



بررسی عملکرد پرتابه‌های دو مرحله‌ای ضد استحکامات در اهداف بتنی به روش تجربی و عددی

ناصر دشتیان گرامی¹، غلامحسین لیاقت^{2*}، غلامحسین رحیمی شرباف مقدس²، نجمه خضراییان³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، اسلامشهر

*تهران، صندوق پستی 14115-143، ghlia530@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 31 خرداد 1395

پذیرش: 20 تیر 1395

ارائه در سایت: 11 مهر 1395

کلید واژگان:

نفوذ پرتابه دو مرحله‌ای

پرتابه پیشرو

پرتابه اصلی

بتن آسیب دیده

در این مقاله، فرایند نفوذ پرتابه‌های دو مرحله‌ای ضد استحکامات به روش‌های تجربی و عددی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. پرتابه دو مرحله‌ای مورد نظر در این تحقیق از یک خرج‌گود پیشرو با لاینر مسی و هندسه مخروطی و یک پرتابه اصلی به شکل استوانه با دماغه تخت تشکیل شده است. به منظور تعیین مشخصات هندسی حفره و تونل ایجاد شده بر روی هدف بتنی، در ابتدا آزمون‌های نفوذ پرتابه‌های پیشرو با لاینر مسی و هندسه مخروطی بر روی هدف بتنی صورت پذیرفته است. در آزمون‌های نفوذ خرج‌گود پیشرو سه نمونه پرتابه مورد تست قرار گرفته است که با توجه به شرایط کاملاً یکسان پرتابه‌ها و اهداف بتنی نتایج آزمون‌ها از تکرار پذیری بسیار مناسبی برخوردار بوده است. با مشخص شدن ابعاد هندسی تونل و حفره بر روی هدف بتنی توسط آزمون‌ها، فرایند نفوذ خرج‌گودهای پیشرو و اصلی با استفاده از شبیه‌سازی عددی و به کمک نرم‌افزار اوتوداین مورد تحلیل قرار گرفته است. مقایسه نتایج نفوذ پرتابه پیشرو با روش‌های تجربی و عددی حاکی از انطباق بسیار خوب نتایج بین دو روش انجام گرفته است. در انتهای این تحقیق اثرات آسیب بتن در فرایند نفوذ پرتابه اصلی با استفاده از شبیه‌سازی عددی در راستای تعیین سرعت باقی‌مانده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطابق با پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که با وجود آسیب در هدف بتنی، سرعت باقی‌مانده افزایش خواهد داشت.

Investigation of performance of anti structure tandem projectiles in to the concrete targets by experimental and numerical method

Nasser Dashtian Gerami¹, Gholam Hossein Liaghat^{1*}, Gholam Hossein Rahimi Sharbaf Moghadas¹, Najmeh Khazraiyani²

1-Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2-Department of Mechanical Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran.

* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 June 2016
Accepted 10 July 2016
Available Online 02 October 2016

Keywords:

Tandem projectile penetration
Forward projectile
Follow projectile
Damaged Concrete

ABSTRACT

In this paper, the penetration process of anti-structure tandem projectiles is investigated by numerical and experimental methods. The used projectiles in this research have been composed of the forward shaped charge with conical copper liner and the following kinetic energy projectile with flat nose. For determination of cavity and tunnel geometry, at first follow projectile penetration test is done. In this process three shaped charge projectiles are tested. According to the same conditions for projectiles and concrete target, the obtained data of performed test are in good agreement with each others. Then numerical simulation of forward and follow projectiles penetration is analyzed by finite difference hydro code: AUTODYN. The numerical results obtained from the forward projectile penetration have been compared with experimental results. The comparisons between experimental and numerical results for forward projectiles show good agreement with each others. At the end of this research, the residual velocities of the follow projectiles are investigated by numerical method. The results also indicate that the residual velocity of follow projectile increases due to the damage in the concrete target, which is in agreement with which predictions.

1- مقدمه

می‌شوند که با وجود مشخص بودن موقعیت آنها امکان نابودسازی آن‌ها با پرتابه‌های متداول وجود ندارد. چنانچه از پرتابه‌های متداول استفاده شود، این پرتابه‌ها بر روی این موانع منفجر شده و آسیبی به هدف اصلی نمی‌رسد. برای نابودسازی این اهداف باید بتوان از این موانع عبور نموده و اثرات انفجار را در پشت و یا داخل اهداف ایجاد نمود. سرجنگی‌های دو مرحله‌ای ضد

بررسی پدیده مکانیک نفوذ در اهداف مختلف به‌وسیله پرتابه‌های گوناگون به منظور تحلیل و طراحی اهداف مقاوم به نفوذ و یا طراحی پرتابه‌های ویرانگر بسیار مهم و کاربردی است. در برخی مواقع اهداف مهم در پشت دیوارهای مستحکم و یا در درون سنگرها، استحکامات و پناهگاه‌های مدفون نگهداری

Please cite this article using:

N. Dashtian Gerami, Gh. H. Liaghat, Gh. H. Rahimi Sharbaf Moghadas, N. Khazraiyani, Investigation of performance of anti structure tandem projectiles in to the concrete targets by experimental and numerical method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 9-18, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

است، انتگرال‌گیری نمود. تلند با استفاده از این روش عمق نفوذ و نیز تغییرات سرعت در یک هدف بتنی ضخیم را برآورد نمود. مقایسه نتایج مدل تلند با نتایج تست‌های تجربی فولسام و ماسترت نشان می‌دهد که مدل تلند همواره عمق نفوذ را کمتر از نتایج تجربی برآورد می‌کند.

ژائو و ون [6] یک مدل تحلیلی بر اساس قانون تنش پیشنهادی ون [7] ارائه نمودند. این مدل در ابتدا برای بررسی و تحلیل نفوذ پرتابه اصلی در اهداف بتنی با سوراخ‌های از پیش ایجاد شده ارائه شد، سپس با برخی اصلاحات، عملکرد نفوذ بهبود داده شد. همچنین آنها به شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه‌های صلب در اهداف بتنی سوراخ‌دار با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌داینما⁵ پرداختند. در شبیه‌سازی انجام شده از مدل مادی جانسون-هلمکوئیست برای اهداف بتنی استفاده شد. مقایسه نتایج مدل ژائو و ون با نتایج تجربی نشان می‌دهد که مدل ایشان از دقت بالاتری نسبت به مدل تحلیلی تلند برخوردار است.

وانگ [8] نفوذ پرتابه‌های صلب با دماغه‌های مخروطی و اجایو را در اهداف بتنی سوراخ‌دار به روش تحلیلی مورد بررسی و مقایسه قرار داد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان داد که اگر نوک پرتابه مخروطی باشد نفوذ بیشتری در اهداف بتنی سوراخ‌دار و بدون سوراخ نسبت به دماغه‌های کروی و اجایو ایجاد خواهد شد.

گومز و شاکلا [9] بر اساس تحقیقات تجربی، رابطه‌ای را برای توصیف آسیب دیدگی هدف در اثر برخورد‌های پی‌درپی توسعه دادند که در آن با توجه به تعداد برخورد، کاهش مقاومت مکانیکی اهداف محاسبه می‌گردد. از نتایج تحقیقات ایشان بعدها دیگران برای بیان اثرات آسیب بر روی اهداف متأثر از برخورد به اهداف بتنی استفاده نموده‌اند.

وانگ و همکاران [10] نفوذ پرتابه اصلی در اهداف بتنی که از قبل بر روی آنها سوراخ‌های کوچکی به قطر هشت میلی‌متر و عمق‌های مختلف ایجاد شده بود را با استفاده از شبیه‌سازی عددی و تست‌های محدود مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات ایشان به روش عددی نشان می‌دهد که هرچه تعداد حفره‌ها و عمق آنها بر روی هدف بتنی بیشتر باشد، عمق نفوذ پرتابه اصلی بیشتر خواهد شد، اما تست‌های تجربی ایشان نشان می‌دهد عمق حفره‌های از پیش ایجاد شده بر خلاف تعداد حفره‌ها تأثیری بر روی عمق نفوذ پرتابه اصلی ندارد.

