

Evaluation of Penetration Depth Induced by the Impact of a GBU-39 Projectile on a Protective Concrete Shelter

Ali asghar Abotalebi

Ph.D Candidate, Department Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Alireza Fiouz *

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran.

Reza Esmaeilabadi

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

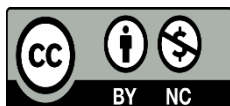
Alireza_fiouz@yahoo.com

Keywords

Impact,
Penetration,
protective
concrete shelters,
ACE,
LS-DYNA

Abstract

The resistance of concrete targets against penetrators is of great importance. This study investigates the penetration depth caused by the impact of a GBU-39 projectile on a protective concrete shelter. Numerical simulations were performed using the LS-DYNA software. To estimate the penetration depth, empirical equations from the Ballistic Research Laboratory (BRL), the U.S. Army Corps of Engineers (ACE), and the Young-Wiffen relation were employed. The simulation results were compared with these equations. The findings indicate that, in terms of accuracy and similarity to the simulation results, the equations can be ranked as follows: the ACE equation, the BRL equation, and the Wiffen relation. In other words, the ACE equation showed the highest accuracy and the greatest similarity to the simulation outcomes. The simulation of the projectile impacting the protective concrete shelter also revealed that with projectile velocity increased by 10%, 15%, 20%, and 25%, the kinetic energy rose by 17%, 21%, 40%, and 46%, respectively, while the penetration depth increased by up to 35% at a maximum velocity increase of 25%.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

بررسی میزان عمق نفوذ

ناشی از ضربه برخورد پرتابه (GBU39) بر شیلتر محافظ بتنی

علی اصغر ابوطالبی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علیرضا فیوض*

استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

رضا اسمعیل آبادی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

Alireza_fiouz@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۲۱ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: ۲۵ دی ۱۴۰۳

چکیده

بررسی مقاومت اهداف بتنی در برابر نفوذکننده‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این تحقیق به بررسی میزان عمق نفوذ ناشی از ضربه برخورد پرتابه (GBU39) بر شیلتر محافظ بتنی پرداخته شده است. جهت شبیه‌سازی از نرم‌افزار LS-DYNA استفاده شده است. جهت تعیین میزان عمق نفوذ روابط آزمایشگاه تحقیقات بالستیک (BRL)، گروه مهندسی ارتش امریکا (ACE) و رابطه ویفن مورد استفاده قرار گرفته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیز با روابط فوق مقایسه و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد از لحاظ دقت و تشابه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی به ترتیب می‌توان به رابطه گروه مهندسی ارتش امریکا (ACE)، آزمایشگاه تحقیقات بالستیک (BRL) و رابطه ویفن اشاره نمود. به عبارت دیگر بررسی انجام گرفته بیشترین تشابه و دقت بالاتر نسبت به سایر روابط، در رابطه گروه مهندسی ارتش امریکا (ACE) مشاهده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرتابه در شیلتر محافظ بتنی نشان می‌دهد که مقدار انرژی جنبشی نیز با افزایش ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ سرعت پرتابه به ترتیب ۱۷٪، ۲۱٪، ۴۰٪ و ۴۶٪ افزایش داشته است و همچنین با افزایش حداکثر ۲۵٪ سرعت برخورد پرتابه به شیلتر محافظ بتنی مقدار عمق نفوذ تا ۳۵٪ افزایش یافته است.

واژگان کلیدی: ضربه، نفوذ، شیلترهای محافظ بتنی، ACE، LS-DYNA

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱-مقدمه

در طی سالیان گذشته آزمایش‌های فراوانی به جهت برآورد میزان نفوذ پرتابه‌ها در اهداف بتنی ساده و مسلح انجام شده است. باتوجه به هزینه‌های بالای روش‌های تجربی و از طرف دیگر توسعه نرم‌افزارهای مهندسی، اخیراً تلاش‌های زیادی شده است تا مسئله نفوذ پرتابه در اهداف بتنی به صورت عددی تحلیل شود. در بین نرم‌افزارهای مهندسی نرم‌افزار LS-DYNA قابلیت بالایی جهت تحلیل مسائل نفوذ را دارا است. البته روش‌های تحلیلی متفاوتی به جهت تخمین رفتار بتن‌های ساده و مسلح در هنگام نفوذ پرتابه ارائه شده‌اند. در سال ۱۹۹۲ میلادی محققان مطالعه گسترده‌ای در مورد پیش‌بینی عمق نفوذ پرتابه در بتن و خاک انجام دادند که در محیط آزمایشگاهی توانستند با استفاده از پرتابه‌ای که با تفنگ گازی به سمت بتن و خاک پرتاب می‌شد، به نتایجی دست پیدا کنند [۱]. در سال ۱۹۹۳ محققان توانست آزمایشی را بر روی بتن مسلح انجام دهد او در بتن سه ردیف آرماتور قرار داد و با سرعت‌های مختلف مبادرت به شلیک گلوله در بتن کرد و سرعت باقیمانده را محاسبه نمود [۲]. در سال ۲۰۰۲ پژوهشگران توانستند شبیه‌سازی عددی برای نفوذ گلوله در بتن را با استفاده از مدل ماده RHT^۱ در حالت ۲ دو بعدی و ۳ بعدی انجام دهند و نتایج شبیه‌سازی را با نمونه آزمایشگاهی انجام شده مقایسه کنند [۳]. در سال ۲۰۰۲ در یکی از دانشگاه‌های چین آزمایش هانچک در حالت بتن مسلح مدل‌سازی و رفتار شلیک موشک را در حالت مورب بررسی شد [۳]. محقق در سال ۲۰۰۵ با کمک نرم‌افزار LS-DYNA نفوذ کامل و عبور پرتابه از یک هدف بتن مسلح شبیه‌سازی و نتایج را با آزمایشات هانچک مقایسه کرد که نتایج قابل قبولی را نشان می‌دهند [۵]. محققان دیگر در سال ۲۰۰۶ عمق نفوذ یک پرتابه با نوک اجایو در یک هدف بتنی را با کمک نرم‌افزار اتوداین بررسی کرد و برای این منظور روش‌های مختلف اوپلری و لاگرانژی و بدون مش را مورد استفاده قرار داد و سپس نتایج حاصل از هر کدام از این روش‌ها را با نتایج تجربی مقایسه کرد [۶]. در همان سال محقق‌هایی دیگر از کشور چین توانستند آزمایش هانچک را با ارتقاء مدل ماده جانسون هلمکوئیست که در نرم‌افزار LS-DYNA تعریف شده است، شبیه‌سازی کنند و به نتایج قابل قبولی دست یابند [۳]. در سال ۲۰۰۷ پژوهشگرانی دیگر نیز توانستند فرآیند نفوذ پرتابه را در بتن با

استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA شبیه‌سازی کنند. آنها با تغییراتی پارامترهای مدل ماده جانسون هلمکوئیست در نرم‌افزار LS-DYNA توانستند تأثیر تغییر ضرایب و پارامترها را در قالب نمودارهایی ارائه دهند [۳]. محققان از ژاپن در سال ۲۰۰۹ توانست نتایج پرتابه سرعت بالا را در هدف بتن مسلح با انتخاب مدل ماده MAT_PSEUDO_TENSOR موجود در نرم‌افزار LS-DYNA بررسی کند [۳]. در کشور عزیزمان نیز با توجه به اهمیت پدافند غیر عامل که در سالهای اخیر نگاه ویژه‌ای از سوی دولت و شرکت‌های وابسته به آن انجام شده است، باعث گردیده دانشگاه‌ها مطالعات گسترده‌ای در این رابطه انجام دهند. در سال ۱۳۸۷ محققانی توانستند تئوری انبساط حفره کروی مدل‌های ارائه شده توسط فورستال را با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA به جهت تحلیل نفوذ پرتابه در خاک و بتن بهبود بخشند [۳].

