



بررسی مدل‌های نفوذ پرتابه در اهداف فلزی و سرامیکی

مصطفی سیاح بادخور^۱، علیرضا نداف اسکویی^{۲*} و خداداد واحدی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

^۲ دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

^۳ استاد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۴/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸

چکیده

نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی یکی از موضوع‌های مهم و اساسی در علم مکانیک است. نفوذ پرتابه در این مقاله، در سه بخش بررسی شده است؛ بخش اول مربوط به مدل‌های نفوذ در فلزها، بخش دوم مربوط به مدل‌های نفوذ با اعداد بی‌بعد و بخش سوم، مربوط به نفوذ در سرامیک‌ها است. در بخش اول علاوه بر مرور مدل‌های تحلیلی نفوذ، دسته‌بندی و خلاصه آنها نیز بیان شده است. مدل‌ها شامل، معادله پانسلت، تئوری هیدرودینامیک، تئوری هیدرودینامیک اصلاح شده، رچت-ایپسون، تیت-الکسویسکی، انبساط حفره، راوید-بادنر، والکر-اندرسون و مدل‌های شبیه‌سازی هست. فرضیه‌های مدل‌ها کاملاً مشخص شده و داده‌هایی از پیش‌بینی مدل‌ها در مقایسه با داده‌های تجربی بدست آمده است. این فرضیه‌ها شامل، نفوذ جسم صلب، نفوذ سایشی، نفوذ پایدار و انتقالی و نفوذ کامل است. در بخش دوم مدل‌های بی‌بعد برای نفوذ پرتابه و در بخش سوم، مدل‌های تحلیلی نفوذ در اهداف ترکیبی سرامیک - فلز مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، مدل‌های بنیادی مربوط به نفوذ پرتابه در اهداف فلزی و سرامیکی دسته‌بندی شده است. ضمناً، تحلیل کامل و دقیقی برای این مدل‌ها نیز بیان شده است.

کلمات کلیدی: مدل تحلیلی نفوذ؛ نفوذ در فلز؛ نفوذ در سرامیک؛ مدل تجربی نفوذ؛ مدل اعداد بی‌بعد نفوذ.

Evaluation of the Projectile Penetration Models in the Metal and Ceramic Targets

M. Sayah Badkhor¹, A. Naddaf Oskouei^{2,*}, K. Vahedi³

¹ Ph.D. Candidate, Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

² Assoc. Prof., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

³ Prof., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

Abstract

Penetration of projectile in the combined targets is one of the most important issues in mechanics. In this article, penetration of projectile evaluation in three parts. The first part is related to models of penetration into metals, the second part is related to models of penetration by the dimensionless and the third part is related to penetration into ceramics. In the first section, in addition to reviewing analytical models of penetration, their categorization and summary are also have been stated. The models include the Poncelet Equation, the Hydrodynamic Theory, Modified Hydrodynamic Theory, Recht-Ipson, Tate - Alekseevskii, Cavity Expansion, Ravid-Bodner, Walker-Anderson, and simulation models. Model assumptions are fully determined and some data has been obtained from model predictions in comparison to empirical data. These assumptions contained rigid body penetration, abrasive penetration, sustained and transitional penetration, and full penetration. The second and third parts are investigated dimensionless models of penetration and penetration into ceramic - metal combined targets, respectively. In this article, basic models of projectile penetration in metal and ceramic targets were categorized. Also, precision analysis of these models was done.

Keywords: Analytical Model of Penetration; Penetration into Metal; Penetration into Ceramic; Experimental Model of Penetration; Dimensionless Model of Penetration.

* علیرضا نداف اسکویی؛ تلفن: ۰۹۱۲۸۱۷۳۶۱۹؛ فکس: ۰۲۳-۳۱۴۳۲

آدرس پست الکترونیک: anadaf@ihu.ac.ir

۱- مقدمه

مقاله‌های متعدد خوبی در مورد نفوذ، سوراخ شدگی و دیگر جنبه‌های علم حرکت پرتابه‌ها وجود دارد. بکمن^۲ و گلداسمیت^۳ [۱] بررسی وسیعی در مورد تقابل پرتابه و هدف انجام داده‌اند. آنها روی اهداف نیمه بی‌نهایت، نفوذ و نفوذ کامل در صفحه‌های از نازک تا ضخیم با پوشش کامل محدوده سرعت تمرکز کردند. جوناس^۴ و زوکاس^۵ [۲]، مدل-های تحلیل در دسترس را در مورد مطالعه تقابل پرتابه-زره، با تأکید بر شبیه‌سازی عددی در محدوده سرعت ۰/۵ تا ۲ کیلومتر بر ساعت را مرور کردند. بادنر^۶ و اندرسون^۷ [۳]، مدل‌سازی تحلیلی و عددی ضربه حرکت پرتابه را مرور کردند. گلداسمیت^۸ [۴] مرور وسیعی را در مورد ضربه پرتابه واقعی بر اهداف انجام داد. این مقاله‌ها، در جزئیات مختلف، بر نتایج و پروسه تجربی، روند داده‌ها، مدل‌سازی تحلیلی، مدل‌سازی عددی و مکانیسم تقابل هدف-پرتابه تمرکز دارند. پیشرفت قابل توجهی در مدل‌سازی تحلیلی از زمان انتشار مقاله‌های مراجع [۱-۴] به وجود آمد. در واقع با انتشار این مقاله‌ها که پایه و اساس مدل‌های تحلیلی نفوذ پرتابه در هدف هستند، توجه به مدل‌های تحلیلی بیشتر شد.

زره‌های سرامیکی نازک اولین بار طی جنگ ویتنام ساخته و مورد استفاده قرار گرفتند. زره‌های هواپیما قبلاً برای ایجاد حفاظت در برابر توپ پدافند هوایی و برخورد ترکش‌ها، در جنگ جهانی اول طراحی شده بودند. نیروی هوایی آمریکا^۹ برای جنگ‌های سخت و حملات انفجاری آماده شده بود. این‌طور زره‌ها در برابر حملات گلوله مستقیم از زمین ناکارآمد بودند. خلبان‌های آمریکایی در برابر این مدل حملات به خاطر استفاده وسیع نیروی هوایی آمریکا از بالگردها و مأموریت‌ها در سطح پائین آسیب‌پذیر بودند. زره‌های سرامیکی خیلی سریع طراحی شده و مورد استفاده قرار

