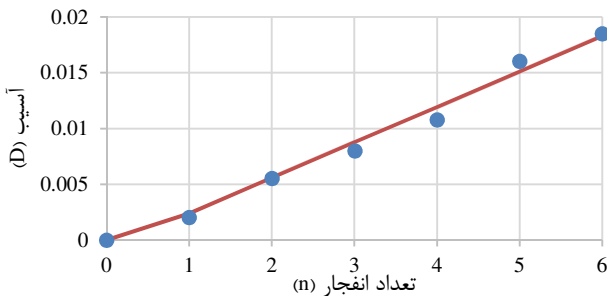
شکل ۱۵- نمودار فشار-زمان در مرکز سقف اتاقک در انفجار دو کیلوگرم H-6



شکل ۱۶- نمودار فشار-زمان مربوط به سنج شماره یک در انفجار دو کیلوگرم H-6

۹-۱- دو کیلوگرم H-6

شکل (۱۷) کانتور آسیب وارد به سازه در اثر انفجار دو کیلوگرم ماده منفجره در مدت زمان ۱۰۰ میلی‌ثانیه را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهند که در سه ناحیه سازه، بتن آسیب دیده است. یکی گوشه‌های اتاقک و دیگری عمده سطوحی که در آن‌ها شرط مرزی سرعت صفر



شکل ۱۹- تغییرات آسیب نسبت به تغییرات تعداد انفجار به همراه تابع خطی پیش‌بینی کننده، ۰/۵ کیلوگرم H-6.

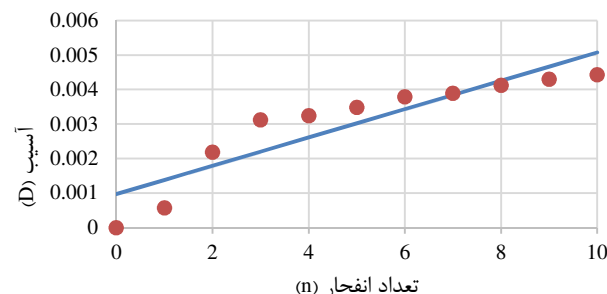
۹-۴-۰/۲۵ کیلوگرم H-6

در این قسمت از نتایج ۱۰ بار تکرار آزمایش انفجاری جهت برآورد آسیب استفاده می‌شود. شکل (۲۰) مشخص کننده میزان آسیب در ناحیه وقوع پوسته‌پوسته شدن در طول ۱۰ مرتبه انفجار متوالی است. این نقاط نشان می‌دهند که به‌طور کلی با افزایش تعداد انفجارها سرعت افزایش آسیب در ناحیه مدنظر کندتر می‌شود. هم‌چنین روند کلی تغییرات آسیب به‌ویژه از انفجار چهارم به بعد را می‌توان به‌صورت خطی در نظر گرفت. بنابراین برای برون‌یابی داده‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی از تابع خطی استفاده می‌شود.

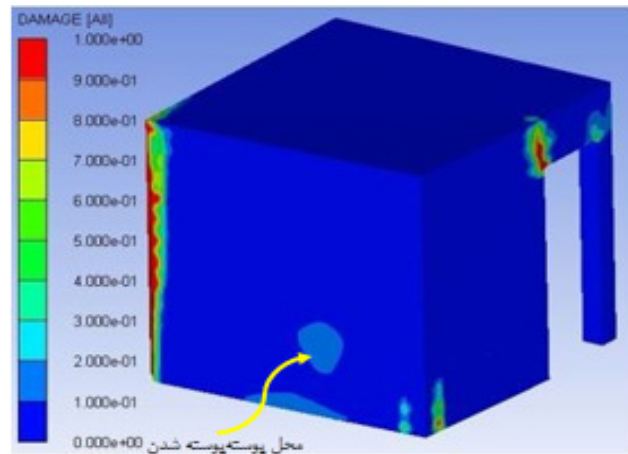
در شکل (۲۰) هم‌چنین نمودار تابع برازش کننده به همراه داده‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است. رابطه (۳۳) هم معادله این تابع را نشان می‌دهد. در این رابطه پارامتر کیفیت برازش برابر با ۰/۸۲۴۴ است.

$$D = 0.0004105n + 0.0009695 \quad (33)$$

بر اساس معادله (۳۳) بعد از حدود ۲۴۳۴ انفجار متوالی، میزان آسیب به یک می‌رسد. لازم به ذکر است که در اینجا پارامتر R^2 به نسبت از عدد ۱ دور است و این بدان معنی است که رفتار نمودار کاملاً خطی نیست. برای برازش از توابع با درجه‌های بالاتر هم می‌توان استفاده کرد اما با این کار تعداد انفجارهای متوالی مجاز به مقدار بسیار زیادی افزایش خواهد یافت. با لحاظ نمودن مسائل ایمنی و با توجه به اینکه در عمل در طراحی مواد منفجره مناسب برای محیط‌های بسته به بیش از این تعداد انفجار متوالی نیاز نیست، لذا از استفاده از برازش غیر خطی صرف نظر شد.