وانگ و همکاران [11] تحت عنوان اصلاح تئوری تلند برای نفوذ پرتابه در بتن سوراخ‌دار بر مبنای مطالعات عددی، به بررسی نفوذ پرتابه اجایو در بتن دارای سوراخ اولیه پرداختند. در مطالعه ایشان برخی از پارامترهای مورد نیاز برای تکمیل فرایند محاسبات بر مبنای نتایج تجربی تعیین شد. ایشان آزمون‌های عددی را برای قطرهای مختلف سوراخ و نیز ضرایب شکل مختلف دماغه پرتابه در هدف بتنی انجام دادند و تلاش نمودند بر اساس نتایج بدست آمده میزان مقاومت هدف بتنی در برابر نفوذ پرتابه صلب به درون آن را در تئوری تلند اصلاح نمایند.

لی [12] با استفاده از نرم‌افزار اوتوداین به مطالعه نفوذ سرچنگی دومرحله‌ای شامل بخش پیشرو از نوع شکل یافته انفجاری و بخش پیرو از نوع انرژی جنبشی پرداخت. نتایج تحقیقات ایشان نشان می‌دهد که در صورت استفاده از پرتابه پیشرو شکل‌یافته انفجاری و ایجاد آسیب بر روی هدف، پرتابه اصلی می‌تواند از هدف بتنی عبور نماید.

در این مقاله به منظور تحلیل عددی نفوذ پرتابه اصلی در هدف بتنی

استحکامات¹ معمولاً شامل یک خرج‌گود پیشرو² و یک پرتابه انرژی جنبشی پیرو³ یا اصلی می‌باشند. در این نوع سرچنگی‌ها در ابتدا خرج‌گود در هدف بتنی ضخیم نفوذ نموده و ضمن ایجاد سوراخ، استحکام هدف را نیز کاهش می‌دهد، سپس پرتابه اصلی پس از عبور از حفره ایجاد شده به عمق هدف نفوذ نموده و باعث ایجاد خسارت و انهدام هدف می‌گردد. مزایای استفاده از پرتابه‌های دو مرحله‌ای نسبت به نمونه‌های تک مرحله‌ای از دو جنبه‌ی ایجاد نفوذ بیشتر و احتمال کاهش کمانه کردن مهم است. پرتابه‌های ضد استحکامات قادر هستند استحکامات استراتژیک از جمله پناهگاه‌ها، ساختمان‌های فرماندهی، آشیانه هواپیماها و انبارهای مهمات و سازه‌های مدفون را که با چندین لایه خاک و بتن پوشش داده شده‌اند را مورد اصابت و آسیب قرار دهند.

2-پیشینه تحقیق

تاکنون تحقیقات بسیار محدود و خاصی بر نفوذ پرتابه‌های دو مرحله‌ای ضد استحکامات در اهداف بتنی صورت پذیرفته است. مسأله داشتن یک هدف بتنی با حفره پیش ساخته ابتدا توسط مورفی [1] بررسی شد. روش او بر پایه معادله تجربی برنارد برای نفوذ در سنگ بنا نهاده شده بود. مورفی با استفاده از چند مدل نیمه تحلیلی ساده حداکثر عمق نفوذ یک پرتابه دو مرحله‌ای را بر حسب پارامترهای استحکام فشاری هدف، قطر سوراخ داخل هدف، قطر و جرم پرتابه و نیز سرعت بر خورد برآورد نمود. نتایج مدل تحلیلی مورفی در مقایسه با نتایج تست‌های تجربی دارای انطباق خوبی را نشان نمی‌دهد.

فولسام [2] با گسترش و بسط کار مورفی همین مسأله را در پایان‌نامه فوق لیسانس خود بررسی کرد. او کارش را با نسخه ساده شده معادلات تجربی مهندسان نیروی زمینی ارتش آمریکا⁴ آغاز کرد. روابط حاوی دو ثابت مجهول بود که به صورت تجربی و بر اساس آزمایش تعیین شدند. فولسام [3,2] همچنین دو سری آزمایش برای تحلیل نفوذ پرتابه‌های انرژی جنبشی در اهداف بتنی سوراخ‌دار انجام داد، یک سری از این آزمایش‌ها با پرتابه‌های 88.7 گرمی به قطر 22 میلی‌متر و یکسری از این آزمایش‌ها هم با پرتابه‌های 5.93 کیلوگرمی به قطر 88.6 میلی‌متر بودند، که هر دو سری پرتابه دارای انحناى دماغه 1.25 بودند. همچنین سرعت تقریبی برخورد در آزمون‌ها 206 m/s بوده است. مدل تحلیلی فولسام با توجه به اینکه با استفاده از برازش منحنی بر روی نتایج تجربی حاصل گردید از دقت بسیار خوبی در مقایسه با نتایج تجربی برخوردار می‌باشد. همین مسأله بعدها توسط ماسترت [4] نیز بررسی شد که از ترکیب مشاهدات تجربی و عددی برای بدست آوردن مجدد معادلات فولسام استفاده نمود. ماسترت چندین آزمایش نفوذ در اهداف بتنی مسلح حاوی حفره‌های اولیه با قطرهای مختلف انجام داد. پرتابه‌های مورد استفاده در آزمون‌های ماسترت دارای جرم 141.6 گرم، قطر 20 میلی‌متر و انحناى دماغه 2.11 بوده است. بتن مورد استفاده نیز دارای مقاومت فشاری 20MPa و چگالی 2000 kg/m³ بوده است.

تلند [3]، با استفاده از تئوری گسترش حفره فورستال [5] تئوری گسترش حفره اصلاح شده‌ای را برای اهداف بتنی سوراخ‌دار مطرح نمود. بر اساس این تئوری موقعی که حفره اولیه در یک هدف بتنی ایجاد شود، نیروی وارد بر پرتابه کاهش می‌یابد. لذا به جای انتگرال‌گیری روی کل سطح پرتابه برای یافتن نیروی مؤثر تنها باید روی بخشی از سطح که در تماس با هدف

¹ Anti Structure Tandem Warhead

² FSC- Forward Shaped Charge

³ Follow Through Warhead

⁴ Army Corps of Engineers

⁵ LS-DYNA



Fig. 2a Forward projectile (Unassembled)

شکل 2- الف پرتابه پیشرو (دمونتاژ شده)



Fig. 2b Forward projectile (assembled)

شکل 2- ب پرتابه پیشرو (مونتاژ شده)

مشخصات کلی اهداف بتنی عبارتند از:

طول: 1250 میلی‌متر (17 برابر قطر پرتابه)

عرض: 1250 میلی‌متر (17 برابر قطر پرتابه)

ضخامت: 200 میلی‌متر

دانسیته: 2440 kg/m^3

استحکام فشاری: 48 مگاپاسکال

در شکل 3 اهداف بتنی قبل از اجرای تست نشان داده شده‌اند.

4-3-چیدمان میدان

برای اجرای تست‌های نفوذ پرتابه پیشرو بر روی اهداف بتنی، سه هدف بتنی به صورت عمودی و به فاصله دو متر از یکدیگر و در یک راستا قرار می‌گیرند. جهت ثبت فرایند نفوذ از دوربین‌های سرعت بالا استفاده شده است، این دوربین‌ها به گونه‌ای قرار می‌گیرند که جلو و پشت هدف قابل پوشش باشد. در شکل 4 چیدمان اهداف بتنی نشان داده شده است.

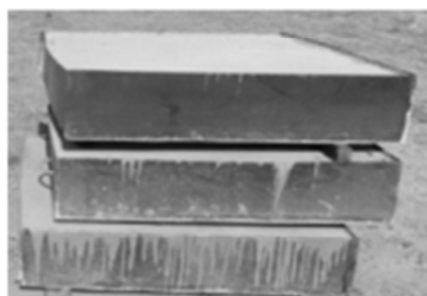


Fig. 3 Concrete targets

شکل 3 اهداف بتنی



Fig. 4 Concrete target setup

شکل 4 چیدمان اهداف بتنی

سوراخ‌دار و آسیب‌دیده، در ابتدا با استفاده از نتایج تست‌های تجربی نفوذ پرتابه پیشرو خرج‌گود بر روی اهداف بتنی، هندسه توئل و حفره برآورد شده و سپس با استفاده از روش‌های عددی نفوذ پرتابه پیشرو در هدف بتنی مورد شبیه‌سازی و اعتبار سنجی قرار می‌گیرد. با اطمینان از صحت شبیه‌سازی، در ادامه نفوذ پرتابه اصلی در اهداف بدون سوراخ، سوراخ‌دار آسیب‌دیده و سوراخ‌دار بدون آسیب مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. مهمترین خروجی‌های این تحقیق تخمین عمق نفوذ و سرعت باقی‌مانده پرتابه اصلی در اهداف بتنی مختلف می‌باشد.