پژوهشگران در سال ۲۰۱۴ به بررسی رفتار دالهای ساندویچی تحت بار ضربه‌ای پرداختند. در این پژوهش رفتار ضربه ای صفحات ساندویچی را که شامل یک هسته بتنی سبک و دو صفحه فولادی که توسط اتصالات جی هوک به هم متصل شده‌اند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اتصالات جی هوک وسیله‌ای موثر برای قفل شدن صفحات فولادی بالا و پایین می باشد که از جدا شدن آنها هنگام برخورد جلوگیری می‌کند. سپس با تجزیه و تحلیل نتایج، به بیان تحلیلی برای پیش‌بینی رابطه بار و تورفتگی روی دال ساندویچی پرداختند [۱۱]. در سال ۲۰۲۱ پژوهشگران در زمینه رفتار پانل‌های بتنی در برابر بارهای ضربه تحقیقاتی را صورت دادند و به بررسی شبیه‌سازی عددی نفوذ بالستیک و رفتار ضربه‌ای سریع صفحات ساده و بتنی مسلح پرداختند. مطالعات آنها به دو بخش تقسیم شده است. بخش اول شامل مدل‌سازی عددی پانل بتنی مسلح است که با پرتابه کروی با استفاده از مدل پلاستیسیته آسیب بتن(CDP) نفوذ کرده است و قسمت دوم بر مقایسه مدل CDP و مدل آسیب جانسون-هولمکیست و توانایی آنها برای توصیف رفتار پانل بتنی تحت بارهای ضربه‌ای می‌باشد. نتایج نشان داد انرژی داخلی بتن با استفاده از مدل CDP نسبت به مدل آسیب جانسون-هولمکیست کمتر بدست آمده است و شکستگی شدید پانل و انرژی جنبشی بالای پرتابه با استفاده از مدل CDP قابل بررسی می‌باشد [۳]. علاوه بر مطالعات انجام شده بر روی تأثیر بارهای ضربه‌ای بر روی مقاطع بتنی، برخی محققین تحقیقاتی را بر روی تأثیر ضربه بر سازه‌های بتنی در شرایط خاص ارزیابی نمودند. در پژوهشی که توسط پژوهشگران در سال ۲۰۲۰ انجام

¹ Riedel-Hiermaier-Thoma

گرفت. از مهمترین هدف و نتیجه تحقیق وی می‌توان به یافتن همبستگی بین پاسخ آزمایشات ضربه‌ای و آسیب آتش‌سوزی اشاره نمود. آزمایشات ضربه اکو بر سطح خارجی عناصر سازه‌ای آسیب ندیده و آسیب دیده از یک ساختمان بتنی مسلح انجام شد و سپس برای ارزیابی چگونگی تأثیر آتش بر واکنش مواد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. اطلاعات مربوط به تخریب بتن، موقعیت مکانی و محتوای انرژی اجزای هارمونیک با موفقیت از اسکالوگرام سیگنال بدست آمد و در نهایت اثر آتش‌سوزی در اسکالوگرام سیگنال منعکس گردید [۳]. محققان نیز در سال ۲۰۱۱ تحقیقات خود را بصورت آزمایشگاهی در یک هسته بتنی به منظور بررسی نفوذ پرتابه در اهداف بتنی پرداختند [۳].

۲- شبیه‌سازی عددی

در این بخش به بررسی عددی نفوذ پرتابه در شیلتر محافظ بتنی پرداخته شده است. بدین ترتیب که پرتابه با پنج سرعت ۳۲۵، ۳۵۵، ۳۸۵، ۴۱۵ و ۴۴۵ متر بر ثانیه به شیلتر محافظ بتنی برخورد کرده است. پرتابه موردبررسی در این تحقیق نیز از نوع ۳۹GBU است. در ادامه نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روابط تجربی و آیین‌نامه ارتش آمریکا (در ارتباط با موضوع نفوذ) بررسی و جهت صحت سنجی مقایسه و مطابقت گردیده است.

۲-۱- مدل ماده بتن

(MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE)

در این تحقیق از مدل ماده جانسون هولکوئست برای مدل‌سازی شیلتر بتنی استفاده شده است. در مدل جانسون - هولکوئست، تنش معادل نرمال بر مبنای پارامتر خرابی D به‌صورت معادله (۱) است:

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (1)$$

به ترتیب تنش شکست نرمال و تنش معادل اولیه نرمال هستند. فرم کلی تنش معادل نرمال به‌صورت معادله (۲) است:

$$\sigma^* = \sigma / \sigma_{HEL} \quad (2)$$

که σ تنش معادل واقعی و σ_{HEL} تنش معادل در حد کشسان هیوگونیوت است. مقاومت اولیه و شکست نرمال به صورت معادل (۳) و (۴) است:

شد، مشخص گردید که دمای بالا، تأثیر منفی بر خواص مکانیکی بتن می‌گذارد. برای آزمایش آسیب، تخریل و خواص مکانیکی دیسک‌های ۱۰ ساله برزیلی که از قبل گرم شده بودند، از روش آزمایشی طراحی شده توسط تئوری ارتعاش رزونانس غیر خطی، روش تخریل نفوذ جیوه (MIP) و فشار فشار هاپکینسون (SHPB) استفاده شد. سرانجام با استفاده از روش آزمایش کشش شکستگی تحت فشار گازهای ۰/۳ مگاپاسکال، ۰/۴ مگاپاسکال و ۰/۵ مگاپاسکال که به ترتیب نشان دهنده سرعت ضربه ۷/۱۱ متر بر ثانیه، ۱۰/۲۶ متر بر ثانیه و ۱۳/۰۲ متر بر ثانیه بود، مقاومت کششی دینامیکی به دست آمد و رابطه کمی بین آسیب

و استحکام کششی تقسیم ماکروسکوپی ایجاد شد و مقدار متوسط پارامتر نمایی ۰/۲۸۱b بدست آمد [۳]. بارهای ضربه‌ای می‌توانند تأثیرات منفی زیادی بر ایمنی سازه‌های مهندسی عمران داشته باشند مانند ستون‌های لوله‌ای فولادی پر از بتن (CFST). مطالعه رفتار مکانیکی و تحلیل تنش ستون‌های CFST تحت بارهای ضربه‌ای برای اطمینان از ایمنی آنها در برابر چنین بارهایی بسیار مهم است. در حال حاضر نظارت بر تنش داخلی ستون‌های بتنی CFST تحت بارهای ضربه‌ای هنوز یک موضوع بسیار چالش برانگیز است. در مقاله‌ای که توسط محققانی دیگر با موضوع سنسور مبتنی بر PVDF برای نظارت بر استرس داخلی یک ستون لوله ای فولادی بتنی (CFST) تحت بارهای ضربه‌ای انجام پذیرفت سنسورهای هوشمند در نمونه لوله فولادی با بتن دایره‌ای شکل قرار گرفتند سپس نمونه در برابر بارهای ضربه‌ای آزمایش شد و داده‌های آزمایش جمع‌آوری شد. تاریخچه زمانی تنش بدست آمده از سنسور هوشمند PVDF تکامل تنش داخلی بتن هسته‌ای تحت بارهای ضربه‌ای را در مقایسه با منحنی نیروی ضربه- زمان نشان داد. شبیه‌سازی اجزای محدود غیر خطی از فرایند ضربه نیز انجام شد. نتایج شبیه‌سازی FEM با نتایج آزمایش تطابق خوبی داشت. نتایج نشان داد که سنسورهای پیزوالکتریک PVDF پیشنهادی، می‌توانند به طور مؤثر تنش داخلی ستون‌های لوله‌ای فولادی پر از بتن را تحت بارهای ضربه‌ای کنترل کنند [۳]. ارزیابی بتن‌های آسیب دیده توسط محقق دیگری از جمله موضوعاتی بود که برخی محققین در خصوص آن تحقیقاتی را انجام دادند. در همین راستا محقق با کمک همکاران پژوهشی با همین عنوان انجام دادند. کاربرد روش اکو- ضربه برای تشخیص آسیب حریق روی بتن با استفاده از تکنیک فرکانس زمان موجک مورد بررسی قرار

$$P = k_1 \mu + k_2 \mu^2 + k_3 \mu^3 + \Delta P \quad (۱۰)$$

وظیفه این مدل، سایش المان‌ها در زمان رسیدن کرنش و یا موارد دیگر تعریف شده به کرنش معین و غیره است. در بحث‌های ضربه و نفوذ و انفجار این مدل کاربرد فراوانی دارد و از جهتی دیگر در این گونه مسائل، المان‌ها ممکن است اعوجاج بیش از حدی داشته و شبیه‌سازی ناپایدار گشته و موجب خطا در تحلیل شوند. برای جلوگیری از اعوجاج‌های بیش از حد المان‌ها، وجود این مدل ضروری است.