شکل ۲۰- تغییرات آسیب نسبت به تغییرات تعداد انفجار به همراه تابع خطی پیش‌بینی کننده، ۰/۲۵ کیلوگرم H-6.



شکل ۱۸- آسیب وارده به وجه بیرونی سازه در اثر انفجار یک کیلوگرم H-6، سومین انفجار.

لازم به ذکر است که به‌منظور شبیه‌سازی انفجارهای متوالی، در ابتدای انفجارهای دوم، سوم و... با اعمال شرط اولیه مناسب، سرعت و انرژی داخلی بتن و فولاد برابر صفر شده و شرایط هوا نیز به شرایط قبل از انفجار تغییر داده شده است. بدین ترتیب حالتی که در آن بعد از گذشت زمان طولانی سازه ساکن شده و نوسانات انرژی ناشی از انفجار در آن از بین رفته است معادل‌سازی می‌شود.

۹-۳-۰/۵ کیلوگرم H-6

با به‌کارگیری ۰/۵ کیلوگرم H-6، میزان آسیب وارده به سازه به‌شدت افت می‌کند و بنابراین در این حالت انفجار چندین مرتبه تکرار شده است. شکل (۱۹) تغییرات پارامتر آسیب نسبت به تعداد انفجارها را در محل سنج شماره سه (نقطه روبه‌روی مرکز خرج در سمت بیرونی دیوار شماره دو) در اثر شش انفجار متوالی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد انفجارها، میزان آسیب هم افزایش یافته است. چون آسیب وارده در اثر شش انفجار پشت سر هم، هنوز مقدار کوچکی است بنابراین تعیین حالتی که در آن، آسیب قابل توجهی رخ می‌دهد، با استفاده از شبیه‌سازی عددی بسیار زمان‌بر است. در نتیجه با استفاده از برون‌یابی نتایج نشان داده شده در شکل (۱۶)، حالتی که در آن ناحیه قرارگیری سنج شماره سه متحمل آسیب برابر یک (تخریب) می‌شود، پیش‌بینی شده است. برای این منظور با توجه به روند کلی نمودار نشان داده شده در شکل (۱۹) از تابع چندجمله‌ای درجه اول (خطی) برای برازش نقاط به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود. رابطه (۳۲) معادله این تابع را نشان می‌دهد. در این رابطه پارامتر کیفیت برازش R^2 برابر با ۰/۹۶۵۱ است.

$$D = 0.0003181n - 0.0007986 \quad (32)$$

بر اساس معادله (۳۲) پس از وقوع حدود ۳۱۵ انفجار، مقدار آسیب به یک می‌رسد. با توجه به شکل (۱۹) و مقدار پارامتر R^2 که عدد ۱ نزدیک است، نتیجه می‌شود که روند تغییرات آسیب را می‌توان با تقریب خوبی به‌صورت خطی در نظر گرفت.

۱۰- نتیجه گیری

نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نشان داد که عمده آسیب وارده به سازه در سه ناحیه است. نخست گوشه‌های اتاقک، دوم قسمت‌هایی که در آن‌ها شرط مرزی سرعت صفر اعمال شده است (که در واقع همان گوشه‌ها هستند)، و سوم پشت دیوارها که در آن‌ها پدیده پوسته‌پوسته شدن اتفاق می‌افتد. از آنجاکه می‌توان در گوشه‌های اتاقک با ایجاد انحنا و گسترش سطح از میزان آسیب کاست، پدیده پوسته‌پوسته شدن به‌عنوان ملاک ارزیابی مقاومت سازه نسبت به بارگذاری انفجاری مقادیر مختلف H-6 تعیین شد. در صورت استفاده از دو کیلوگرم ماده منفجره، در همان انفجار اول در وجه پشتی اتاقک پوسته‌پوسته شدن رخ می‌دهد. چنانچه یک کیلوگرم ماده منفجره برای انجام آزمایش انفجاری مورد استفاده قرار گیرد، پوسته‌پوسته شدن در سومین انفجار پیاپی رخ خواهد داد. استفاده از مقادیر ۰/۵ کیلوگرم و ۰/۲۵ کیلوگرم ماده منفجره موجب کاهش چشمگیر در آسیب وارد به سازه می‌شود. بنابراین بارگذاری انفجاری سازه در حالتی که دو مقدار فوق‌الذکر برای ماده منفجره در نظر گرفته شده است، به ترتیب شش و ده بار تکرار شد تا آثار انفجارهای متوالی بهتر مشخص شود. با توجه به واقعی بودن ابعاد سازه، انجام شبیه‌سازی بسیار زمان‌بر بوده و بنابراین در مورد مقادیر ۰/۵ کیلوگرم و ۰/۲۵ کیلوگرم، تعداد آزمایش‌های انفجاری مجاز تا قبل از وقوع تخریب در سطح پشتی سازه (پدیده پوسته‌پوسته شدن) با استفاده از برون‌یابی نمودار تغییرات پارامتر آسیب بر حسب تعداد انفجارها پیش‌بینی شد. با توجه به نمودار روند تغییرات آسیب، برای پیش‌بینی تعداد انفجارهایی که منجر به وقوع تخریب می‌شوند از تابع چندجمله‌ای خطی استفاده شد. نتیجه به‌دست آمده نشان داد در صورتی که خرج H-6 جرم ۰/۵ کیلوگرم داشته باشد، بعد از وقوع ۳۱۵ انفجار و در صورتی که از ۰/۲۵ کیلوگرم H-6 استفاده شود پس از ۲۴۳۴ انفجار میزان آسیب به یک رسیده و تخریب سازه اتفاق می‌افتد.