3-تست‌های تجربی

تست‌های تجربی جهت تعیین پارامترهای عملکردی نفوذ انجام گرفته است. پرتابه‌های پیشرو مورد آزمون دارای لاینر مسی و هندسه مخروطی و اهداف مورد برخورد نیز بتنی ساده و بدون تقویت کننده می‌باشند.

1-3-مشخصات لاینر

لاینر مهمترین بخش یک پرتابه پیشرو خرج‌گود می‌باشد. مشخصات هندسی و مادی لاینر مورد استفاده عبارتست از:

نوع و جنس لاینر: مخروطی و مس ETP11000

طول: 35 میلی‌متر

ضخامت: 2.5 میلی‌متر (به صورت یکنواخت)

زاویه مخروط: 90 درجه

قطر داخلی: 71 میلی‌متر

روش ساخت لاینر: ماشین کاری

لاینر مسی در شکل 1 نشان داده شده است.

2-3-مشخصات پرتابه پیشرو

مشخصات کلی پرتابه پیشرو عبارتست از:

نوع پرتابه: خرج‌گود

جنس بدنه: آلومینیوم

جنس و وزن خرج: C4 و 260 گرم

نوع چاشنی: نمره 8

وزن پرتابه پیشرو: 530 گرم

در شکل 2 نمایی از حالت دمونتاژ و مونتاژ شده پرتابه پیشرو نشان داده شده است.

3-3-اهداف بتنی

اهداف بتنی مورد استفاده در این تحقیق بدون تقویت کننده بوده و ابعاد کلی آنها به گونه‌ای انتخاب شده است که اثرات مرزی بر روی نتایج تأییری نداشته باشد.

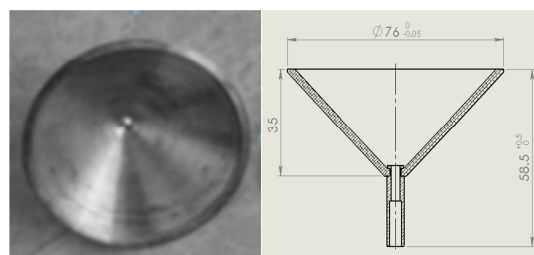


Fig. 1 Copper liner

شکل 1 لاینر مسی

که $\Delta \varepsilon_p$ نمو کرنش پلاستیک معادل، $\Delta \mu_p$ نمو کرنش حجمی پلاستیک، D_1 و D_2 ثابت‌های آسیب و T^* استحکام کششی نرماله بتن می‌باشد. رفتار فشار بر حسب حجم در مدل مادی جانسون-هلمکوئیست می‌تواند در سه مرحله بیان شود. قسمت الاستیک خطی که توسط محدوده فشار و کرنش حجمی محدود شده است، در منطقه گذار بین ناحیه الاستیک و بتن آسیب دیده، ماده تحت کرنش پلاستیک حجمی قرار می‌گیرد. فرض می‌شود که در انتهای این منطقه ماده به طور کامل تخریب شده است. ناحیه سوم ماده‌ی کاملاً چگال است که هیچ گونه هوایی در آن نیست و رابطه فشار و حجم به صورت رابطه (3) بیان می‌شود:

$$p = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3 \quad (3)$$

که همان معادله حالت می‌باشد. K_1 ، K_2 و K_3 ثابت‌های مادی، $\bar{\mu} = \mu_0 - \mu_0 = \rho / \rho_0 - 1$ کرنش حجمی $\mu_{lock} / (1 + \mu_{lock})$ اصلاح شده، ρ_0 چگالی اولیه می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته خواص بتن مطابق جدول 1 در نظر گرفته شده است.

4-1-2-1-4 مدل مادی جانسون-کوک [16]

معادله مشخصه جانسون-کوک، رفتار مواد را تحت تغییرات بالای دما، نرخ کرنش و کار پلاستیک بیان می‌کند و اثرات این عوامل را بر روی تنش تسلیم و کرنش شکست لحاظ می‌نماید. لاینر مسی استفاده شده در پرتابه‌های مورد بحث در این مقاله با استفاده از این مدل مادی شبیه‌سازی شده است. این مدل مادی به صورت رابطه (4) بیان می‌شود:

$$\bar{\sigma}_y = [A + B(\bar{\varepsilon}^p)^N] [1 + C \ln(\bar{\varepsilon}^*)] [1 - (T^*)^M] \quad (4)$$

که در آن A, B, C, N, M ثابت‌های مادی هستند و $\bar{\varepsilon}^p$ کرنش پلاستیک مؤثر، $\bar{\varepsilon}^*$ نرخ کرنش بدون بعد T^* و دمای بدون بعد نظیر می‌باشد. T^* به صورت رابطه (5) بیان می‌گردد:

$$T^* = \frac{(T - T_{ref})}{(T_{melt} - T_{ref})} \quad (5)$$

که در آن T_{ref} دمای محیط و T_{melt} دمای ذوب ماده مورد نظر است. کرنش پلاستیک مؤثر به صورت رابطه (6) می‌باشد:

$$\bar{\varepsilon}_p = \int_0^t d\bar{\varepsilon}^p \quad (6)$$

در آن نمو $d\bar{\varepsilon}^p$ کرنش پلاستیک مؤثر است که می‌توان آن را از تانسور کرنش پلاستیک $d\bar{\varepsilon}_{ij}$ محاسبه نمود.

هنگامی که یک پرتابه پیشرو تحت بار انفجاری قرار می‌گیرد، فشار انفجار نیروهایی ایجاد می‌کند که در محل‌های زیادی بر روی بدنه و لاینر متمرکز می‌شوند. در نتیجه کرنش‌های محلی با تغییر شکل‌های بزرگ اتفاق می‌افتد. این شرایط باعث می‌شوند کرنش شکست که منجر به آسیب می‌شود اتفاق

جدول 1 خواص مادی بتن در مدل مادی جانسون-هلمکوئیست [15,14]

کمیت	مقدار	کمیت	مقدار
G (GPa)	14.86	ρ (kg/m ³)	2440
T (MPa)	4	C_h	0.007
U_{lock}	0.1	A_h	0.79
U_{crush}	0.001	$EPSO$	1.0
P_{lock} (GPa)	0.8	ε_{min}^f	0.01
P_{crush} (GPa)	16	S_{max}	7
K_1 (GPa)	85	D_1	0.04
K_2 (GPa)	-171	D_2	1
K_3 (GPa)	208	B_h	1.6
f_c (MPa)	48	N	0.61



Fig. 5 Location of forward projectile

شکل 5 محل قرارگیری پرتابه پیشرو در مقابل هدف بتنی

فاصله توقف پرتابه پیشرو 10 سانتی‌متر می‌باشد، محل برخورد نیز در مرکز هدف بتنی تعیین شده است. در شکل 5 محل قرارگیری پرتابه پیشرو در مقابل هدف نشان داده شده است.

4-شبه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی انجام شده در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار اوتوداین انجام گرفته است. در ادامه به تشریح مراحل مختلف شبیه‌سازی شامل انتخاب مدل‌های مادی، معادلات حالت، ترسیم هندسه، شبکه بندی و روش حل پرداخته شده است.

4-1-1-4 مدل‌های مادی

مدل‌های مادی یا معادلات مشخصه در تحلیل‌های عددی روابطی هستند که رفتار مواد را تحت تاثیر تغییرات محیط بیان می‌نمایند، در شبیه‌سازی‌های عددی صورت پذیرفته در این مقاله از معادلات مشخصه‌ای که در ادامه می‌آید، استفاده شده است.