عبارت کلی برای کرنش شکست به صورت معادله‌های (۱۱) و (۱۲) است:

$$\varepsilon_p^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln \varepsilon^*][1 + D_5 T^*] \quad (۱۱)$$

$$\varepsilon_p^f = [D_1 + D_2 \exp(1/\Delta D_3)][1 + D_4 \ln \varepsilon^*][1 + D_5 T^*] \quad (۱۲)$$

$$\sigma^* > 1/\Delta$$

در ضمن $\sigma^* = \sigma_m / \sigma$ نسبت تنش- فشار بی بعد است و σ_m متوسط ۳ تنش نرمال (اصلی) است و $\bar{\sigma}$ تنش معادل ون- مایز و ε^* نرخ کرنش بی بعد است [۱۸، ۱۹].

جدول ۱- مدل ماده بتن [۱۹]

مقدار عددی	خواص مصالح	مقدار عددی	خواص مصالح
0/00258	U_C	2310	R_0 (kg/m ³)
1/05	P_L (MPa)	13/5	G (GPa)
0/1	U_L	1/75	A
0/03	D_1	2/65	B
1	D_2	0/007	C
17/40	K_1 (GPa)	0/76	N
38/80	K_2 (GPa)	54/8	F_C (MPa)
29/80	K_3 (GPa)	0/01	EF_{MIN}
13/60	P_C (MPa)	11/7	SF_{MAX}

که در روابط فوق R_0 چگالی، G مدول برشی، A مقاومت اولیه نرمال، B مقاومت شکست نرمال، C ثابت نرخ کرنش، N توان مقاومت اولیه، SF_{MAX} حداکثر مقاومت شکست نرمال، D_1, D_2, D_3, D_4 پارامترهای کرنش پلاستیک در شکست، D_2 توان کرنش پلاستیک در شکست، K_1 مدول بالک، K_2 ضریب فشار دوم، K_3 ضریب فشار سوم، P_C فشار خردشدگی است. $P = k_1 \mu + k_2 \mu^2 + k_3 \mu^3$

$$\sigma_i^* = A(p^* + T^*)^N (1 + C \ln \varepsilon^{*}) \quad (۳)$$

$$\sigma_i^* = B(P^*)^M (1 + c \ln \varepsilon^{*}) \quad (۴)$$

توجه شود که مقاومت شکست نرمال را به صورت $\sigma_i^* \leq \sigma_i^*(\max)$ می‌توان محدود کرد. ثوابت ماده A, B, C, N و $\sigma_i^*(\max)$ می‌باشد. فشار نرمال نیز حاصل تقسیم فشار واقعی بر فشار در حد کشسان هیوگونیت می‌باشد. فشار کششی هیدرواستاتیک بیشینه نرمال نیز به صورت معادله (۵) است که صورت کسر، بیشینه فشار هیدرواستاتیک کششی است که ماده می‌تواند تحمل کند. نرخ کرنش بی بعد نیز از تقسیم نرخ کرنش واقعی به نرخ کرنش مرجع به دست می‌آید (معادلات ۵):

$$T^* = \frac{T}{P_{HEL}} \quad (۵-الف)$$

$$\varepsilon^{*} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'_0} \quad (۵-ب)$$

$$\varepsilon^{*} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'_0} \quad (۵-ج)$$

که T^* بیشینه مقاومت شکست کششی نرمال است: $\varepsilon'_0 = 1/0.5^{-1}$ و انباشتگی خرابی به صورت معادله (۶) می‌باشد.

$$D = \frac{\sum \Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f} \quad (۶)$$

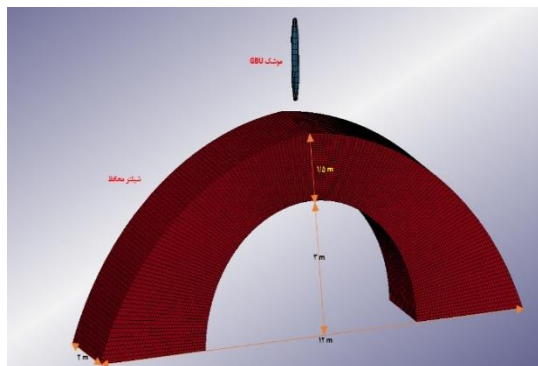
ε_p^f کرنش پلاستیک شکست تحت فشار ثابت P است. در صورتی که کرنش پلاستیک وجود نداشته باشد: $P^* = -T^*$ (معادله (۷))

$$\varepsilon_p^f = D_1(T^* + P^*)^{D_1} \quad (۷)$$

فشار هیدرواستاتیک قبل از شکست ($D=0$) به صورت معادله (۸) است. $(\mu = \rho / p, -1)$ که برای فشارهای کششی به صورت معادله (۹) تبدیل می‌شود که از اثرهای انرژی صرف‌نظر می‌شود. بعد از انباشتگی خرابی ($D>0$) فشار به صورت معادله (۹) اضافه می‌شود.

(۸)

$$P = k_1 \mu + k_2 \mu^2 + k_3 \mu^3 \quad (۹)$$



شکل ۲- مشخصات هندسی شیلتر محافظ



شکل ۳- نمایی از شبیه‌سازی در نرم‌افزار

در شکل ۳ سه مدل ساخته شده شبیه‌سازی نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود یک هواپیما در داخل شیلتر محافظ قرار گرفته و در این تحقیق سعی شده است که پرتابه GBU39 به سمت شیلتر محافظ شلیک شده و در سرعت‌های مختلف به سازه اصابت نماید.

۳- روابط تحلیلی نفوذ پرتابه در اهداف بتنی

در این تحقیق به منظور راستی‌آزمایی، عمق نفوذ پرتابه در شیلتر محافظ بتنی حاصل از شبیه‌سازی با روابط تجربی مقایسه شده است.

۲-۲ مدل ماده پرتابه MAT_RIGID

مدل ماده در نظر گرفته شده در این شبیه‌سازی به نام MAT_RIGID است. از این مدل ماده جهت مدل‌سازی پرتابه در نرم‌افزار LS-DYNA در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر عددی این مدل ماده در جدول ۲ ارائه شده است.

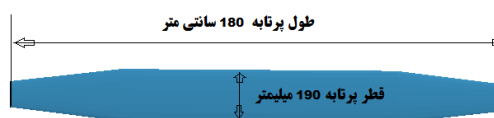
جدول ۲- مدل ماده پرتابه [۲۰]

مقدار عددی	خواص مصالح
7850	$R_0 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
210	$E \text{ (GPa)}$
0/3	PR

که در روابط فوق R_0 چگالی، E مدول الاستیسیته، PR ضریب پواسون است.

۲-۳ مشخصات هندسی پرتابه و شیلتر محافظ بتنی

پرتابه GBU39 در نظر گرفته شده در این پژوهش دارای طول ۱۸۰ سانتی‌متر، قطر ۱۹۰ میلی‌متر و جرم ۱۲۹ کیلوگرم می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است ضخامت پای سقف شیلتر محافظ ۲ متر و طول و ارتفاع شیلتر محافظ به ترتیب ۱۲ و ۴/۵ متر در نظر گرفته شده است که در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۱].