گرفتند. این زره‌ها از اکسید آلومینیوم^{۱۰} (آلومینا) تشکیل شده بود که از پشت با فایبرگلاس تقویت شده بود و از جلو با نایلون بالستیک پوشیده شده بود تا از پرتاب شدن خرده‌های سرامیک جلوگیری کند که می‌توانند سبب کور شدن خلبانان شوند. این مواد بر اساس برخی خصوصیات از جمله، قابل پرداخت شدن، هزینه، چگالی و عملکرد بالستیک انتخاب شده‌اند [۵]. عملکرد بالستیک برای یک ضخامت معین از هدف و یک پرتابه معین به‌سادگی به‌وسیله v_{50} ارزیابی می‌شود که سرعتی است که در آن به ۵۰٪ از زره نفوذ شده است [۶ و ۷]. از آنجایی‌که این زره‌ها خیلی سریع مورد استفاده قرار گرفتند، طراحی آنها بر اساس برنامه تحقیقاتی پایه‌ای نبود [۸]. برنامه تحقیقاتی زره سبک در ابتدا در اواخر دهه ۱۹۶۰ در آزمایشگاه تشعشع لاورنس^{۱۱} انجام شد [۸ و ۹]. یک گروه در LLNL^{۱۲} تعدادی سرامیک پیدا کردند که از آلومینا (SiC, BeO and B₄C) بهتر بودند که بهترین آنها B₄C بود [۱۰]. با این حال هزینه مانع استفاده گسترده از آن شد [۸]. بهبود عملکرد بالستیک با وارد کردن یک گرادیان از انعطاف‌پذیری داخل ضخامت هدف تولید شد (ساخت یک سرامت^{۱۳} (ترکیبی از سفال و فلز که سخت و در مقابل گرما مقاوم است) در صفحه پشتی)، اما مشکل‌های وزن و هزینه وجود داشت [۵ و ۸ و ۱۱].

در سال‌های اخیر نیز کارهای ارزشمندی در زمینه بارگذاری ضربه‌ای انجام شده است. در سال ۲۰۱۴، دامغانی نوری و حاتمی به بررسی تجربی و عددی به جذب کننده‌های انرژی استوانه‌ای و مخروطی تحت بار ضربه‌ای پرداختند. آنها دریافتند که قطعه‌های استوانه‌ای طول خرابی کمتری نسبت به مخروطی‌ها دارند [۱۲]. در سال ۲۰۱۷، حاتمی و همکارانش به ارائه یک مدل تحلیلی برای جذب انرژی در لوله‌های فلزی تحت بارگذاری ضربه‌ای پرداختند. مدل آنها نمودار نیرو - جابجایی را در طول بارگذاری دینامیکی به‌خوبی پیش‌بینی می‌کرد [۱۳]. در سال ۲۰۱۸، جهرمی و حاتمی به بررسی عملکرد لوله‌های فلزی مشبک تحت

¹ Ballistics² Backman³ Goldsmith⁴ Jonas⁵ Zukas⁶ Bodner⁷ Anderson⁸ Goldsmith⁹ USAF¹⁰ Alumina¹¹ Lawrence Radiation Laboratory¹² Lawrence Livermore National and Sandia National

Laboratory

¹³ Cermet

اصلاح ناچیزی روی مدل‌های موجود باشد. در این مقاله با توجه به این دو نکته، دسته‌بندی جامع و کاملی روی مدل‌های تحلیلی نفوذ به همراه بحث روی نتایج آنها انجام شده است. ضمناً، نواقص و برتری‌های معادله‌های مهم هر کدام از این مدل‌ها نیز بیان شده است.

۲- نفوذ در فلزها

در این بخش به بررسی مدل‌های نفوذ از ابتدا تاکنون پرداخته شده است.

۲-۱- معادله پانسلت

جین-ویکتور پانسلت^۱ یک معادله دیفرانسیل معمولی را برای توصیف نفوذ پرتابه‌های صلب ایجاد کرد. طبق قانون دوم نیوتن، کاهش شتاب پرتابه، ناشی از نیروی مقاوم هست:

$$M \frac{dv}{dt} = -F = -(A + Bv^2) \quad (1)$$

مقدار A برابر مقاومت استاتیکی هدف است و ترم Bv^2 نشان می‌دهد که نیروی مقاوم با توان دوم سرعت رابطه دارد. در مکانیک سیالات v^2 معمولاً یک ترم پساراست. وقتی پرتابه تغییر شکل نمی‌دهد، سطح مقطع ثابت باقی می‌ماند و معادله (۱) می‌تواند به شکل (۲) نوشته شود:

$$\rho_p L \frac{dv}{dt} = -(a + bv^2) \quad (2)$$

(اگر سطح مقطع ثابت نباشد، L طول مؤثر پرتابه است.) با انتگرال گرفتن از معادله (۲) می‌توان عمق کلی نفوذ (P) را با استفاده از تعریف مشتق‌گیری زنجیره‌ای بدست آورد:

$$\frac{1}{\rho_p L} \int_0^P dz = - \int_v^0 \frac{v dv}{a + bv^2} \quad (3)$$

بنابراین:

$$\frac{P}{L} = \frac{\rho_p}{2b} \ln \left(1 + \frac{bv^2}{a} \right) \quad (4)$$

فوراستال^۲ و پیکوتوسکی^۳ [۱۸] عمق نفوذ را برای پرتابه‌ای از جنس فولاد مارتنزیتی^۴ با دماغه اجابو^۵ که به

بارگذاری ضربه‌ای محوری پرداختند. آنها دریافتند که افزایش اندازه سطح مقطع و چندلایه کردن لوله‌های فلزی تاثیر قابل توجهی در نیروی لهیدگی پیشینه اولیه و ظرفیت جذب انرژی لوله‌های فلزی مشبک دارد [۱۴]. در سال ۲۰۱۸، نجفی و همکارانش به تحلیل عددی و تجربی نفوذ گلوله زرهی در اهداف فولادی فوق مستحکم پرداختند. آنها ضمن تعیین عمق نفوذهای مختلف دریافتند که با کاهش زاویه برخورد علاوه بر کاهش میزان نفوذ، نحوه بازگشت گلوله نیز در زاویه مشخصی تغییر خواهد کرد [۱۵]. در همین سال، حاتمی و فتح‌اللهی به بررسی تحلیلی و عددی تاثیر اینرسی در رفتار فرو ریزش جاذب مشبک تک سلولی و دو سلولی تحت بارگذاری ضربه‌ای پرداختند. آنها ضمن به‌دست آوردن رابطه جاذب انرژی برحسب پارامتر اینرسی دریافتند که فروریزش جاذب به صورت متقارن دو سوپه است [۱۶]. حاتمی و همکارانش در سال ۲۰۱۹، به بررسی نفوذ کامل اهداف آلومینیومی نازک تحت ضربه سرعت بالا توسط پرتابه‌های کروی آلومینیومی پرداختند. آنها قطرهای مختلف پرتابه، ضخامت‌های مختلف هدف و محدوده گسترده‌ای از سرعت‌ها را در نظر گرفتند و یک مدل بی‌بعد نیز ارائه کردند [۱۷].