4-1-1-4 مدل مادی جانسون-هلمکوئیست [13]

هنگامی که بتن تحت برخورد پرتابه‌های با سرعت بالا قرار می‌گیرد، در آن فشارهای بالا، کرنش‌های زیاد، نرخ کرنش‌های بالا و آسیب ایجاد می‌شود. بنابراین لزوم استفاده از مدل مادی که این موارد را در بر گیرد لازم می‌باشد. در مدل مادی جانسون-هلمکوئیست که یک مدل آسیب الاستیک-پلاستیک است اثرات ذکر شده در نظر گرفته شده است. در این مدل استحکام معادل نرماله به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود:

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{f_c} = [A_h(1 - D) + B_h P^* N]. [1 + C_h \ln \bar{\varepsilon}^*] \quad (1)$$

که σ تنش واقعی معادل، f_c مقاومت فشاری بتن، A_h مقاومت چسبندگی نرماله، B_h ضریب سخت شوندگی فشار نرماله، C_h ضریب نرخ کرنش، N نمای سخت شوندگی فشار، S_{max} حداکثر استحکام نرماله، $P^* = P/f_c$ فشار نرماله و $\bar{\varepsilon}^* = \varepsilon/\varepsilon_0$ که $\varepsilon^* = 1s^{-1}$ نرخ کرنش مرجع می‌باشد. مقدار آسیب ماده توسط متغیر آسیب D مشخص می‌شود. پارامتر آسیب در این مدل به صورت رابطه (2) بیان می‌شود:

$$D = \sum \left(\frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{D_1(P^* + T^*)^{D_2}} \right) \quad (2)$$

4-1-4- مدل مادی نول³ [16]

مدل مادی نول برای بیان رفتار موادی با تغییر فرم‌های شبه سیال (هوا، آب و غیره) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل مادی تنش ویسکوز در ماده را می‌دهد. (تنش ویسکوز دارای همان مشخصات تنش‌های انحرافی⁴ می‌باشد).

$$\sigma_{ij}^v = \sigma_{ij} = \mu \epsilon'_{ij} \quad (12)$$

که در آن تنش‌های انحرافی، μ ضریب ویسکوزیته سیال و ϵ'_{ij} نیز نرخ کرنش انحرافی می‌باشد. با استفاده از رابطه فوق می‌توان تنش‌های انحرافی را محاسبه نمود. این مدل مادی نیازمند معادله حالتی برای تعیین فشار می‌باشد که از ترکیب معادله مشخصه و معادله حالت تنش‌های کلی برآورد می‌شود.

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \frac{\sigma_{kk} \delta_{ij}}{3} = \mu \epsilon'_{ij} + P \delta_{ij} \quad (13)$$

4-2- معادلات حالت⁵

در برخی از تحلیل‌های عددی علاوه بر معادلات اساسی بقاء که شامل معادلات بقاء جرم، بقاء اندازه حرکت خطی و زاویه‌ای و بقاء انرژی است، به معادله‌ای که رابطه بین خصوصیات ترمودینامیکی ماده (مثل فشار، جرم حجمی و دما) را بدهد تا سیستم معادلات بسته⁶ شوند، نیاز می‌باشد. انتخاب معادله حالت مناسب به مدل کردن مسئله، شبیه سازی عددی و مقایسه با نتایج تجربی بر می‌گردد. در این شبیه‌سازی از معادله حالت مای-گرونایزن⁷ استفاده می‌شود.

4-1-2-1- معادله حالت مای-گرونایزن [16]

معادله حالت مای-گرونایزن یکی از مهمترین معادلات حالتی است که برای مواد مایع و جامد بسیار مناسب است. این معادله حالت همانند سایر معادلات حالت ارتباط بین فشار، چگالی و انرژی را بیان می‌نماید.

معادله حالت فشار برای $\bar{\mu} > 0$ یعنی ماده در حال فشردگی به صورت رابطه (14) می‌باشد:

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu_0 \left\{ 1 + \left[1 - \left(\frac{\gamma_0}{2} \right) \right] \mu_0 - \left(\frac{a}{2} \right) \mu_0^2 \right\}}{\left[1 - (S_1 - 1) \right] \mu_0 - S_2 \frac{\mu_0^2}{\mu_0 + 1} - S_3 \frac{\mu_0^3}{(\mu_0 + 1)^2}} + (\gamma_0 + a \mu_0) E \quad (14)$$

اگر ماده منبسط شده باشد، آنگاه $\mu_0 < 0$ و معادله حالت به صورت رابطه (15) بیان می‌شود:

$$P = \rho C^2 \bar{\mu} + (\gamma_0 + a \bar{\mu}) E \quad (15)$$

که در معادلات فوق S_1, S_2, S_3 اولین، دومین و سومین ضرایب شیب منحنی $U_S - U_P$ (سرعت موج شوک و U_S سرعت ذره می‌باشند)، E انرژی داخلی اولیه، V حجم وابسته، a ضریب تصحیح حجمی، γ_0 ضریب گرونایزن و C سرعت صوت حجمی یا مقدار عرض از مبدا منحنی $U_S - U_P$ می‌باشد و مقدار μ_0 به صورت رابطه (16) بیان می‌شود:

$$\mu_0 = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) - 1 \quad (16)$$

که در آن ρ چگالی جاری و ρ_0 چگالی اولیه است.

برای لاینر مسی و هوا از معادله حالت گرونایزن استفاده شده است.

افتد. در اینجا پارامتر آسیب D از صفر تا یک تغییر می‌کند، صفر مربوط به موقعی است که هیچ آسیبی وجود ندارد و یک آسیب کامل را بیان می‌کند. قبل از آسیب کرنش شکست، ϵ_f ، به صورت معادله (7) بیان می‌شود:

$$\epsilon_f = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \sigma^*)][1 + d_4 \ln(\epsilon^*)][1 + d_5 T^*] \quad (7)$$

که در آن d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 ثابت‌های مادی و σ^* فشار اعمالی است که بر تنش مؤثر تقسیم می‌شود:

$$\sigma^* = \frac{P}{\bar{\sigma}} \quad (8)$$

تنش مؤثر $\bar{\sigma}$ از معادله (9) بدست می‌آید:

$$\bar{\sigma} = (1.5 \sigma_{ij} \sigma_{ij})^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

که در آن σ_{ij} مؤلفه‌های تانسور تنش می‌باشد.

همان‌طور که بیان شد آسیب در سرتاسر گام‌های زمانی با یکدیگر جمع می‌شود و شکست زمانی در لاینر و بدنه پرتابه پیشرو اتفاق می‌افتد که مقدار D برابر یک شود. پارامتر آسیب معمولاً برای مواد نرم مورد استفاده قرار می‌گیرد و به صورت رابطه (10) تعریف می‌شود:

$$D = \sum \left(\frac{\Delta \epsilon^p}{\epsilon_f} \right) \quad (10)$$

در جدول 2 خواص لاینر مسی و در جدول 3 خواص لاینر آلومینیومی در مدل مادی جانسون-کوک ارائه شده است.

4-1-3- مدل مادی شدیدالانفجار¹

این مدل مادی برای بیان رفتار مواد شدیدالانفجار (سرعت بالا) به کار می‌رود. با استفاده از این مدل مادی می‌توان رفتار بسیاری از مواد منفجره سرعت بالا نظیر PETN, RDX, TNT, C4 و غیره را تحلیل و مدل‌سازی نمود. در هر زمان، فشار در هر المان ماده منفجره سرعت بالا بصورت رابطه (11) بیان می‌شود:

$$P = F P_{eos}(V, E) \quad (11)$$

که P_{eos} فشار معادله حالت، V حجم وابسته و E چگالی انرژی داخلی در واحد حجم اولیه است. F پارامتر سوزش² است که در معادله حالت مواد منفجره ضرب می‌شود و آزاد سازی انرژی شیمیایی را برای شبیه‌سازی انفجار کنترل می‌نماید. در جدول 3 پارامترها و خواص مدل مادی مربوط به ماده منفجره C4 ارائه شده است.