شکل ۱- مشخصات هندسی پرتابه GBU39

۳-۱- رابطه آزمایشگاه تحقیقات بالستیک (BRL)

این رابطه در سال ۱۹۴۱ جهت محاسبه عمق نفوذ پرتابه صلب در سازه بتنی و بر اساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است و در آن قطر، جرم و سرعت پرتابه و مقاومت بتن در نظر گرفته شده است.

این رابطه در واحد SI به صورت معادله (۱۳) ارائه شده است [۱۷]:

$$(13)$$

$$x = \frac{1.33 \times 10^{-3}}{\sqrt{f_c}} \times \frac{M}{d^2} \times d^{0.2} \times V_0^{1.33}$$

که در این رابطه x عمق نفوذ پرتابه، M جرم پرتابه بر حسب کیلوگرم، V_0 سرعت اولیه پرتابه بر حسب متر بر ثانیه، f_c مقاومت فشاری بتن بر حسب پاسکال، d قطر پرتابه بر حسب متر است.

۳-۲- رابطه ویفن

این رابطه در سال ۱۹۴۳ توسط ویفن پس از مطالعه وسیعی که در محیط آزمایشگاهی بر روی بتن مسلح انجام شد ارائه گردید و نتایج آزمایشگاهی پس از استنتاج مورد تایید آزمایشگاه تحقیقاتی راه انگلستان قرار گرفت و در آن قطر، جرم و سرعت پرتابه و مقاومت بتن و نیز اندازه مشخصه سنگدانه بتن (اندازه بزرگترین سنگدانه بتن) در نظر گرفته شده است و در دستگاه SI بصورت رابطه زیر می باشد [۱۷]:

$$x = \frac{2.61}{\sqrt{f_c}} \times \left(\frac{M}{d^2}\right) \times \left(\frac{d}{a}\right)^{0.1} \times \left(\frac{V_0}{533.4}\right)^n \quad (14)$$

$$n = \frac{97.51}{f_c^{0.25}} \quad (15)$$

این رابطه دارای محدودیت‌هایی است به گونه‌ای که برای سرعت پرتابه کمتر از ۱۱۲۸ متر بر ثانیه و جرم پرتابه بین ۰/۱۳۶۸ الی ۱۰۰۰۰ کیلوگرم و قطر پرتابه بین ۰/۱۲۷ الی ۰/۹۶۵۲ متر و مقاومت فشاری بتن از ۵/۵ الی ۶۹ مگا پاسکال و برای نسبت قطر پرتابه به اندازه مشخصه سنگدانه بتن $0.5 \leq \frac{d}{a} \leq 50$ در نظر گرفته شده است.

۳-۳- گروه مهندسين ارتش (ACE)

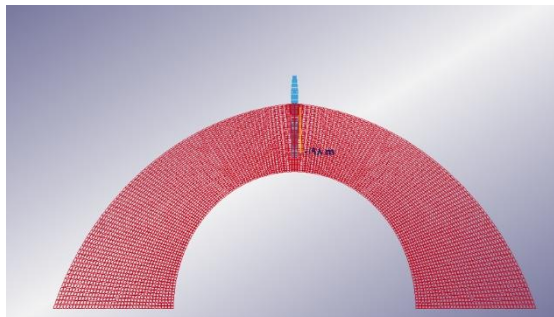
این رابطه در سال ۱۹۴۳ براساس نتایج آزمایشگاهی توسط گروه مهندسين ارتش آمریکا ارائه گردید که در این رابطه x عمق نفوذ پرتابه، M جرم پرتابه بر حسب کیلوگرم، V_0 سرعت اولیه پرتابه بر حسب متر بر ثانیه، f_c مقاومت فشاری بتن بر حسب پاسکال، d قطر پرتابه بر حسب متر می باشد.

$$x = \frac{3.5 \times 10^{-4}}{\sqrt{f_c}} \times \frac{M}{d^2} \times d^{0.215} \times V_0^{1.50} + 0.50 \quad (16)$$

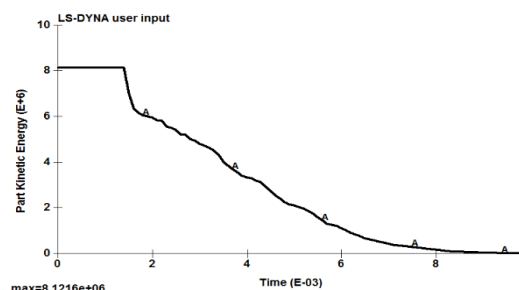
در این تحقیق پرتابه با پنج سرعت مختلف به شیلتر محافظ بتنی اصابت می‌کند. سرعت اصابت ۳۲۵ متر بر ثانیه، ۳۵۵ و ۳۸۵ و ۴۱۵ و ۴۴۵ متر بر ثانیه است که مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴- سرعت اصابت پرتابه ۳۲۵ متر بر ثانیه

در این بخش پرتابه با سرعت ۳۲۵ متر بر ثانیه به شیلتر محافظ اصابت می‌کند. همانطور که از شکل ۴ پیداست میزان عمق نفوذ پرتابه حدود ۹۸۰ میلیمتر می‌باشد که با سرعت ۳۲۵ متر بر ثانیه به شیلتر محافظ هواپیما برخورد می‌کند. انرژی جنبشی پرتابه با سرعت اصابت ۳۲۵ متر بر ثانیه برابر با ۶/۸ مگاژول بدست آمده است که در شکل ۵ نیز انرژی جنبشی پرتابه نشان داده شده است.



شکل ۴- عمق نفوذ پرتابه با سرعت اصابت ۳۲۵ متر بر ثانیه

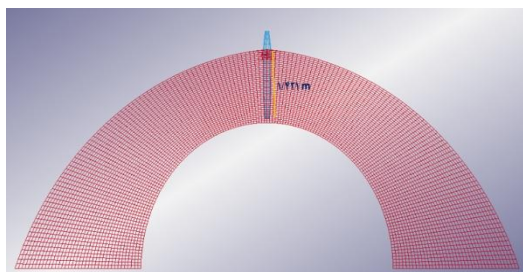


شکل ۷- انرژی جنبشی پرتابه با سرعت اصابت ۳۵۵ متر بر ثانیه

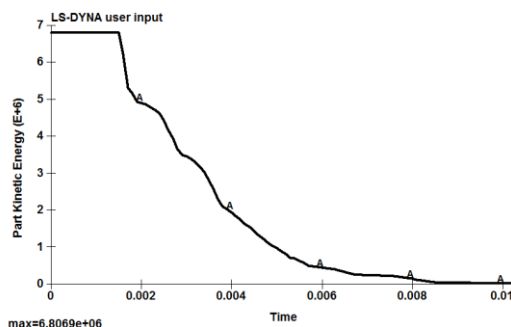
به‌طور کلی، همان‌طور که از نتایج پیداست با افزایش سرعت پرتابه از ۳۲۵ به ۳۵۵ متر بر ثانیه با توجه افزایش مقدار عمق نفوذ پرتابه از ۹۸۰ میلیمتر به ۱۲۶۳ میلیمتر با افزایش ۲۵٪ عمق نفوذ همراه بوده است. همچنین با این مقدار افزایش، انرژی جنبشی پرتابه نیز با افزایش حدود ۱۶/۵٪ بدست آمده است. پرتابه طبق نمودار فوق از مقدار ۸/۱ مگاژول به صفر رسیده است که این موضوع بیانگر این مطلب است که پرتابه متوقف شده است و در شیلتر محافظ بتنی گیر کرده است.

۶- سرعت اصابت پرتابه ۳۸۵ متر بر ثانیه

در این بخش پرتابه با سرعت ۳۸۵ متر بر ثانیه به شیلتر محافظ اصابت می‌کند همان‌طور که از شکل ۸ پیداست مقدار عمق نفوذ پرتابه از ۱۲۶۳ میلیمتر به ۱۴۲۱ میلیمتر افزایش یافته است. همچنین انرژی جنبشی پرتابه با سرعت اصابت ۳۸۵ متر بر ثانیه از ۸/۱ به ۹/۵ ژول حاصل گردیده است که در شکل ۹ انرژی جنبشی پرتابه نشان داده شده است.