مراجع

- [4] Kevorkian, S.; Duriez, N.; Loiseau, O. "Laboratory Scale Tests for Internal Blast Loading"; WIT. Trans. Built. Env. 2010, 113, 125-136.
- [5] Feldgun, V. R.; Karinski, Y. S.; Yankelevsky, D. Z. "Some Characteristics of an Interior Explosion within a Room without Venting"; Struct. Eng. Mech. 2011, 38, 633-640.
- [6] Yang, Y. D.; Li X. D.; Wang X. M. "Study on Damage Characteristics of Reinforced Concrete Structure for Internal Explosion"; Proc. of Applied Mechanics and Materials 2013, 1312-1316.
- [7] Weerheijm, J.; Lim, H. S. "Break-up of Concrete Structures under Internal Explosion"; Proc. of the FraMCoS-6 Int. Conf. 2007, 14 21.
- [۸] خیراندیش، محمدرضا؛ علیزاده صوری، بهزاد "بررسی تأثیر موج انفجار بر روی تونل‌های زیرزمینی مطالعه موردی: محدوده شمال تهران"؛ مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری‌های پدافند نوین، سال ششم، شماره ۳، صفحه ۲۰۱، ۱۳۹۵.
- [۹] طهماسب زاده، مهدی؛ پیمان، صفا "بررسی تأثیر موج گیر در تونل با خم ۹۰ درجه بر کاهش فشار ناشی از انفجار خارج از تونل"؛ مجله علمی پژوهشی مواد علوم و فناوری‌های پدافند نوین، سال پنجم، شماره ۶، صفحه ۲۰۱، ۱۳۹۴.
- [10] Zhou, X. Q.; Kuznetsov, V. A.; Hao, H.; Waschl, J. "Numerical Prediction of Concrete Slab Response to Blast Loading"; Int. J. Impact. Eng., 2008, 35, 1186-1200.
- [11] Abladey, L.; Braimah, A. "Near-Field Explosion Effects on the Behaviour of Reinforced Concrete Columns: a Numerical Investigation"; Int. J. Prot. Struct. 2014, 5, 475-499.
- [12] Zyskowski, A.; Sochet, I.; Mavrot, G.; Bailly, P.; Renard, J. "Study of the Explosion Process in a Small Scale Experiment-Structural Loading"; J. Loss. Prevent. Proc. 2004, 17, 291-299.
- [13] Mills, C. A. "The Design of Concrete Structure to Resist Explosions and Weapon Effects"; Proc. of the 1st Int. Conf. on Concrete for Hazard Protections 1987, 61-73.
- [14] Bulson, P. S. "Explosive Loading of Engineering Structures"; CRC Press: Southampton, 2002.
- [15] Riedel, W.; Thoma, K.; Hiermaier, S.; Schmolinske, E. "Penetration of Reinforced Concrete by BETA-B-500, Numerical Analysis using a New Macroscopic Concrete Model for Hydrocodes"; Proc. Int Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures 1999, 315-322.
- [16] Riedel W. "Beton Unter Dynamischen Lasten"; Ed. Fraunhofer EMI: IRB-Verlag, 2004.
- [17] Riedel, W.; Kawai, N.; Kondo, K. "Numerical Assessment of Impact Strength Measurements in Concrete Materials"; Int. J. Impact Eng. 2009, 36, 283-293.
- [18] Johnson, G. R.; Cook, W. H. "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures"; Eng. Fract. Mech. 1985, 21, 31-48.
- [19] Dobratz, B. M.; Crawford, P. C. "LLNL Explosives Handbook, Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants"; Lawrence Livermore National Laboratory, California, 1985.
- [1] Kim, K.; Wilson, W.; Colon, J.; Kreitinger, T.; Needham, C.; Miller, R.; Orphal, J.; Rocco, J.; Thomsen, J.; Benningfield, L. V. "Non-Ideal Explosive Performance in a Building Structure"; WIT. Trans. Built. Env. 2013, 11, 87-95.
- [2] Kinney, G. F.; Graham, K. J. "Explosive Shock in Air"; Springer: New York, 1985.
- [3] Smith, P. D.; Hetherington, J. G. "Blast and Ballistic Loading of Structures"; Digital Press: Oxford, 1994.