تکامل مدل‌های تحلیلی نفوذ از فلزها شروع و به سایر مواد تعمیم داده شده است؛ بنابراین، در بخش اول، مروری بر مدل‌های تحلیلی نفوذ در فلزها انجام شده است. در این بخش فرآیند نفوذ به داخل اهداف فلزی (تحت شرایطی با محدودیت‌های زیاد) توصیف و مورد بحث قرار گرفته است. در بخش دوم، مدل‌های اعداد بی‌بعد مربوط به نفوذ مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. در بخش سوم نیز، ضمن بیان بررسی ورود سرامیک‌ها به ساخت اهداف، مدل‌های تحلیلی نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی سرامیک-فلز، مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. این مدل‌ها، اولاً باید یک بینش قابل توجهی را در مورد مکانیک نفوذ ایجاد کنند. این اجبار، مدل‌های غیرعلمی را حذف می‌کنند که نیازمند داده‌های تجربی برای درست کردن تابع فرض هستند. باید توجه داشت که مدل‌های تجربی می‌توانند بسیار کاربردی باشند، اما گستره‌ی اعتبار با داده‌های تجربی که برای تخمین پارامترهای مدل استفاده می‌شوند، محدود است. دوماً، مدل پیشرفت قابل توجهی را ایجاد کرده باشد، نه اینکه صرفاً

¹ Jean-Victor Poncelet

² Drag

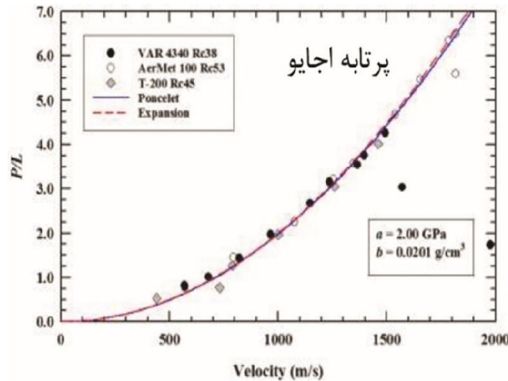
³ Forrestal

⁴ Piekutowski

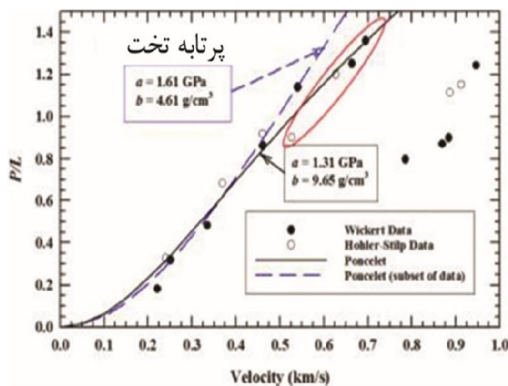
⁵ Maragingsteel

⁶ Ogival

تجربی، تنها می‌توان گفت که این آنالیز پیشنهاد دهنده است. هرچند که خیلی رضایت‌بخش نیست [۱۹].



شکل ۱- عمق نفوذ بی‌بعد شده برای نفوذ پرتابه‌های فولادی سخت در آلومینیوم 6061-T6 [۱۸]



شکل ۲- عمق نفوذ بی‌بعد شده برای نفوذ پرتابه‌های آلیاژ تنگستن در هدف آلومینیوم [۱۹ و ۲۰]

۲-۲- تئوری نفوذ هیدرودینامیک

تئوری نفوذ هیدرودینامیک طی جنگ جهانی دوم به وجود آمد و به‌صورت نفوذ خرج گود^۵ ناشی از جریان سریع مورد استفاده قرار گرفت. این تئوری توسط بریخوف^۶، مکدوگال^۸،

آلومینیوم 6061-T6 نفوذ می‌کند را به‌عنوان تابعی از سرعت ضربه اندازه‌گیری کردند. عمق‌های نفوذ که با طول پرتابه بی‌بعد شده‌اند، در شکل ۱ رسم شده است. سختی راکول^۱ نوع C پرتابه‌ها بین Rc38 تا Rc53 بسته به آلیاژ مخصوص و عملیات حرارتی متفاوت است. با روش رگرسیون^۲ حداقل مربعات از میان داده‌های تجربی که به‌صورت یک خط در شکل ۱ مشخص شده است، مقادیر a و b به دست می‌آیند (نقاطی که از سرعت‌های بالاتر از ۱۵۰۰ متر بر ثانیه به‌دست‌آمده‌اند در زیر این خط قرار دارند و در این روش نادیده گرفته می‌شوند).

برای مقادیر کوچک bv^2/a ، لگاریتم طبیعی بسط داده می‌شود:

$$\frac{P}{L} = \frac{\rho_p V^2}{2a} \quad (5)$$

که به‌صورت خط‌چین در شکل ۲ نشان داده شده است. بنابراین عمق نفوذ با توان دوم سرعت ضربه متناسب است. نیروی مقاوم، معادله (۲)، تقریباً ثابت و مستقل از سرعت ضربه است تا زمانی که پارامتر b وارد معادله (۵) نشده باشد. بی‌بعد کردن نفوذ برای پرتابه‌های از جنس آلیاژ تنگستن با نوک تخت^۳ به داخل هدف آلومینیومی سری ۷۰۰۰ در شکل ۲ نشان داده شده است. داده‌های تجربی از دو مجموعه داده توسط محققین در موسسه ارنست-مک^۴ بدست آمده‌اند. روش رگرسیون حداقل مربعات برای تمام داده‌های زیر سرعت ۰/۷ کیلومتر بر ساعت انجام شد و نتایج با یک خط در شکل ۲ نشان داده شده است. باین‌حال، اگر ۴ تا از داده‌هایی که در شکل ۳ با یک بیضی مشخص‌شده‌اند از آنالیز حذف شوند، نتایج به‌صورت خط‌چین نشان داده می‌شود. خطای استاندارد این روش برای منحنی خط‌چین ۴۵٪ کمتر از منحنی خط است. علت اختلاف این است که در سرعت‌های بالای ضربه پرتابه شروع به تغییر شکل می‌کند و این تحلیل پانسلت که بر اساس فرض نفوذ جسم صلب بود برای این ۴ داده درست نیست. باید توجه داشت که بدون داده‌های

⁵ Shaped-Charge

⁶ Jet

⁷ Birkhoff

⁸ MacDougall

¹ Rockwell

² Regression

³ Blunt-Nose

⁴ Ernst-Mach

نهایت فرض شده است. انتگرال معادله (۹) به صورت (۱۰) می‌شود:

$$\frac{1}{2} \rho_P (v - u)^2 = \frac{1}{2} \rho_t u^2 \quad (10)$$

این یک مدل هیدرودینامیک، غیرقابل تراکم در شرایط پایدار برای نفوذ است.

۲-۳- تئوری هیدرودینامیک اصلاح شده

خرج گود جریان‌های سریع دارای گرادیان سرعت است. تئوری هیدرودینامیک برای هرکدام از این بخش‌های جریان اعمال می‌شود. این فرآیند عمق نهایی نفوذ را پیش‌بینی می‌کند. ایچلبرگر^۷ [۲۲] ثابت کرد که در سرعت‌های کم، به-خصوص در مورد اهداف محکم (فولاد)، اثرات مقاومت هدف نمی‌تواند نادیده گرفته شود. او معادله (۱۰) را اصلاح کرد:

$$\frac{1}{2} \rho_P (v - u)^2 = \frac{1}{2} \rho_t u^2 + \Sigma \quad (11)$$

که $\Sigma = \sigma_{\gamma_t} - \sigma_{\gamma_p}$ مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک را نشان می‌دهد. ایچلبرگر برآورد کرد که مقدار Σ ، ۱ تا ۳ برابر مقاومت تسلیم تک‌محوری ماده تشکیل‌دهنده هدف است (از آنجایی که جریان معمولاً از مس^۸ است، σ_{γ_p} بسیار کوچک-تر از σ_{γ_t} است).