جدول 2 خواص مادی لاینر مسی در مدل مادی جانسون-کوک [16]

Table 2 Material properties of copper liner in Johnson-cook Material model [16]

مقدار	کمیت	مقدار	کمیت
0.31	N	8960	ρ (kg/m ³)
1.09	M	0.025	C
1360	$MELT$ (K)	90	A (MPa)
293	T (K)	292	B (MPa)

جدول 3 خواص مادی ماده منفجره C4 در مدل مادی سوزش شدیدالانفجار [16]

Table 3 Material Properties of C4 in High Explosive Burn Mode 1 [16]

مقدار	کمیت	مقدار	کمیت
0.28	PCJ (GPa)	1601	ρ (kg/m ³)
1.4	$R2$	8190	D (m/s)
775	$OMEGA$	609.77	A (GPa)
9.0	E_0 (GPa)	12.950	B (MPa)
		4.5	$R1$

¹ High Explosive Burn Model

² Fraction Burn

³ Null Matreial Model

⁴ Deviatoric

⁵ Equation of State

⁶ Closure

⁷ Mie-Gruneisen

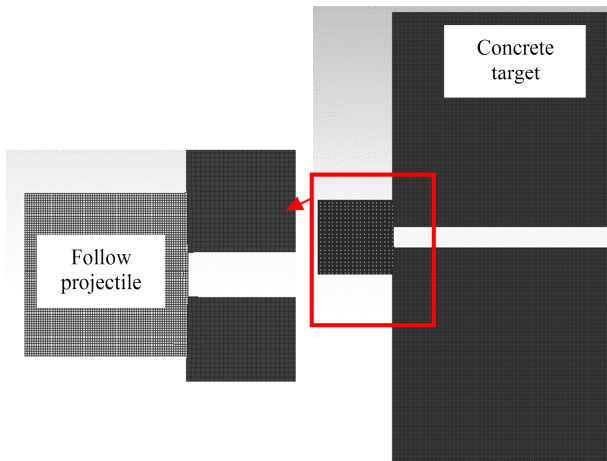


Fig. 6b Numerical model of follow projectile

شکل 6- ب مدل عددی پرتابه اصلی

5-4- روش حل عددی

در آنالیزهای عددی این تحقیق خرج شدیدالانفجار، لاینر مسی، هوای پیرامونی و نیز بدنه پرتابه به صورت اویلری، هدف بتنی و پرتابه اصلی به صورت لاگرانژی مدل‌سازی شده است.

5- نتایج و بحث

5-1- نتایج تست‌های تجربی

با توجه به سرعت بسیار بالای پرتابه‌های پیشرو و نیز حجم بالایی از آتش و دود، امکان اندازه‌گیری سرعت برخورد و سرعت باقی‌مانده در تست‌های مختلف با تجهیزات در دسترس میسر نبوده است. اما مهمترین پارامترهای مورد نظر شامل: قطر و عمق حفره جلویی، قطر و عمق حفره پشتی و نیز قطر تونل ایجاد شده در هدف بتنی و نیز ارزیابی کیفی تخریب ایجاد شده بر روی هدف از دیگر خروجی‌های تست‌های تجربی است. در شکل 7 فرایند نفوذ پرتابه پیشرو در چهار گام زمانی نشان داده شده است.

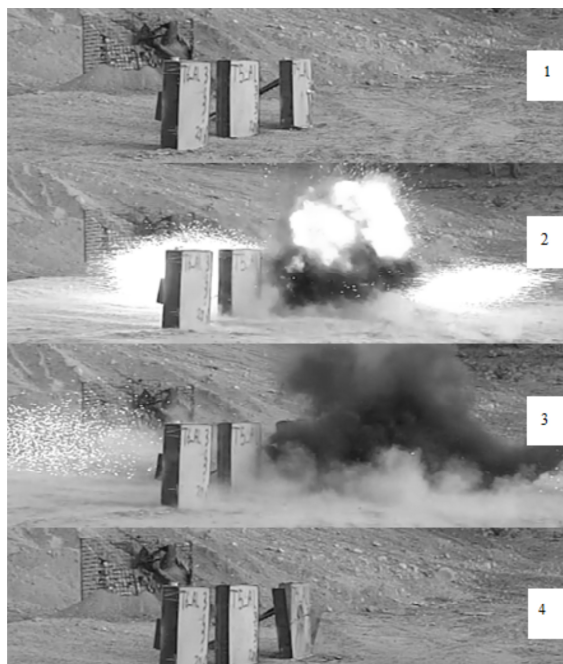


Fig. 7 Forward projectile penetration in concrete targets

شکل 7 نفوذ پرتابه پیشرو در هدف بتنی

2-2-4- معادله حالت JWL^[16]

معادله حالتی که غالباً برای توصیف رفتار محصولات انفجار به کار می‌رود، معادله حالت جونز- ویلکنز- لی (JWL) است و بصورت رابطه (17) بیان می‌شود:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{V}} \right) e^{-R_1 \bar{V}} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{V}} \right) e^{-R_2 \bar{V}} + \frac{\omega}{\bar{V}} \quad (17)$$

در معادله (17) A, B, R_1, R_2 ثابت‌های مواد انفجاری خاص هستند، \bar{V} حجم وابسته و E انرژی داخلی وابسته است، یعنی:

$$\bar{V} = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad E = \rho_0 e \quad (18)$$

که در آن ρ_0 چگالی ماده منفجره برای زمانی است که انفجاری در آن رخ نداده باشد. در تحلیل‌های عددی این بخش معادله حالت JWL به مدل مادی شدیدالانفجار نسبت داده شده است. معادله حالت JWL نیازمند ثابت‌های فراوانی است که برای مواد منفجره مختلف متفاوت می‌باشد، در جدول 3 ضرایب این معادله حالت برای ماده منفجره C4 ارائه شده است.

3-4- توصیف مدل هندسی و عددی

رسم مدل هندسی در ابتدای کار شبیه‌سازی انجام می‌گردد. مدل کردن هندسی با تعریف دو بخش پرتابه و بتن شروع و در دو مرحله (پرتابه‌ی پیشرو-بتن و پرتابه‌ی اصلی-بتن) و با ایجاد خطوط و سطوح ادامه می‌یابد. در شکل 6 مدل عددی پرتابه پیشرو، پرتابه اصلی و بتن نشان داده شده است. مشخصات پرتابه اصلی عبارتند:

قطر پرتابه: 7 سانتی‌متر

طول پرتابه: 7 سانتی‌متر

وزن پرتابه: 1800 گرم

مدل مادی در تحلیل‌های عددی: مدل مادی صلب

سرعت برخورد: 150 متر بر ثانیه

با توجه به تقارن محوری پرتابه و هدف در المان بندی از مدل‌سازی متقارن محوری استفاده شده است. تعداد کل المان‌های بکار رفته در تحلیل عددی پرتابه پیشرو 96900 المان می‌باشد.

4-4- پارامترهای کنترلی

زمان کل حل در تحلیل‌های عددی شکل‌گیری لاینر مسی 63 میکرو ثانیه و زمان کل حل نفوذ در هدف بتنی 1500 میکروثانیه می‌باشد. همچنین زمان کل حل نفوذ پرتابه اصلی در هدف بتنی آسیب‌دیده 5 میلی‌ثانیه است. پارامترهای کنترلی نیز شامل: ضریب مقیاس گام زمانی برابر 0.66 و پارامتر آورگلاس برابر 0.1 در نظر گرفته شده است.

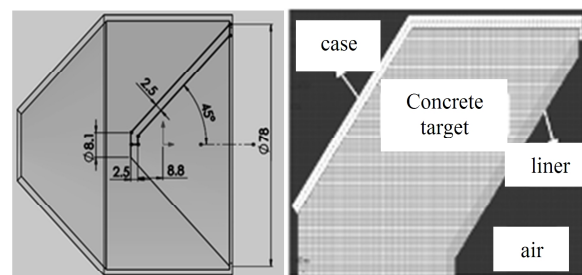


Fig. 6a Numerical and geometry of forward projectile

شکل 6- الف مدل هندسی و عددی پرتابه پیشرو

¹ Jones-Wilkins-Lee

2-5- نتایج شبیه‌سازی عددی

2-5-1- نفوذ پرتابه پیشرو

در شکل 9 نفوذ پرتابه پیشرو در هدف بتنی در چهار گام زمانی با استفاده از کانتور آسیب نشان داده شده است. در شکل 10 نیز ابعاد هندسی تونل بعد از نفوذ کامل پرتابه پیشرو و قبل از نفوذ پرتابه اصلی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود سه فاز ایجاد حفره جلویی، فاز تونلینگ و فاز حفره پشتی در فرایند شبیه‌سازی به خوبی صورت پذیرفته است. همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود قطر تونل در شبیه‌سازی‌های عددی برابر 22 میلی‌متر می‌باشد.