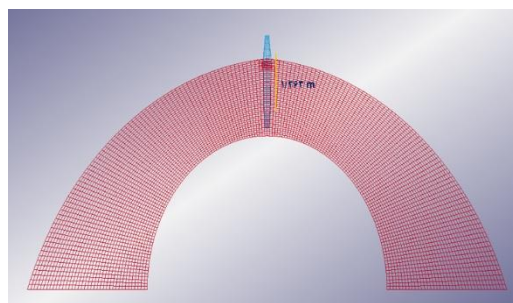
شکل ۸- عمق نفوذ پرتابه با سرعت اصابت ۳۸۵ متر بر ثانیه



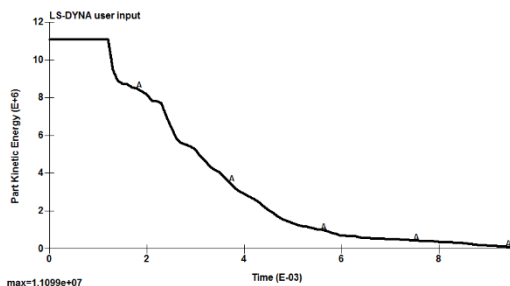
شکل ۵- انرژی جنبشی پرتابه با سرعت اصابت ۳۲۵ متر بر ثانیه

۵- سرعت اصابت پرتابه ۳۵۵ متر بر ثانیه

در این بخش پرتابه با سرعت ۳۵۵ متر بر ثانیه بر شیلتر محافظ اصابت می‌کند همان‌طور که از شکل ۶ پیداست مقدار عمق نفوذ پرتابه از ۹۸۰ میلیمتر به ۱۲۶۳ میلیمتر افزایش یافته است که با سرعت ۳۵۵ متر بر ثانیه به شیلتر محافظ هواپیما اصابت می‌کند. با این مقدار افزایش انرژی جنبشی پرتابه با سرعت اصابت ۳۵۵ متر بر ثانیه برابر با ۸/۱ مگاژول بدست آمده است که در شکل ۷ انرژی جنبشی پرتابه نشان داده شده است.



شکل ۶- عمق نفوذ پرتابه با سرعت اصابت ۳۵۵ متر بر ثانیه

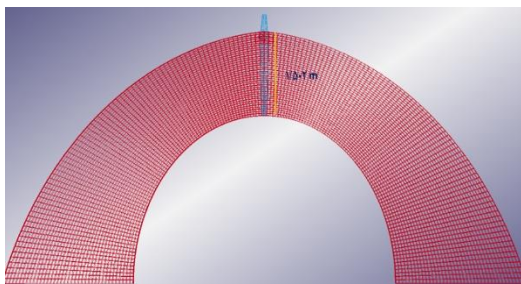


شکل ۱۱- انرژی جنبشی پرتابه با سرعت اصابت ۴۱۵ متر بر ثانیه

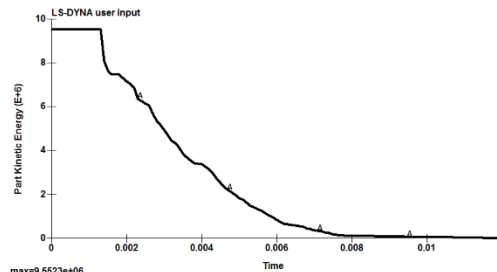
به‌طور کلی همان‌طور که از نتایج پیداست با افزایش سرعت پرتابه از ۳۸۵ به ۴۱۵ متر بر ثانیه با توجه به افزایش مقدار عمق نفوذ پرتابه از ۱۴۲۱ میلیمتر به ۱۴۶۰ میلیمتر با افزایش ۳۳٪ عمق نفوذ همراه بوده است. همچنین با این مقدار افزایش، انرژی جنبشی پرتابه نیز با افزایش حدود ۴۰٪ بدست آمده است. پرتابه طبق نمودار فوق از مقدار ۱۱ مگاژول به صفر رسیده است که این موضوع بیانگر این مطلب است که پرتابه متوقف شده است.

۸- سرعت اصابت پرتابه ۴۴۵ متر بر ثانیه

در این بخش پرتابه با سرعت ۴۴۵ متر بر ثانیه به شیلتر محافظ اصابت می‌کند که همان‌طور که از شکل ۱۲ پیداست مقدار عمق نفوذ پرتابه ۱۵۰۲ میلیمتر می‌باشد که با سرعت ۴۴۵ متر بر ثانیه به شیلتر محافظ هواپیما اصابت می‌کند. انرژی جنبشی پرتابه نیز با سرعت اصابت ۴۴۵ متر بر ثانیه برابر با ۱۲/۷۶ مگاژول می‌باشد که در این مرحله پرتابه از شیلتر عبور کرده و انرژی جنبشی بعد از خروج از شیلتر محافظ برابر با ۲/۴۸ مگاژول می‌باشد.



شکل ۱۲- عمق نفوذ پرتابه با سرعت اصابت ۴۴۵ متر بر ثانیه

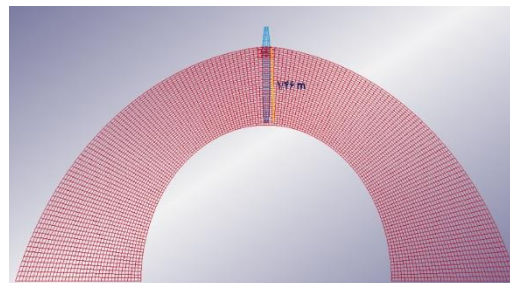


شکل ۹- انرژی جنبشی پرتابه با سرعت اصابت ۳۸۵ متر بر ثانیه

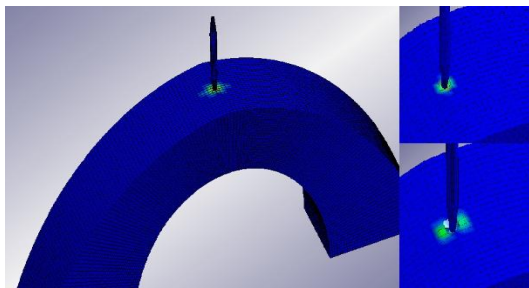
به‌طور کلی همان‌طور که از نتایج پیداست با افزایش سرعت پرتابه از ۳۵۵ به ۳۸۵ متر بر ثانیه با توجه افزایش مقدار عمق نفوذ پرتابه از ۱۲۶۳ میلیمتر به ۱۴۲۱ میلیمتر با افزایش ۳۰٪ عمق نفوذ همراه بوده است. همچنین با این مقدار افزایش، انرژی جنبشی پرتابه نیز با افزایش حدود ۲۱٪ بدست آمده است. پرتابه طبق نمودار فوق از مقدار ۹/۵ مگاژول به صفر رسیده است که این موضوع بیانگر این مطلب است که پرتابه متوقف شده است.

۷- سرعت اصابت پرتابه ۴۱۵ متر بر ثانیه

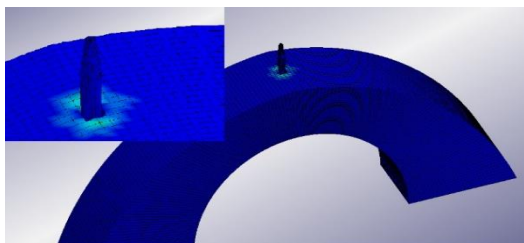
در این بخش پرتابه با سرعت ۴۱۵ متر بر ثانیه به شیلتر محافظ اصابت می‌کند که همان‌طور که از شکل ۱۰ پیداست مقدار عمق نفوذ پرتابه از ۱۴۲۱ میلیمتر به ۱۴۶۰ میلیمتر افزایش یافته است که با سرعت ۴۱۵ متر بر ثانیه به شیلتر محافظ هواپیما اصابت می‌کند. با این مقدار افزایش انرژی جنبشی پرتابه با سرعت اصابت ۴۱۵ متر بر ثانیه برابر با ۱۱ مگاژول بدست آمده است.