آلن^۹ و راگرز^{۱۰} [۲۳] تئوری هیدرودینامیک اصلاح شده را در مورد ضربه‌های سرعت‌بالا برای شش پرتابه میله‌ای با جنس‌های مختلف (طلا، سرب، مس، قلع یا حلب، آلومینیوم و منیزیوم) به داخل آلومینیوم 7075-T6 به کار بردند. آنها به-جای Σ از نماد ϕ_t استفاده کردند. به آن مقاومت تسلیم دینامیکی هدف جامد می‌گفتند که مرتبط با جریان سیال است. آنها یافتند که $\phi_t \approx 1.89$ یا $\phi_t \approx 3/9$ برابر مقاومت تسلیم آلومینیوم 7075-T6 (0.45 GPa) است؛ اما آنها بیان کردند که ϕ_t باید به‌صورت تابعی از سرعت ضربه نوشته شود تا عمق نفوذ را دوباره نشان دهد. اصلاح‌های تئوری هیدرودینامیک در مورد پرتابه‌های نسبتاً ضعیف به‌کاربرده شد. فرض بر این است که پرتابه به‌طور کامل مصرف شود و هیچ ماده‌ای از پرتابه در انتهای کانال نفوذ باقی نماند. این

پاگ^۱ و تیلور^۲ تکامل یافت [۲۱]. هیل^۳، مات^۴ و پگ^۵ نیز به-طور مستقل در انگلستان روی این موضوع کار کردند و به نتایج مشابهی دست یافتند. معادله اصلی از بقای مومنتوم با این فرض به دست می‌آید که مقاومت و ویسکوزیته مواد تشکیل‌دهنده هدف و نفوذکننده نادیده گرفته شوند. با این فرضیه‌ها، معادله به‌وسیله علم هیدرودینامیک قابل حل است. بنابراین معادله مومنتوم این‌گونه است:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla(v^2) - v \times (\nabla \times v) = -\frac{1}{\rho} \nabla P_r \quad (6)$$

∇ بردار گرادیان است. ترم سمت راست معادله (۶) با فرض غیرقابل تراکم بودن مواد تشکیل‌دهنده هدف و جریان سریع از $\nabla(P_r/\rho)$ به‌دست‌آمده است. فرض می‌شود که جریان با سرعت ثابت v حرکت می‌کند و سرعت نفوذ، u نیز ثابت است، بنابراین نقطه تقابل پرتابه-هدف حرکت نمی‌کند. معادله مومنتوم، معادله (۶)، با فرض هیدرودینامیک و غیرقابل تراکم بودن مواد تحت شرایط پایدار به شکل رابطه (۷) می‌شود:

$$[v \times (\nabla \times v)] = \nabla \left(\frac{1}{2} v^2 + \frac{p_r}{\rho} \right) \quad (7)$$

اگر دو طرف معادله (۷) را در بردار v ضرب داخلی کنیم:

$$v \cdot \nabla \left(\frac{1}{2} v^2 + \frac{p_r}{\rho} \right) = 0 \quad (8)$$

$[v \times (\nabla \times v)]$ عمود بر بردار v است؛ بنابراین گرادیان ترم داخل پرانتز معادله (۸) عمود بر بردار v است که نتیجه ضرب داخلی دو بردار عمود برهم صفر هست. ترم داخل پرانتز معمولاً معادله برنولی^۶ نامیده می‌شود. هنگامی که واحدهای ترم داخل پرانتز در معادله (۸) واحدهایی از انرژی مخصوص باشند، معادله (۸) از معادله مومنتوم به دست می‌آید.

در طول خط مرکزی پرتابه-هدف معادله (۸) می‌شود:

$$\left(\frac{1}{2} v^2 + \frac{p_r}{\rho} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + P_r \right) = 0 \quad (9)$$

از معادله (۹) از پشت پرتابه تا نقطه تقابل پرتابه-هدف و از نقطه تقابل پرتابه-هدف تا هدف انتگرال‌گیری می‌شود. فشار در پشت پرتابه صفر است و هدف به‌صورت نیمه بی-

¹ Pugh

² Taylor

³ Hill

⁴ Mott

⁵ Pack

⁶ Bernoulli

⁷ Eichelberger

⁸ Copper

⁹ Allen

¹⁰ Rogers

نویسندگان ضربه را در سرعت‌های مهمات^۵ بررسی کردند که پرتابه سالم باقی‌می‌ماند. اگرچه پرتابه می‌تواند کمی تغییر شکل دهد (قارچی شکل). در مشاهده‌های تجربی برای ضربه‌ها به صفحه‌های نازک، یک‌تکه^۶ از هدف جدا شده و به پرتابه متصل می‌شود. با به‌کارگیری بقای مومنتوم داریم:

$$M_p V = (M_p + m_p) V_r \quad (12)$$

که M و m به ترتیب جرم‌های پرتابه و تکه‌ی جدا شده از هدف است. بدین ترتیب، استفاده از بقای انرژی می‌دهد:

$$M_p V^2 = \frac{1}{2} (M_p + m_p) V_r^2 + W_s + E_d \quad (13)$$

W_s ، انرژی است که استفاده می‌شود تا تکه‌ای از هدف جدا شود و E_d ، انرژی مرتبط با تغییر شکل و گرم شدن (کار پلاستیک) است. E_d به‌طور ساده اختلاف بین انرژی‌های جنبشی اولیه و نهایی است، که با استفاده از معادله‌ی (۱۲) داریم:

$$E_d = \frac{1}{2} \left(\frac{m_p}{M_p + m_p} \right) M_p V^2 \quad (14)$$

انرژی از دست‌رفته ناشی از جدا شدن تکه‌ای از هدف در معادله (۱۳)، با یافتن سرعت حداقل تخمین زده می‌شود که یک سرعت باقی‌مانده‌ی صفر را می‌دهد. این سرعت حداقل V_{50} است. با $V_r = 0$ و جایگذاری کردن معادله‌ی (۱۴) در معادله‌ی (۱۳) انرژی جدا شدن تکه‌ای از هدف به روش زیر محاسبه می‌شود:

$$W_s = \frac{1}{2} \left(\frac{M_p}{M_p + m_p} \right) M_p V_{50}^2 \quad (15)$$

جایگذاری کردن معادله‌های (۱۴) و (۱۵) در معادله‌ی (۱۳) و حل کردن آن، مقدار سرعت باقی‌مانده به‌صورت (۱۶) بدست می‌آید:

$$V_r = \left(\frac{M_p}{M_p + m_p} \right) (V^2 - V_{50}^2)^{1/2} \quad (16)$$

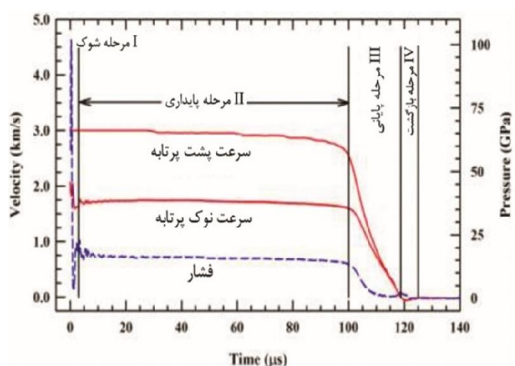
مدل تیت-الکسویسکی:

نفوذ سایشی:

در مقابل جریان‌های خرج‌گود، پرتابه‌ها (میل‌ها) حین نفوذ به هدف از سرعتشان کاسته می‌شود. تیت [۲۶] و الکسویسکی

فرض فقط در مورد ضربه‌های با سرعت‌بالا و یا پرتابه‌های ضعیف صدق می‌کند.