2-2-5- مقایسه نتایج تجربی و عددی نفوذ پرتابه پیشرو

در شکل 11 نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمون‌های تجربی برای قطر تونل، به عنوان مهمترین پارامتر نفوذ خرج‌گود در بتن، با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است.

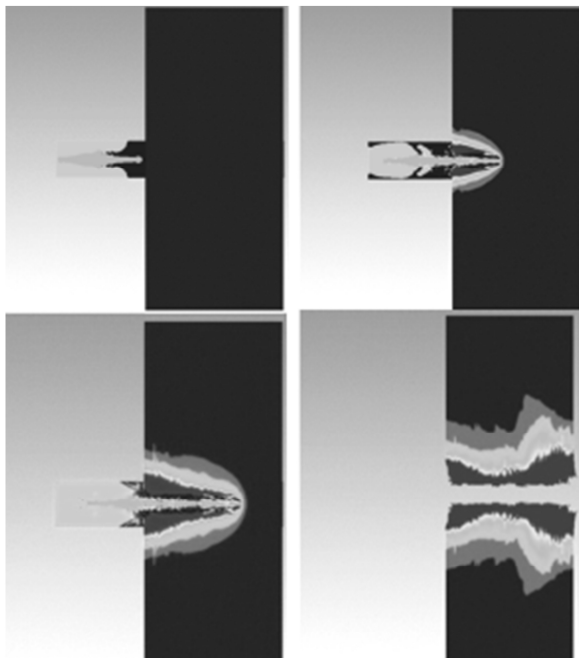


Fig. 9 Forward projectile penetration in several time step

شکل 9 نفوذ پرتابه پیشرو در چند گام زمانی

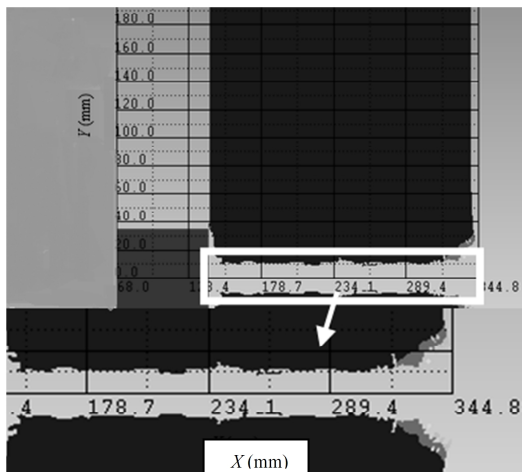


Fig. 10 Tunnel geometry in forward projectile penetration

شکل 10 ابعاد تونل در نفوذ پرتابه پیشرو

در شکل 8 اهداف بتنی پس از برخورد پرتابه پیشرو نشان داده شده‌اند، مقایسه کیفی اهداف بتنی پس از برخورد نشان می‌دهد که نتایج تست‌ها از تکرار پذیری بسیار خوبی برخوردار می‌باشد.

در جدول 4 نتایج نفوذ پرتابه پیشرو بر روی اهداف بتنی ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌های 8 و جدول 4 مشاهده می‌شود در کلیه پارامترهای اندازه‌گیری شده اختلاف بین نتایج بسیار کم بوده و نتایج تجربی به لحاظ کمی و کیفی از تکرارپذیری بسیار مناسبی برخوردار می‌باشد. اختلاف محدود بین نتایج تست‌های مختلف ناشی از عدم یکنواختی و غیر همگن بودن بتن می‌باشد که اجتناب ناپذیر می‌باشد.

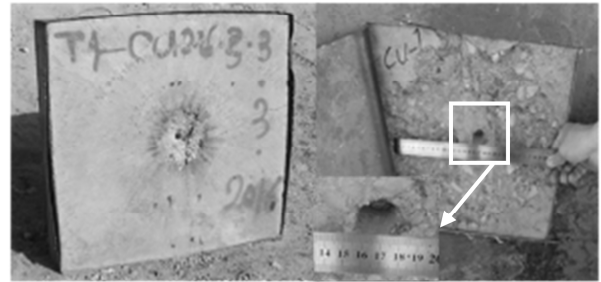


Fig. 8a First concrete target after forward projectile penetration (Right: back- Left: front)

شکل 8- الف هدف بتنی اول پس از نفوذ پرتابه پیشرو (راست: پشت - چپ: جلو)

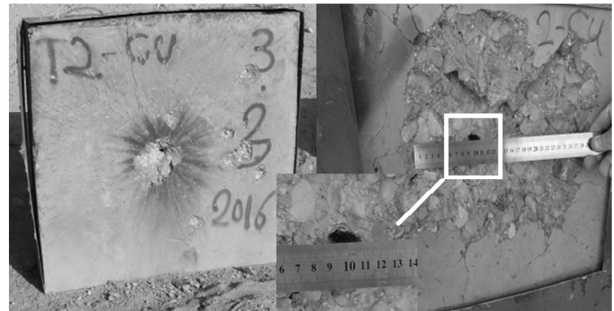


Fig. 8b Second concrete target after forward projectile penetration (Right: back - Left: front)

شکل 8- ب هدف بتنی دوم پس از نفوذ پرتابه پیشرو (راست: پشت - چپ: جلو)

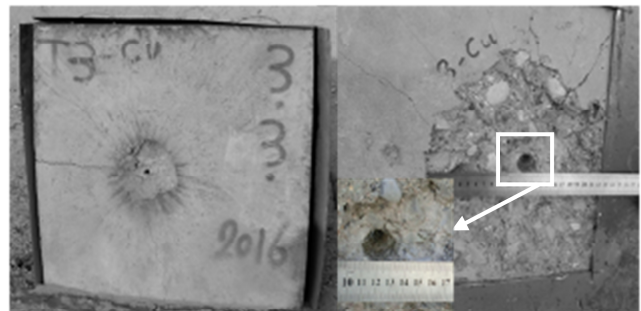


Fig. 8c Third concrete target after forward projectile penetration (Right: back - Left: front)

شکل 8- ج هدف بتنی سوم پس از نفوذ پرتابه پیشرو (راست: پشت - چپ: جلو)

جدول 4 نتایج نفوذ پرتابه‌های پیشرو بر روی اهداف بتنی

Table 4 Result of forward projectile on target concrete

شماره تست	3	2	1	میانگین
قطر تونل (mm)	24	22	23	23
قطر حفره جلویی (mm)	280	270	290	280
قطر حفره پشتی (mm)	315	320	330	321.6
عمق حفره جلویی (mm)	50	52	53	56.6
عمق حفره پشتی (mm)	60	55	55	51.6

نفوذ پرتابه اصلی در هدف بتنی سوراخ‌دار، بدون سوراخ و نیز بتن سوراخ‌دار آسیب دیده در راستای تعیین سرعت باقی‌مانده مهم‌ترین بخش از شبیه‌سازی‌های عددی نفوذ پرتابه‌های دو مرحله‌ای در اهداف بتنی است. لازم به ذکر است که قطر تونل در شبیه‌سازی‌های عددی نفوذ در بتن سوراخ‌دار 22 میلی‌متر می‌باشد.

در شکل‌های 12 تا 14 نفوذ پرتابه اصلی در اهداف بتنی ذکر شده با استفاده از کانتورهای سرعت و آسیب نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های مختلف مشاهده می‌شود برای ساده‌سازی، پرتابه اصلی به شکل یک استوانه به طول و قطر 70 میلی‌متر و با دماغه تخت در نظر گرفته شده است. سرعت برخورد نیز 150 متر بر ثانیه می‌باشد.

همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌شود پرتابه اصلی قابلیت نفوذ کامل و عبور از هدف بتنی بدون سوراخ را ندارد.

اثرات ایجاد سوراخ در نفوذ کامل پرتابه در هدف بتنی و نیز دستیابی به سرعت باقی‌مانده 36 متر بر ثانیه در شکل 13 نشان داده شده است.

که البته این موضوع باید مورد توجه قرار گیرد که بتن سوراخ‌دار هیچ آسیبی ندیده و خواص مکانیکی آن نیز ضعیف نشده است.