شکل ۱۰- عمق نفوذ پرتابه با سرعت اصابت ۴۱۵ متر بر ثانیه



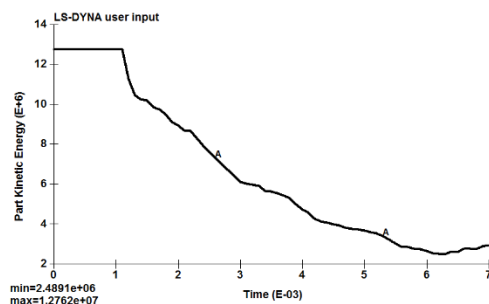
شکل ۱۴- لحظه برخورد پرتابه به شیلتر محافظ بتنی



شکل ۱۵- نفوذ پرتابه در شیلتر محافظ بتنی



شکل ۱۶- نمایی اصلی از شیلتر محافظ بتنی



شکل ۱۳- انرژی جنبشی پرتابه با سرعت اصابت ۴۴۵ متر بر ثانیه

به‌طور کلی همان‌طور که از نتایج پیداست با افزایش سرعت پرتابه از ۴۱۵ به ۴۴۵ متر بر ثانیه با توجه افزایش مقدار عمق نفوذ پرتابه از ۱۴۶۰ میلی‌متر به ۱۵۰۲ میلی‌متر با افزایش ۳۶٪ عمق نفوذ همراه بوده است. همچنین با این مقدار افزایش، انرژی جنبشی پرتابه نیز با افزایش حدود ۴۶٪ بدست آمده است.

جدول ۳- خلاصه انرژی جنبشی حاصل از پرتابه در سرعت‌های مختلف

انرژی جنبشی در شبیه‌سازی (مگاژول)	(متر بر ثانیه) سرعت پرتابه
۶/۸۰	۳۲۵
۸/۱۲	۳۵۵
۹/۵۵	۳۸۵
۱۱/۰۹	۴۱۵
۱۲/۷۶	۴۴۵

نتایج حاصل از شبیه‌سازی برخورد پرتابه به شیلتر محافظ بتنی نشان می‌دهد که با افزایش ۱۰٪ سرعت برخورد پرتابه مقدار انرژی جنبشی ۱۷٪ افزایش می‌یابد. این مقدار با افزایش ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ سرعت پرتابه به ترتیب ۲۱٪، ۴۰٪ و ۴۶٪ افزایش داشته است. چهار عامل سرعت برخورد، قطر پرتابه، جرم پرتابه و مقاومت فشاری بتن از مهم‌ترین عوامل مؤثر جهت محاسبه عمق نفوذ در روابط تجربی جهت مقایسه با روابط تحلیلی و شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. در این تحقیق مطابق با جدول زیر از روابط آزمایشگاه تحقیقات بالستیک (BRL)، گروه مهندسی ارتش آمریکا (ACE)، رابطه ویفن جهت مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفته است.

است.

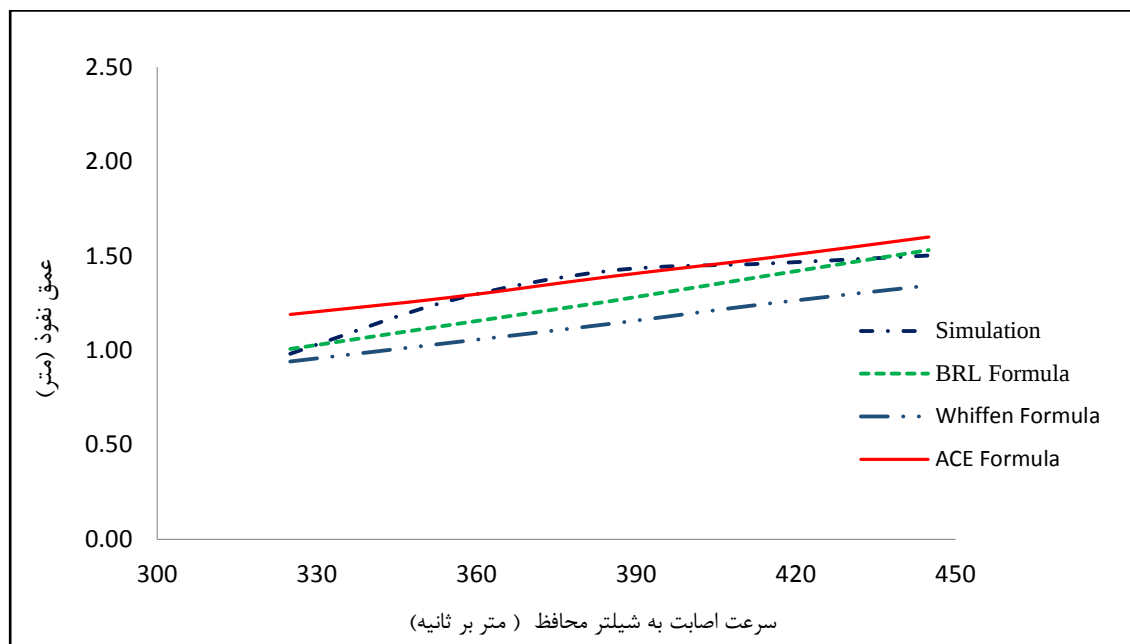
این مقدار برای رابطه نفوذ (BRL) به ترتیب ۱۰۰۸، ۱۱۳۴، ۱۲۶۰، ۱۳۹۷ و ۱۵۳۱ میلیمتر بدست آمده است. همچنین مقدار نفوذ حاصله از رابطه نفوذ ویفن نیز برای سرعت‌های ۳۲۵، ۳۵۵، ۳۸۵، ۴۱۵ و ۴۴۵ متر بر ثانیه به ترتیب ۹۴۱، ۱۰۴۰، ۱۱۴۰، ۱۲۴۸ و ۱۳۴۳ میلیمتر بدست آمده است. در رابطه عمق نفوذ رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا (ACE) این مقدار به ترتیب ۱۱۹۰، ۱۲۸۰، ۱۳۹۰، ۱۴۹۰ و ۱۶۰۰ میلیمتر حاصل گردید. همانطور که از نتایج پیداست حداکثر اختلاف نتایج حاصل از روابط تجربی با نتایج شبیه‌سازی حدود ۲۰٪ بوده است که این موضوع نشانگر تطابق قابل قبول بین روابط تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همچنین بایستی توجه داشت که باتوجه به اینکه مقدار عمق نفوذ با توان سرعت برخورد پرتابه به شیلتر محافظ بتنی در روابط تجربی رابطه مستقیم و متناسب دارد با افزایش سرعت برخورد میزان عمق نفوذ نیز با افزایش همراه بوده است.

تحقیق حاضر قسمتی از یک کار تحقیقی گسترده در مورد تعیین میزان عمق نفوذ ناشی از ضربه برخورد پرتابه بر شیلتر محافظ است. در مقاله ارائه شده به شناسایی و میزان عمق نفوذ حاصل از برخورد پرتابه در نقاط بحرانی شیلترهای محافظ بتنی در هنگام بروز حادثه از جمله ضربه با استفاده از شبیه‌سازی عددی و همچنین روابط آزمایشگاه تحقیقات بالستیک (BRL)، گروه مهندسی ارتش آمریکا (ACE) و رابطه ویفن پرداخته شده است که نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند در ضوابط طراحی شیلترهای محافظ بتنی در موضوعات پدافند غیرعامل مورد استفاده قرار گیرد. در تحقیقات آینده به بررسی سناریوهای انفجاری پس از عبور پرتابه از شیلتر محافظ بتنی و برخورد با هواپیمای داخل شیلتر بتنی و بررسی میزان آسیب و گسیختگی وارده به آن پرداخته می‌شود. جدول ۴ و شکل ۱۷ مقایسه نتایج محاسباتی روابط نفوذ با نتایج حاصله از شبیه‌سازی را در پنج سرعت مختلف نشان می‌دهد.