کریستمن^۱ و گهرینگ^۲ [۲۴] برای نفوذ با سرعت‌بالا، ۴ مرحله در نظر گرفتند: (۱) مرحله انتقالی (۲) مرحله اولیه (۳) مرحله ثانویه (۴) مرحله استرداد^۳. هرچند که این تفکر درست بود، اما شکل اصلی آنها خیلی تحریف شده بود. این مراحل نفوذ برای پرتابه‌ای از جنس آلیاژ تنگستن با $L/D = 20$ به داخل هدفی فولادی در سرعت ۳ کیلومتر بر ثانیه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- مراحل نفوذ برای یک پرتابه با $L/D = 20$ در سرعت ضربه 3 Km/s [۲۴]

۲-۴- بقای انرژی و مدل مومنتوم

مدل رچت-ایپسون:

تا اینجا، در مدل‌های ارائه شده اهداف را به‌صورت نیمه بی-نهایت در نظر می‌گرفتند، هرچند که فرضیه‌هایی توسط محققین زیادی برای استفاده از این مدل‌ها برای محاسبه اهداف ضخیم بی-نهایت به کار گرفته می‌شد. رچت-ایپسون مدلی را ایجاد کردند که سرعت باقی‌مانده‌ی پرتابه‌های کوتاه^۴ ($L/D \sim 1$) را که به صفحه‌های نسبتاً نازک ضربه می‌زند با استفاده از بقای انرژی و مومنتوم تخمین بزنند [۲۵].

¹ Christman

² Gehring

³ recovery

⁴ Chunky

⁵ Ordnance Velocities

⁶ plug

$$v_c = \left[\frac{2(R_t - Y_p)}{\rho_p} \right]^{1/2} \quad (22)$$

وقتی سرعت میله تا حد سرعت بحرانی افت می‌کند، نفوذ بیش‌تری اتفاق نمی‌افتد. روش‌هایی برای تخمین Y_p و R_t بعد از دو بخش زیر بیان می‌شوند.

نفوذ جسم صلب و انتقال از جسم صلب به نفوذ سایشی:
در قسمت قبلی، $R_t > Y_p$ و سایش میله را داریم. تیت حالتی را آزمایش و بررسی کرد که $Y_p > R_t$ باشد [۲۸]. در این حالت یک سرعت انتقالی، v_{tr} ، وجود دارد. میله سایش زیادی نداشته یا به عبارت دیگر نفوذ در حالت جسم صلب اتفاق می‌افتد. برای نفوذ جسم صلب، $u = v$ است. سرعت انتقالی از معادله (۲۱a) با جایگزین کردن $u = v = v_{tr}$ به دست می‌آید:

$$v_{tr} = \left[\frac{2(Y_p - R_t)}{\rho_t} \right]^{1/2} \quad (23)$$

بنابراین کاهش سرعت به صورت رابطه (۲۴) است:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho_p L} \left(\frac{1}{2} \rho_t v^2 + R_t \right) \quad (24)$$

معادله (۲۴) یک فرم مشابه معادله (۲)، معادله پانسلیت است که $a = R_t$ و $b = \rho_t/2$. بنابراین معادله (۴) به صورت (۲۵) بازنویسی می‌شود:

$$\frac{P}{L} = \frac{\rho_p}{\rho_t} \ln \left(1 + \frac{\rho_t V^2}{2R_t} \right) \quad (25)$$

نفوذ بی‌بعد شده در مقایسه با سرعت ضربه در شکل ۴ برای پرتابه‌ای از جنس فولاد (7.9 g/cm) و یک هدف آلومینیومی (2.7 g/cm) نشان داده شده است. فرض‌های مختلفی برای ترکیب‌های $Y_p - R_t$ در این شکل نشان داده شده است. از آنجایی که در تمام مثال‌های نشان داده شده $Y_p > R_t$ است، نفوذ در سرعت‌های پایین ضربه، در حالت جسم صلب است. علامت \times در شکل ۴، سرعت انتقالی از نفوذ جسم صلب به نفوذ سایشی را نشان می‌دهد.

تخمین مقادیر Y_p و R_t :

تیت دریافت که برای مفید بودن مدل هیدرودینامیک اصلاح‌شده، نیازمند یک روش جهت تعیین مقادیر R_t و Y_p هست. دو مقاله تلاش‌های او را خلاصه کردند [۲۹ و ۳۰].

[۲۷] به‌طور مستقل و جداگانه معادله برنولی اصلاح شده را پیشنهاد دادند:

$$\frac{1}{2} \rho_p (v - u)^2 + Y_p = \frac{1}{2} \rho_t u^2 + R_t \quad (17)$$

مقدار Y_p برابر تنش تسلیم دینامیکی پرتابه و R_t مقدار مقاومت هدف در مقابل نفوذ است. با جدا کردن قسمت صلب میله از قسمتی که تحت تغییر شکل پلاستیک (فارچی شکل شدن) قرار می‌گیرد، نیرویی که سبب کاهش سرعت قسمت صلب میله به طول l می‌شود برابر است با:

$$\rho_p l \pi R_p^2 \frac{dv}{dt} = -\pi R_p^2 Y_p \quad (18)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{Y_p}{\rho_p l} \quad (19)$$

طول اولیه میله L است، اما از آنجایی که قسمت صلب میله سریع‌تر از سرعت نفوذ حرکت می‌کند، میله طی زمان کوتاه‌تر می‌شود:

$$\frac{dl}{dt} = -(v - u) \quad (20)$$

بنابراین با حل هم‌زمان سه معادله (۱۷)، (۱۹) و (۲۰) می‌توان مقادیر v ، u و l را تخمین زد. با مرتب‌سازی معادله (۱۷) برای به دست آوردن سرعت نفوذ لحظه‌ای در ترم‌های سرعت پرتابه (که با زمان تغییر می‌کند) و تعیین خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده هدف و پرتابه داریم:

$$u = \frac{v - \mu(v^2 + A)^{1/2}}{1 - \mu^2}$$

$$\rho_p \neq \rho_t$$

$$\mu = \left(\frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^{1/2} \quad (21a)$$

$$A = \frac{2(R_t - Y_p)(1 - \mu^2)}{\rho_t}$$

$$u = \frac{v}{2} - \frac{(R_t - Y_p)}{\rho v}$$

$$\rho_p = \rho_t = \rho \quad (21b)$$

به دست آوردن u در معادله (۱۱) توسط معادله (۲۱) با قرار دادن $Y_p = 0$ و جایگزین کردن Σ به جای R_t داده شده است.