همان‌طور که در شکل 14 مشاهده می‌شود در صورتی که هدف سوراخ‌دار و آسیب‌دیده نیز باشد ضمن عبور کامل پرتابه از داخل هدف، سرعت باقی‌مانده نیز نسبت به حالت هدف سوراخ‌دار بدون آسیب افزایش می‌یابد. علت این نتیجه علاوه بر وجود سوراخ در هدف بتنی، کاهش خواص مکانیکی بتن پس از برخورد پرتابه پیشرو می‌باشد.

در نمودار شکل 15 سرعت باقی‌مانده برای سه حالت نفوذ پرتابه اصلی در هدف بتنی بدون سوراخ، هدف بتنی سوراخ‌دار بدون آسیب و هدف بتنی سوراخ‌دار آسیب‌دیده به صورت مقایسه‌ای نشان داده شده است.

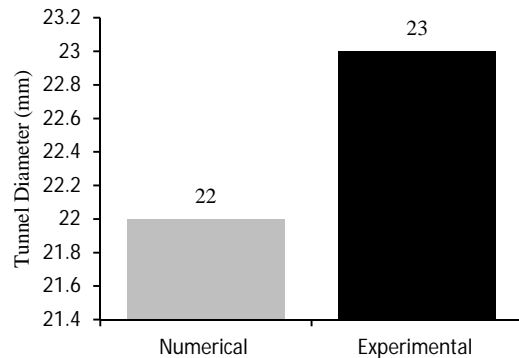


Fig. 11 The comparison of Experimental and numerical tunnel diameter for forward projectile penetration in concrete target

شکل 11 مقایسه قطر تونل در نتایج تجربی و عددی نفوذ پرتابه پیشرو در هدف بتن

مقایسه بین نتایج تجربی و عددی قطر تونل نشان می‌دهد که حداکثر اختلاف بین دو روش کمتر از 4.5 درصد است.

علاوه بر مقایسه کمی قطر تونل در دو روش عددی و تجربی، بررسی‌های کیفی نظیر ایجاد حفره جلویی، حفره پشتی و مکانیزم تخریب نیز بیانگر انطباق بالای بین تحلیل‌های عددی و تست‌های تجربی می‌باشد.

با توجه به عدم یکنواختی مصالح مورد استفاده در بتن و عدم همگنی آن به عنوان یک خاصیت ذاتی، اختلاف نتایج بسیار مطلوب و مورد قبول می‌باشد. لذا با اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی عددی و روش‌های حل عددی مورد استفاده، می‌توان به شبیه‌سازی نفوذ پرتابه اصلی در هدف بتنی پرداخت.

3-2-5- نفوذ پرتابه اصلی

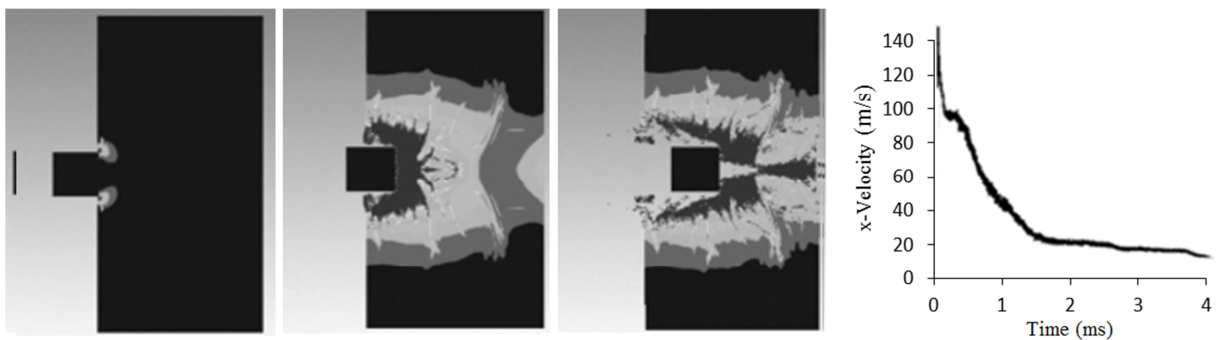


Fig. 12 Follow projectile penetration in several time steps (damage contour) and follow projectile velocity changes graph, during penetration in concrete target without hole

شکل 12 نفوذ پرتابه اصلی در چند گام زمانی (کانتور آسیب) و نمودار تغییرات سرعت پرتابه اصلی در حین نفوذ در هدف بتنی بدون سوراخ

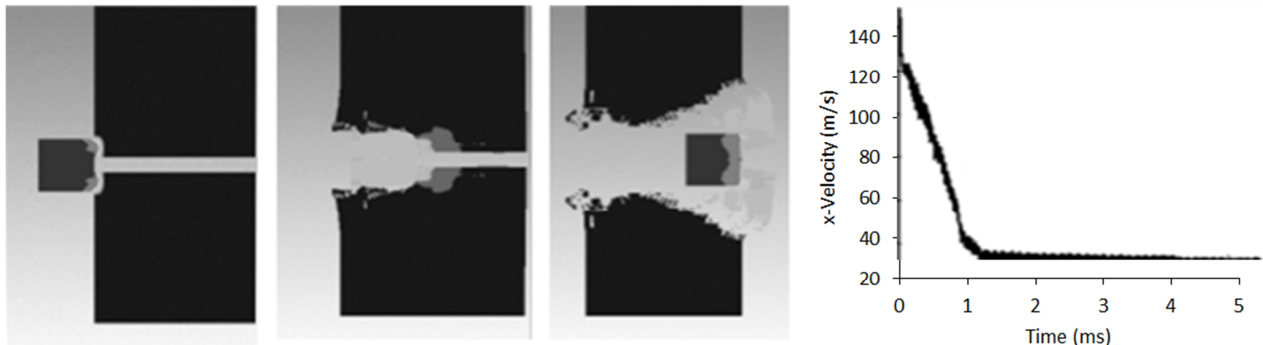


Fig. 13 Follow projectile penetration in several time steps and follow projectile velocity changes graph, during penetration in predrilled concrete target

شکل 13 نفوذ پرتابه اصلی در چند گام زمانی و نمودار تغییرات سرعت پرتابه اصلی در حین نفوذ در هدف بتنی سوراخ‌دار

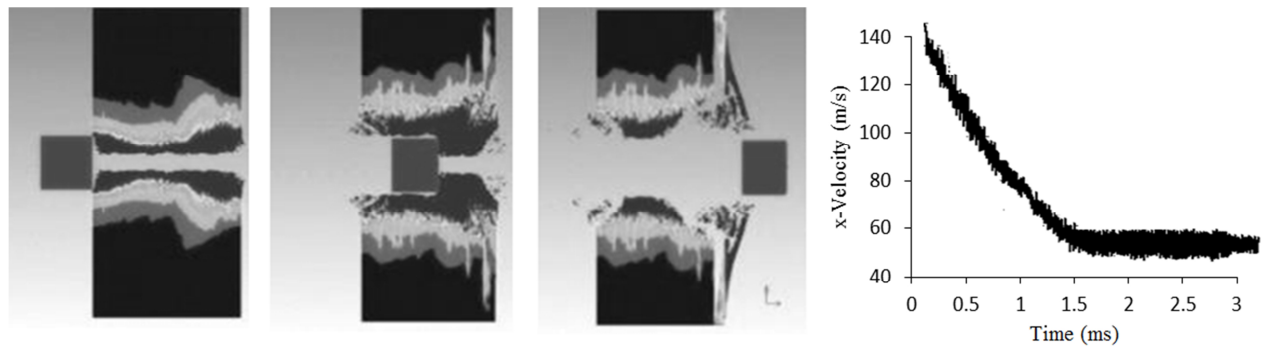


Fig. 14 Follow projectile penetration in several time steps (damage contour) and follow projectile velocity changes graph, during penetration in predrilled and damaged concrete target

شکل 14 نفوذ پرتابه اصلی در چند گام زمانی (کانتور آسیب) و نمودار تغییرات سرعت پرتابه اصلی در حین نفوذ در هدف بتنی بدون سوراخ‌دار آسیب‌دیده