در این بخش به بررسی مقدار عمق نفوذ با شبیه‌سازی در نرم‌افزار LS-DYNA و روابط تجربی معتبر در خصوص برخورد پرتابه به اهداف بتنی که از مهم‌ترین آنها می‌توان به روابط آزمایشگاه تحقیقات بالستیک (BRL)، گروه مهندسی ارتش آمریکا (ACE)، رابطه ویفن اشاره نمود پرداخته شده است. مطابق با جدول فوق مقدار نفوذ پرتابه در هسته بتنی برای سرعت‌های ۳۲۵، ۳۵۵، ۳۸۵، ۴۱۵ و ۴۴۵ متر بر ثانیه در مدسازی عددی به ترتیب ۹۸۲، ۱۲۶۳، ۱۴۲۱، ۱۴۶۰ و ۱۵۰۲ میلیمتر به‌دست‌آمده

جدول ۴- مقایسه نتایج محاسباتی روابط نفوذ با نتایج حاصله از شبیه‌سازی

سرعت پرتابه ۴۴۵ (متر بر ثانیه)	سرعت پرتابه ۴۱۵ (متر بر ثانیه)	سرعت پرتابه ۳۸۵ (متر بر ثانیه)	سرعت پرتابه ۳۵۵ (متر بر ثانیه)	سرعت پرتابه ۳۲۵ (متر بر ثانیه)	شبیه‌سازی
۱/۵۰۲	۱/۴۶۰	۱/۴۲۱	۱/۲۶۳	۰/۹۸۲	عمق نفوذ در شبیه‌سازی (متر)
۱/۵۳۱	۱/۳۹۷	۱/۲۶	۱/۱۳۴	۱/۰۰۸	عمق نفوذ رابطه (BRL)
۱/۳۴۳	۱/۲۴۸	۱/۱۴	۱/۰۴	۰/۹۴۱	عمق نفوذ رابطه ویفن
۱/۶۰	۱/۴۹	۱/۳۹	۱/۲۸	۱/۱۹	عمق نفوذ رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا (ACE)



شکل ۱۷- مقایسه نتایج حاصله از روابط نفوذ با شبیه‌سازی

۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ سرعت پرتابه به شیلتر محافظ بتنی به ترتیب با افزایش ۱۰٪، ۲۰٪، ۲۵٪ و ۳۰٪ همراه بوده است درحالی‌که عمق نفوذ برای رابطه گروه مهندسی ارتش امریکا (ACE) با افزایش سرعت پرتابه تا ۲۵٪ به ۲۷٪ نیز افزایش یافت.

همان‌طور که مشخص است از بین روابط تجربی موردبررسی در این تحقیق، از لحاظ دقت و تشابه به نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، به ترتیب می‌توان به رابطه گروه مهندسی ارتش امریکا (ACE)، آزمایشگاه تحقیقات بالستیک (BRL) و رابطه ویفن اشاره نمود. به عبارتی دیگر طی بررسی انجام‌گرفته بیشترین تشابه و دقت بالاتر نسبت به سایر روابط، در رابطه گروه مهندسی ارتش امریکا (ACE) مشاهده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برخورد پرتابه در شیلتر محافظ بتنی نشان می‌دهد که با افزایش ۱۰٪ سرعت برخورد پرتابه مقدار عمق نفوذ ۲۵٪ افزایش می‌یابد. در این تحقیق سرعت برخورد پرتابه تا میزان ۲۵٪ افزایش یافت که میزان عمق نفوذ با افزایش حدود ۳۵٪ همراه بوده است. در رابطه نفوذ آزمایشگاه تحقیقات بالستیک (BRL) نیز با افزایش ۱۰٪ سرعت برخورد پرتابه مقدار عمق نفوذ ۱۱٪ افزایش‌یافته است. این مقدار با افزایش ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ سرعت پرتابه به ترتیب ۲۹/۵٪، ۳۵٪ و ۳۹٪ افزایش داشته است. در رابطه ویفن نیز مقدار عمق نفوذ با افزایش ۱۰٪،

۹- نتیجه گیری

در این تحقیق از روابط آزمایشگاه تحقیقات بالستیک (BRL)، گروه مهندسی ارتش آمریکا (ACE)، رابطه ویفن جهت مقایسه با نتایج حاصل از شبیه سازی مورد مقایسه قرار گرفته است. به طور کلی چهار عامل سرعت برخورد، قطر پرتابه، جرم پرتابه و مقاومت فشاری بتن از مهم ترین عوامل مؤثر جهت محاسبه عمق نفوذ در روابط تجربی جهت مقایسه با نتایج شبیه سازی در نظر گرفته می شوند.

نتایج حاصل از شبیه سازی برخورد پرتابه در شیلتر محافظ بتنی نشان می دهد که با افزایش ۱۰٪ سرعت برخورد پرتابه مقدار انرژی جنبشی ۱۷٪ افزایش می یابد. این مقدار با افزایش ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ سرعت پرتابه به ترتیب ۲۱٪، ۴۰٪ و ۴۶٪ افزایش داشته است.

نتایج نشان می دهد مقدار نفوذ پرتابه در شیلتر محافظ بتنی برای سرعت های ۳۲۵، ۳۵۵، ۳۸۵، ۴۱۵ و ۴۴۵ متر بر ثانیه در شبیه سازی عددی به ترتیب ۹۸۲، ۱۲۶۳، ۱۴۲۱، ۱۴۶۰ و ۱۵۰۲ میلیمتر به دست آمده است. این مقدار برای رابطه نفوذ (BRL) به ترتیب ۱۰۰۸، ۱۱۳۴، ۱۲۶۰، ۱۳۹۷ و ۱۵۳۱ میلیمتر به دست آمده است. همچنین مقدار نفوذ حاصله از رابطه نفوذ ویفن نیز برای سرعت های ۳۲۵، ۳۵۵، ۳۸۵، ۴۱۵ و ۴۴۵ متر بر ثانیه به ترتیب ۹۴۱، ۱۰۴۰، ۱۱۴۰، ۱۲۴۸ و ۱۳۴۳ میلیمتر به دست آمده است. در رابطه عمق نفوذ رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا (ACE) این مقدار به ترتیب ۱۱۹۰، ۱۲۸۰، ۱۳۹۰، ۱۴۹۰ و ۱۶۰۰ میلیمتر حاصل گردید.

همان طور که از نتایج پیداست حداکثر اختلاف نتایج حاصل از روابط تجربی با نتایج شبیه سازی حدود ۲۰٪ بوده است که این موضوع نشانگر تطابق قابل قبول بین روابط تجربی و نتایج حاصل از شبیه سازی را نشان می دهد. همچنین بایستی توجه داشت که با توجه به اینکه مقدار عمق نفوذ با توان سرعت برخورد پرتابه به شیلتر محافظ بتنی در روابط تجربی رابطه مستقیم و متناسب دارد با افزایش سرعت برخورد میزان عمق نفوذ نیز با افزایش همراه بوده است.

از بین روابط تجربی مورد بررسی در این تحقیق از لحاظ دقت و تشابه به نتایج به دست آمده از شبیه سازی، به طور کلی به ترتیب می توان به رابطه

گروه مهندسی ارتش آمریکا (ACE)، آزمایشگاه تحقیقات بالستیک (BRL) و رابطه ویفن اشاره نمود. به عبارتی دیگر طی بررسی انجام گرفته بیشترین تشابه و دقت بالاتر نسبت به سایر روابط، در رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا (ACE) مشاهده شده است.