از معادله (۲۱) مشخص می‌شود که سرعت بحرانی، v_c ، با قرار دادن $u = 0$ به دست می‌آید:

که $\lambda = 0.7$ یک مقدار مناسب برای در نظر گرفتن تأثیرهای دینامیکی است [۳۰].

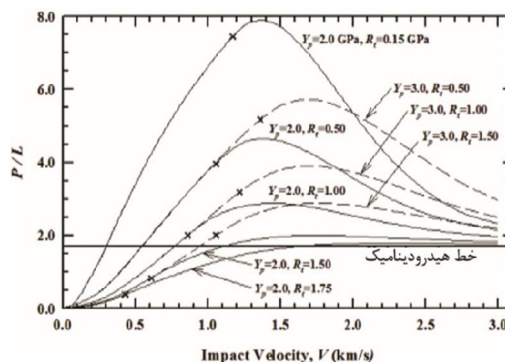
جدول ۱- راه‌حل انبساط حفره شبه استاتیکی

استوانه	
غیرقابل تراکم	$R_t = \frac{2\sigma_{yt}}{3} \left[1 + \ln \left(\frac{\sqrt{3}E_t}{2(1+v_t)\sigma_{yt}} \right) \right]$
قابل تراکم	$R_t = \frac{2\sigma_{yt}}{3} \left[1 + \ln \left(\frac{\sqrt{3}E_t}{3\sigma_{yt}} \right) \right]$
قابل تراکم	$R_t = \frac{\sigma_{yt}}{\sqrt{3}} \left[1 + \ln \left(\frac{\sqrt{3}E_t}{6(1+v_t)\sigma_{yt}} \right) \right]$
مدل	$R_t = \sigma_{yt} \left[\frac{2}{3} + \ln \left(\frac{2E_t}{(4-e^{-\lambda})\sigma_{yt}} \right) \right]$
سولنوئید	$\lambda = 0.7 \Rightarrow$
تیت	$R_t = \sigma_{yt} \left[\frac{2}{3} + \ln \left(\frac{0.57E_t}{\sigma_{yt}} \right) \right]$

یک مشکل این است که R_t ویژگی ماده نیست، اما به ویژگی‌های ماده وابسته است. اندرسون، لیتفیلد^۲ و والکر [۳۲] نشان دادند که R_t به سرعت ضربه بستگی دارد. آلن و راگرز هم نشان دادند که ϕ_t یک تابع از سرعت ضربه است [۲۳].

جهت حرکت پرتابه روی عمق نفوذ تأثیرگذار است. این امر به خوبی مشخص است که چرخش حول محور عمودی و چرخش حول محور عرضی می‌توانند به‌طور چشم‌گیری پاسخ نفوذ را تحت تأثیر قرار دهند که با مایل بودن هدف تقویت می‌شود، همان‌طور که توسط اندرسون، بهنر^۳ و هوهرل^۴ انجام شده است [۳۳].

روبین^۵ و همکاران [۳۴]، مدلی را برای نیروی مقاوم با استفاده از مواردی ارائه کردند که معتقد بودند میدان جریان در هدف را واقعی‌تر می‌کند. آنها دریافتند که کمتر از سرعت بحرانی ضربه، نیرو ثابت است که به آن سرعت جداسازی V_s می‌گفتند. از آنجایی که نیرو ثابت است، پس شتاب نیز ثابت است. آنها نیروی مقاومی را به دست آوردند که از نیروی مقاوم به‌دست‌آمده از انبساط حفره بزرگ‌تر بود؛ بنابراین



شکل ۴- نفوذ بی‌بعد در مقابل سرعت ضربه برای ترکیب‌های مختلف $R_t - Y_p$ برای یک پرتابه فولادی در هدف آلومینیومی [۲۸]

Y_p با کاهش سرعت مرتبط است و از تنش تسلیم، σ_{yp} به دست می‌آید:

$$Y_p = (1 + \lambda)\sigma_{yp} \quad (26)$$

که λ یک مقدار ثابت و مستقل از سرعت است و به‌عنوان اثرهای دینامیکی ماده در نظر گرفته می‌شود.

R_t مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک جریان هدف هست. روش‌های مختلفی برای تخمین مقدار R_t پیشنهاد شده است. به‌طور مخصوص، تئوری انبساط حفره مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۱]. این دیدگاه یک منطقه متراکم و غیرقابل تراکم پلاستیک و یک منطقه الاستیک را برای مواد فرض می‌کند. یک حفره از قطر صفر تا R ، به‌صورت شبه استاتیکی باز می‌شود. یک راه‌حل مشابه نیز به دست آمد؛ راه‌حل به سمت مناطق پلاستیک و الاستیک می‌رود و اجازه می‌دهد تا محاسبه تنش در نقطه تقابل آن‌ها انجام شود. انبساط حفره کروی و یا استوانه‌ای فرض می‌شود. راه‌حل‌های مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است. اگر ماده غیرقابل تراکم فرض شود، $v = 0.5$ که در جدول نیز نشان داده شده است.

تیت انبساط حفره را روی منطقه تسلیم انجام داد که الهام گرفته از خطوط جریان مغناطیسی در سولنوئید^۱ است. تأکید می‌شود که این راه‌حل وابسته به مقدار λ در معادله (۲۹) است. بعد از تحلیل داده‌های تجربی، تیت تخمین زد

² Littlefield

³ Behner

⁴ Hohler

⁵ Rubin

¹ Solenoid

برخی اصلاحات است. آن‌ها یک عدد بی‌بعد مشابه عدد بی‌بعد نوریک برای ورق‌های تک لایه تحت بار انفجاری یکنواخت ارائه کردند که در آن نسبت طول به عرض ورق نیز اضافه شده بود [۴۵]. از مهم‌ترین مشکلات مدل‌های اعداد بی‌بعد ارائه‌شده، می‌توان به عدم وجود پارامترهای چگالی ماده، نرخ کرنش، ایمپالس و فاصله استقرار از خرج اشاره کرد [۴۶]. در زمینه نفوذ پرتابه در اهداف تک لایه و چندلایه فلزی با مدل‌های اعداد بی‌بعد، مدل مستوفی و همکارانش است. آنها در سال ۲۰۱۷ به ارائه یک مدل بی‌بعد از پیش‌بینی تغییر شکل‌ها در اهداف فلزی در اثر برخورد یک پرتابه کروی پرداختند. آنها مدل‌های تجربی زیر را برای اهداف یک‌لایه و چندلایه ارائه کردند [۴۷]:

$$\left(\frac{W_0}{H}\right) = 0.01 \left(\frac{LB}{Hd}\right)^{1.69} \left(\frac{\rho V_0^2}{\sigma_0}\right)^{0.644} \left(\frac{1}{\eta}\right)^{0.646} \quad (27)$$

$$\left(\frac{W_0}{H}\right) = 0.033 \left(\frac{LB}{Hd}\right)^{1.4} \left(\frac{\rho_{eq} V_0^2}{\sigma_{eq}}\right)^{0.619} \left(\frac{1}{\eta_{eq}}\right)^{0.621} \quad (28)$$

$$\eta = \left(\frac{V_0 H}{3\sqrt{2}BLD}\right)^{\frac{1}{q}} \quad (29)$$

که در این روابط W_0 خیز هدف، H ضخامت هدف، L نصف طول هدف، B نصف عرض هدف، d قطر پرتابه، σ تنش تسلیم ماده، ρ چگالی ماده، q ضریب ثابت و V_0 سرعت برخورد است.