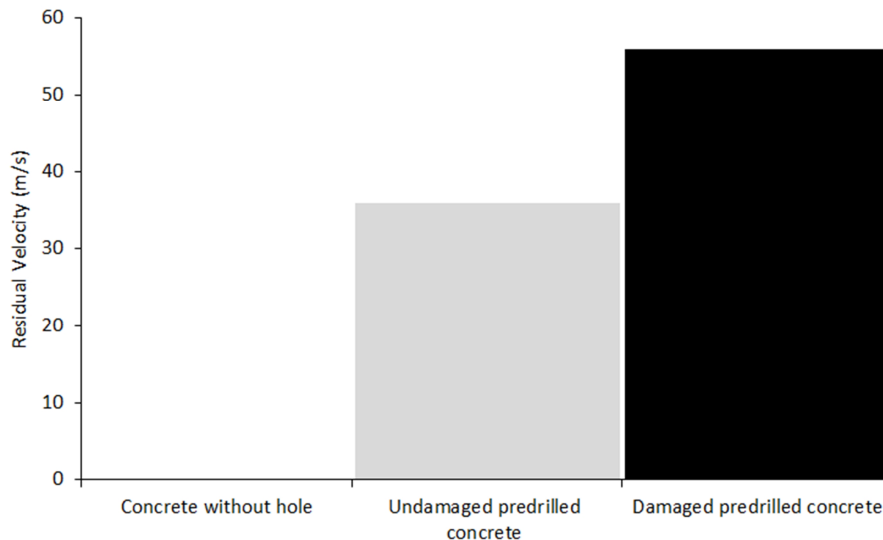


Fig. 15 Comparison of follow projectile residual velocity in damaged predrilled concrete, undamaged predrilled concrete and concrete without hole

شکل 15 مقایسه سرعت باقی‌مانده پرتابه اصلی در بتن‌های سوراخ‌دار آسیب‌دیده، سوراخ‌دار بدون آسیب و بدون سوراخ

می‌دهد که اختلاف بین دو روش در ایجاد قطر تونل حداکثر 4.5 درصد می‌باشد که با توجه به مشخصات ذاتی بتن که ماده‌ای غیر همگن است، انطباق بسیار خوبی را نشان می‌دهد. به لحاظ کیفی نیز فازهای ایجاد حفره جلویی، تونلینگ و ایجاد حفره پشتی دو روش مطابق شکل 9 و شکل‌های 8 در انطباق مناسبی با یکدیگر می‌باشند.

- نتایج شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه اصلی بر روی هدف بتنی بدون سوراخ، هدف بتنی سوراخ‌دار و هدف بتنی سوراخ‌دار آسیب‌دیده نشان می‌دهد که پرتابه اصلی قابلیت نفوذ در هدف بتنی بدون سوراخ را مطابق شکل 12 ندارد، اما با ایجاد سوراخ و آسیب بر روی هدف بتنی مطابق شکل‌های 13 و 14 پرتابه اصلی می‌تواند با سرعت‌های باقی‌مانده 36 و 57 متر بر ثانیه از هدف بتنی عبور نماید.

بنابراین در صورت استفاده از پرتابه پیشرو خرج‌گود و ایجاد آسیب در هدف بتنی، فرایند نفوذ پرتابه اصلی امکان‌پذیر شده و سرعت باقی‌مانده نیز نسبت به حالت بدون آسیب افزایش می‌یابد.

7- مراجع

- [1] M. J. Murphy, Performance analysis of two-Stage munitions, *Proceedings of the 8th International Symposium on Ballistics*, Orlando, Florida, October 23-25, pp. 125-136, 1984.

6- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق در استای تحلیل عملکرد یک پرتابه دو مرحله‌ای ضد استحکامات که دارای پرتابه پیشرو خرج‌گود و پرتابه اصلی انرژی جنبشی است، به آنالیز عددی و تجربی این نوع پرتابه‌ها پرداخته شده است. از آنجا که مدل تحلیلی مناسبی که قادر به تخمین و لحاظ نمودن اثرات آسیب در نفوذ پرتابه اصلی در هدف بتنی آسیب دیده باشد وجود ندارد، لذا در این تحقیق در راستای تعیین آسیب بر روی اهداف بتنی در ابتدا با استفاده از روش‌های تجربی و عددی میزان آسیب بر روی هدف بتنی برآورد شده و سپس به بررسی و تحلیل نفوذ پرتابه اصلی بر روی اهداف بتنی مختلف پرداخته شده است. مهمترین نتایج این تحقیق به قرار ذیل است:

- نتایج تست‌های تجربی نشان می‌دهد که پرتابه خرج‌گود مخروطی با لاینر مسی و ضخامت 2.5 میلی‌متر قادر به نفوذ کامل در هدف بتنی بدون تقویت بوده و باعث ایجاد آسیب در اطراف ناحیه تونل مطابق شکل‌های 8 می‌شود.
- نتایج شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه پیشرو خرج‌گود بر روی هدف بتنی با استفاده از مدل‌های مادی جانسون-هلمکوئیست برای بتن و جانسون-کوک برای لاینر فلزی نشان می‌دهد که با این روش می‌توان با دقت خوبی به لحاظ کمی و کیفی عملکرد پرتابه پیشرو بر روی هدف بتنی را مدل سازی نمود. - مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و تست‌های تجربی نفوذ پرتابه پیشرو نشان

- Lu, Influence of concrete target with pre-drilled cavities on the penetration performance of a projectile, *Chinese Journal of High Pressure Physics*, Vol. 29, No. 1, pp. 69-74, 2015.
- [11] J. WANG, C. WANG, A modified theoretical model of the concrete target with pre-drilled cavities penetrated by the ogive-nose projectile and numerical simulation, *Chinese Journal of Computational Mechanics*, Vol. 26, No.4, pp. 558-561, 2009. (in Chinese)
- [12] N. LI, Numerical simulation for the process of tandem warhead against masonry structure, *7th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures*, Beijing, China, October 17-19, pp. 349-354, 2007. (in Chinese)
- [13] T. J. Holmquist, G. R. Johnson, W. H. Cook, A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressure, *14th International Symposium on Ballistics*, Quebec, September 26-29, pp. 591-600, 1993.
- [14] N. Khazraiyani, GH. Liaghat, H. Khodarahmi, N. Dashtian Gerami, Analysis of perforation process into concrete/metal target by rigid projectile, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 227, No. 7, pp. 1454-1468, 2013.
- [15] N. Khazraiyani, GH. Liaghat, H. Khodarahmi, Normal impact of hard projectile on concrete targets, *Structural Concrete*, Vol. 14, No. 2, pp. 176-183, 2013.
- [16] J. Carleone, *Tactical Missile Warhead Progress in Astronautics and Aeronautics*, second edition, pp. 165-185, Washington Dc: AIAA, 1993.
- [2] E. N. Folsom, *Projectile penetration into concrete with an inline hole*, Master's Thesis, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-53786, June, 1987.
- [3] J. A. Teland, Cavity expansion theory applied to penetration of targets with pre-Drilled cavities, *19th International Symposium on Ballistics*, Interlaken, Switzerland, May 7-11, pp. 1329-1335, 2001.
- [4] F. J. Mostert, Penetration of steel penetrators into concrete targets with pre-drilled cavities of different diameters, *18th International Symposium on Ballistics*, San Antonio, Texas, November 15-19, pp. 1042-1048, 1999.
- [5] M. J. Forrestal, D. Y. Tzou, A Spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets, *International Journal of Solid Structures*, Vol. 34, No. 31-32, pp. 4127-4146, 1997.
- [6] X. J. Guo, H. M. Wen, Performance analysis and optimization of adual warhead system, *International Journal Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 13, No. 1, pp. 49-54, 2012.
- [7] H. M. Wen, Predicting the penetration and perforation of targets struck by projectiles at normal incidence, *Mechanics of Structures and Machines*, Vol. 30, No.4, pp. 543-577, 2002.
- [8] S. Y. WANG, Penetration of kinetic energetic projectile against predamaged concrete targets, *7th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures*, Beijing, China, November 17-19, pp. 607-612, 2007. (in Chinese)
- [9] J. T. Gomez, A. Shukla, Multiple Impact penetration of semi-infinite concrete, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, No. 10, pp. 965-979, 2001.
- [10] H. B. WANG, SH. Q. Yang, R. Z. Xie, L. X. Qian, Y. G.