در رابطه نفوذ آزمایشگاه تحقیقات بالستیک (BRL) نیز با افزایش ۱۰٪ سرعت برخورد پرتابه مقدار عمق نفوذ ۱۱٪ افزایش یافته است. این مقدار با افزایش ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ سرعت پرتابه به ترتیب ۲۰٪، ۲۹٪ و ۳۵٪ افزایش داشته است. در رابطه ویفن نیز مقدار عمق نفوذ با افزایش ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ سرعت پرتابه به هدف بتنی به ترتیب با افزایش ۱۰٪، ۲۰٪، ۲۵٪ و ۳۰٪ همراه بوده است در حالیکه عمق نفوذ برای رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا (ACE) با افزایش سرعت پرتابه تا ۲۵٪ به ۲۷٪ نیز افزایش یافت.

با افزایش سرعت پرتابه از ۳۲۵ به ۳۵۵ متر بر ثانیه با توجه افزایش مقدار عمق نفوذ پرتابه از ۹۸۰ میلیمتر به ۱۲۶۳ میلیمتر با افزایش ۲۵٪ عمق نفوذ همراه بوده است. همچنین با این مقدار افزایش، انرژی جنبشی پرتابه نیز با افزایش حدود ۱۶٪ بدست آمده است.

با افزایش سرعت پرتابه از ۳۵۵ به ۳۸۵ متر بر ثانیه با توجه افزایش مقدار عمق نفوذ پرتابه از ۱۲۶۳ میلیمتر به ۱۴۲۱ میلیمتر با افزایش ۳۰٪ عمق نفوذ همراه بوده است. همچنین با این مقدار افزایش، انرژی جنبشی پرتابه نیز با افزایش حدود ۲۱٪ بدست آمده است.

با افزایش سرعت پرتابه از ۳۸۵ به ۴۱۵ متر بر ثانیه با توجه افزایش مقدار عمق نفوذ پرتابه از ۱۴۲۱ میلیمتر به ۱۴۶۰ میلیمتر با افزایش ۳۳٪ عمق نفوذ همراه بوده است. همچنین با این مقدار افزایش، انرژی جنبشی پرتابه نیز با افزایش حدود ۴۰٪ بدست آمده است.

با افزایش سرعت پرتابه از ۴۱۵ به ۴۴۵ متر بر ثانیه با توجه افزایش مقدار عمق نفوذ پرتابه از ۱۴۶۰ میلیمتر به ۱۵۰۲ میلیمتر با افزایش ۳۶٪ عمق نفوذ همراه بوده است. همچنین با این مقدار افزایش، انرژی جنبشی پرتابه نیز با افزایش حدود ۴۶٪ بدست آمده است.

مراجع

- [7] Tai YS, Tang CC. Numerical simulation: The dynamic behavior of reinforced concrete plates under normal impact. *Theor Appl Fract Mech*. 2006 Apr 1; 45 (2): 117 -27. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2006.01.004>
- [8] Polanco-Loria M, Hopperstad OS, Børvik T, Berstad T. Numerical predictions of ballistic limits for concrete slabs using a modified version of the HJC concrete model. *Int J Impact Eng*. 2008 May 1; 35 (5): 290 -303. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.01.004>
- [9] Sakakibara T, Tsuda T, Ohtagaki R. SPH simulations of high velocity impacts on concrete plate. In: 7th European LS-DYNA Conference; 2009 May 14-15; Salzburg, Austria. Würselen (Germany): DYNAmore GmbH; 2009. https://www.dynamore.de/de/download/papers/07th-european-conf/Session_A1/A1_1.pdf
- [10] لطیفی م. بررسی و تحلیل نفوذ پرتابه‌های صلب در یک هدف بتنی پوشش‌دار [پایان‌نامه کارشناسی رشد]. تهران: دانشگاه امام حسین(ع)؛ ۱۳۸۶. <https://ganj.irandoc.ac.ir/۱۳۸۶>
- [11] Sohel KM, Liew JR. Behavior of steel–concrete–steel sandwich slabs subject to impact load. *J Constr Steel Res*. 2014 Sep 1; 100:163-75. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.04.015>
- [12] Oucif C, Rama JK, Ram KS, Abed F. Damage modeling of ballistic penetration and impact behavior of concrete panel under low and high velocities. *Def Technol*. 2021 Feb 1; 17 (1): 202 -11. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.01.017>
- [13] Chen X, Shi D, Guo S. Experimental study on damage evaluation, pore structure and impact tensile behavior of 10-year-old concrete cores after exposure to high temperatures. *Int J Concr Struct Mater*. 2020 Dec; 14:1-7. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00438-3>
- [1] Forrestal MJ, Cargile JD, Tzou RD. Penetration of concrete targets [technical report]. Albuquerque (NM): Sandia National Laboratories; 1993 Aug 1. Report No.: SAND93 -2148. <https://doi.org/10.2172/10188235>
- [2] Hanchak SJ, Forrestal MJ, Young ER, Ehrgott JQ. Perforation of concrete slabs with 48 MPa (7 ksi) and 140 MPa (20 ksi) unconfined compressive strengths. *Int J Impact Eng*. 1992 Jan 1; 12 (1): 1 -7. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(92\)90043-Q](https://doi.org/10.1016/0734-743X(92)90043-Q)
- [3] Hansson H, Skoglund P. Simulation of concrete penetration in 2D and 3D with the RHT material model [technical report]. Stockholm (Sweden): Swedish Defence Research Agency (FOI); 2002 Nov. Report No.: FOI-R-0530-SE. <https://www.foi.se/rest-api/report/FOI-R-0530-SE>
- [4] Teng TL, Chu YA, Chang FA, Chin HS. Numerical analysis of oblique impact on reinforced concrete. *Cem Concr Compos*. 2005 Apr 1; 27 (4): 481 -92. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.004>
- [5] Huang F, Wu H, Jin Q, Zhang Q. A numerical simulation on the perforation of reinforced concrete targets. *Int J Impact Eng*. 2005 Dec 1; 32 (1-4): 173-87. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.04.016>
- [6] Tham CY. Numerical and empirical approach in predicting the penetration of a concrete target by an ogive-nosed projectile. *Finite Elem Anal Des*. 2006 Oct 1; 42 (14-15): 1258 -68. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2006.03.008>

Technical manual TM 5-855. Washington, DC: Department of the Army; 1986 Nov.
<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA337984.pdf>

[14] Du G, Li Z, Song G. A PVDF-based sensor for internal stress monitoring of a concrete-filled steel tubular (CFST) column subject to impact loads. *Sensors*. 2018 May 23; 18 (6): 1682.

<https://doi.org/10.3390/s18061682>

[15] Epasto G, Proverbio E, Venturi V. Evaluation of fire-damaged concrete using impact-echo method. *Mater Struct*. 2010 Jan; 43: 235 -45.

<https://doi.org/10.1617/s11527-009-9484-1>

[16] Hansson H. Warhead penetration in concrete protective structures [dissertation]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology; 2006.

<https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-4020>

[17] Murthy AR, Palani GS, Iyer NR. Impact analysis of concrete structural components. *Def Sci J*. 2010 May 1; 60 (3): 307 -19.
<https://doi.org/10.14429/dsj.60.361>

[18] Zhang K, Lu F, Peng Y, Li X. Study on dynamic response of gravity dam under air blast load based on similarity law. *Eng Fail Anal*. 2022 Aug 1; 138: 106225.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106225>

[19] Mendoz Meze S, Li G, Shen Z, Zhang J, Emani GF, Edem Setordjie V. Dynamic response and failure mechanism of concrete arch dams under extreme loadings: a solid foundation for real-world actions to reduce dam collapse losses during wartime or terrorist attacks. *Water*. 2022 May 21; 14 (10): 1648.
<https://doi.org/10.3390/w14101648>

[20] Serrano-Perez JC, Vaidya UK, Uddin N. Low velocity impact response of autoclaved aerated concrete/CFRP sandwich plates. *Compos Struct*. 2007 Oct 1; 80 (4): 621 -30.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.05.029>

[21] United States Army. Fundamentals of protective design for conventional weapons.