۳- نفوذ در سرامیک

۳-۱- مراحل نفوذ

ویلکینز [۷] و ریجر^۱ [۴۸] مراحل مختلفی را برای ضربه پرتابه به داخل زره سرامیکی با صفحه پشتیبان فلزی نازک با آزمایش طراحی کردند (شکل ۵).

مرحله ۱: احتمالاً ۸-۶ میکروثانیه طول می‌کشد. طی این مرحله، از آنجایی که سرامیک بسیار سخت‌تر از پرتابه است، به‌طور مؤثری غیرقابل نفوذ است. نوک پرتابه خرد شده و از بین می‌رود و یا به یک‌شکل قارچی با نوک تخت تغییر شکل می‌دهد. موج شوک به دنبال پیشروی شکست پایدار قسمت

مراجع [۳۴ و ۳۵] اظهار داشتند که راه‌حل‌های انبساط حفره یک‌بعدی در حالت استوانه‌ای و کروی، به‌خوبی میدان جریان دوبعدی اطراف پرتابه نفوذکننده را نشان نمی‌دهد؛ بنابراین راه‌حل‌های انبساط حفره مقداری را برای تنش مقاوم پیش‌بینی می‌کنند که بسیار پایین است؛ در نتیجه، آنها دریافتند که وارن نیاز دارد تا اینرسی هدف را در نظر بگیرد تا با افزایش سرعت ضربه، تنش مقاوم نیز افزایش یابد.

وارن پاسخ داد که نظر هیل در مورد پرتابه که با سرعت ثابت حرکت می‌کند، درست نیست؛ زیرا پرتابه به خاطر مقاومت هدف کاهش سرعت پیدا می‌کند؛ به‌علاوه، بخش ۴ از مقاله هیل اظهار می‌کند که: "اگر سرعت پرتابه ثابت نباشد، کاهش سرعت پرتابه در اثر مقاومت هدف خواهد بود" [۳۶]. سپس وارن با استفاده از داده‌های تجربی نشان داد که (با یک ناحیه به شکل تونل که قطری مشابه پرتابه داشت و حفره وجود نداشت) کاهش سرعت ثابت نیست. وارن نتیجه گرفت که "زمانی که ترم مقاومت هدف بر ترم اینرسی آن غلبه کند، ترم اینرسی هدف می‌تواند در مدل نفوذ نادیده گرفته شود. با این حال، در صورتی که ترم مقاومت بر ترم اینرسی هدف غلبه نکند، باید ترم اینرسی هدف در نظر گرفته شود" [۳۷].

۲-۴- مدل اعداد بی‌بعد

مدل‌های اعداد بی‌بعد ابتدا برای رفتار صفحه‌های تحت تغییر شکل‌های زیاد مورد استفاده قرار گرفتند [۳۸-۴۲]. در سال ۲۰۰۰، لی و جونز یک مدل بی‌بعد، برای پیش‌بینی رفتارهای دینامیکی و شکست ساختارهای مختلف ارائه کردند. آنها، اثرهای نرخ کرنش، کار سختی، تغییرات دما، شکل پالس بارگذاری و جرم ضربه‌زننده را در مدل خود در نظر گرفتند؛ همچنین از شکست برشی به‌عنوان یک عبارت بی‌بعد، در تحلیل استفاده کردند [۴۳]. در سال ۲۰۰۴، ژاکوب و همکارانش با استفاده از نتایج تجربی کارهای خود، موفق به ارائه یک عدد بی‌بعد برای پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ورق‌های چهارگوش تحت بارگذاری غیریکنواخت شدند که پیش‌ازین تنها برای ورق‌هایی به شکل دایره‌ای مطرح شده بود [۴۴]. در سال ۲۰۰۶، پارک و چو ادعا کردند که اعداد بی‌بعد ارائه‌شده توسط جونز و نوریک ناقص بوده و نیازمند

¹ Reijer

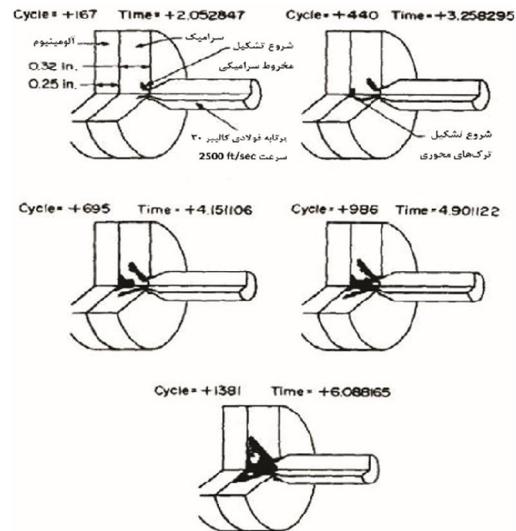
تا شکست است. این امر مرحله ۱ را برای چند میکروثانیه طولانی می‌کند و مرحله ۳ و ۴ را به تعویق می‌اندازد. وودوارد^۲ [۴۹] یک مدل تحلیلی تک‌بعدی را ایجاد کرد که این تقابل‌ها را توصیف می‌کند و یک توافق کیفی با آزمایش‌ها به دست می‌دهد.

۳-۲- مخروط‌های شکست

فلزها یک حفره تشکیل می‌دهند، درحالی‌که سرامیک‌ها به حالت مخروطی می‌شکنند و بار را در منطقه‌ای بزرگ‌تر از منطقه برخورد پخش می‌کنند. با این حال در سرعت‌های ضربه جریان‌های سریع خرج گود که فشار شوک در مقایسه با مقاومت مواد کوچک است، سرامیک‌ها نیز تشکیل حفره می‌دهند. در این منطقه صدمه‌دیده مخروطی، شکل نوک پرتابه دیده می‌شود. این امر مشخصه شیارهای دندان‌دار شبه استاتیک و ضربه دینامیک پرتابه‌های با نوک گرد روی مواد ترد هست که به وسیله ترک‌هایی نشان داده می‌شود که تمایل دارند تا مسیرهای با حداکثر تنش کششی را دنبال کنند، [۵۰].

۳-۳- مدل‌های نفوذ در اهداف ترکیبی سرامیک-فلز در سال ۱۹۶۷، فلورنس و اهرنز [۵۱]، تقابل بین پرتابه و زره‌های کامپوزیتی را مورد بررسی قرار داد. آنها کار خود را در دو حوزه تحلیلی و تجربی انجام دادند. تمرکز فلورنس و اهرنز روی مکانیسم تقابل بین پرتابه سخت (فولاد) و سطح هدف (سرامیک با لایه پشتیبان نرم) بود. او آنالیز تحلیلی خود را بر اساس تئوری الاستیسیته، جهت تخمین میدان تنش در سطح هدف در طی مراحل اولیه ضربه و همچنین تعیین تغییر شکل‌ها و ممان‌های خمشی در طی مراحل بعدی، انجام داد. در سال ۱۹۶۷، تیت [۲۶]، نظریه‌ای برای کاهش سرعت میله‌های بلند بعد از ضربه ارائه داد. او از تئوری هیدرودینامیکی اصلاح‌شده استفاده کرد که در آن بعضی از اثرهای مقاومت مواد برای پیش‌بینی کاهش سرعت میله‌های بلند در نظر گرفته شده است. در سال ۱۹۷۸، ویلکینز [۶]، بیان کرد که در اثر برخورد پرتابه به هدف مکانیسم‌های تغییر شکل مختلفی اتفاق می‌افتد. او این تغییر شکل‌ها را به وسیله

جلو به داخل سرامیک وارد و به آن دوره "سکون" گفته می‌شود.



شکل ۵- محاسبه توسعه مخروط شکست در زره‌های کامپوزیتی با سطح آلومینا [۶]

مرحله ۲: زمانی که مخروطی از سرامیک زیر پرتابه خرد می‌شود، پرتابه می‌تواند شروع به پیشرفت داخل سرامیک کند و حین نفوذ ساییده شود. هرچه پرتابه به داخل سرامیک پیشرفت کند، مخروط سرامیکی که تحت بار قرار دارد، از نظر اندازه کوچک‌تر می‌شود، بنابراین ماده صفحه پشتیبان در مرکز منطقه ضربه تحت تنش بیش‌تری قرار می‌گیرد (کاهش سطح مقطع تحت بار یکسان). بعلاوه سرامیک خرد و محصور نشده نسبت به سرامیک سالم ۵-۲٪ حجم بیشتری را اشغال می‌کند. پودر سرامیک فشار بیشتری را به مواد اطراف وارد می‌کند (حجیم شدن).

مرحله ۳: صفحه پشتیبان در اثر فشار حجیم شدن شروع به خم شدن می‌کند.

مرحله ۴: اگر کرنش برشی بحرانی تجاوز کند، صفحه پشتیبان با تشکیل پلاگ از بین می‌رود. معمولاً تلاش‌ها بر خواص صفحه پشتیبان متمرکز هستند. این تلاش‌ها شامل، بهبود بخشیدن به سختی خمشی و به حداکثر رساندن کرنش

² Woodward

¹ Dwell

شبیه‌سازی عددی و مقایسه با نتایج تجربی نشان داد. در همین سال، بکمن و گلداسمیث [۱]، در رابطه با بخش پایانی حرکت پرتابه و برخورد به هدف و مکانیک نفوذ در نقطه تقابل پرتابه و هدف نظریه‌ای ارائه کرد. آنها یک دسته‌بندی از اهداف به‌صورت نیمه‌بینهایت، ضخیم، متوسط و نازک انجام دادند. بکمن و گلداسمیث نفوذ کامل و کمانه کردن را بیان کردند. در سال ۱۹۸۸، روزنبرگ و یشورون [۵۲]، رابطه بین اثرهای بالستیک و مقاومت فشاری اهداف سرامیکی را بررسی کردند. آنها در آزمایش‌های خود از یک صفحه پشتیبان ضخیم استفاده کردند که یک روش تجربی جدید برای محاسبه اثرهای بالستیک سرامیک است. آنها نشان دادند که همراه با افزایش پارامتر مقاومت مؤثر که از تقسیم مقاومت فشاری دینامیکی و استاتیکی بر چگالی سرامیک بدست می‌آید، اثرهای بالستیک سرامیک نیز افزایش می‌یابد. در سال ۱۹۹۰، وود وارد [۴۹]، توسعه ساده‌ای از مدل‌های مربوط به نفوذ کامل در اهداف زرهی کامپوزیتی سرامیک انجام داد. او فرآیندهای فیزیکی ضروری را مشخص و وابستگی مقاومت بالستیک روی خواص فیزیکی و پارامترهای ضربه را بیان کرد.

وود وارد، مهم‌ترین ویژگی‌های شکست زره سرامیک کامپوزیت را با انباشت جرم ترکیب کرد تا به‌شتاب مواد مربوط شود، بدین ترتیب منجر به تولید مدل‌های ساده‌ای شد که اجازه محاسبات روی اهداف سرامیکی با پشتیبان‌های فلزی نازک و ضخیم را می‌دهد. در سال ۱۹۹۱، دن ریجر [۴۸]، در پایان‌نامه خود توسعه مستقلی از آنالیزهای راوید و همکاران و وود وارد انجام داد. اساس کار او بر مبنای جرم انباشته بود. در سال ۱۹۹۷، زائرا و گالوز [۵۳]، یک مدل تحلیلی از ضربه بالستیک قائم و مایل روی زره‌های سبک سرامیک - فلز ارائه کردند. این مدل بر اساس معادله الکسیوسکی و تیت برای نفوذ پرتابه به داخل سرامیک است؛ درحالی‌که حل مربوط به فلز پشتیبان بر اساس ایده مدل‌های وود وارد و دن ریجر است. مدل آنها، نفوذ در سرامیک را با دقت خوبی نشان می‌دهد. در سال ۱۹۹۸، چوکرون و گالوز [۵۴]، یک مدل کاملاً تحلیلی و خیلی ساده یک‌بعدی از ضربه بالستیک به داخل اهداف زرهی سرامیک-کامپوزیت ارائه کردند. این مدل، هم به‌وسیله آزمایش‌های بالستیک و هم شبیه‌سازی عددی مورد ارزیابی قرار گرفت و تطبیق خوبی را نشان داده است. این مدل امکان محاسبه سرعت

باقیمانده، جرم باقیمانده، سرعت پرتابه، تغییر شکل و کرنش فلز پشتیبان را می‌دهد. توسعه این مدل بر اساس مطالعه‌ی ضربه در نخ، پارچه و در نهایت کامپوزیت است. در سال ۱۹۹۹، فلوز و بارتن [۵۵]، مدلی را جهت پیش‌بینی نفوذ پرتابه به داخل زره‌های نیمه بی‌نهایت سرامیکی ارائه کردند. این مدل مطالعه خواص مواد و تغییر شکل زره در اثر نفوذ را سهولت می‌بخشد.

بیشتر مدل‌هایی که بعد از سال ۲۰۰۰ ارائه شدند، مربوط به تغییر فرض‌های مدل‌های تحلیلی قبلی و بهبود تخمین عمق نفوذ، روش‌های جدید آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی است. در سال ۲۰۰۰، زائرا و همکارانش به بررسی اثرهای بالستیک چسب بین سرامیک و فلز در مقابل نفوذ پرداختند. آنها دو نوع چسب را با ضخامت‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی، تأثیر نوع و ضخامت چسب روی شکست سرامیک و تغییر شکل پشتیبان فلزی را در نظر گرفتند [۵۶]. در سال ۲۰۰۱، هوهر و همکارانش به مقایسه تجربی نفوذ مایل و قائم در اهداف ترکیبی سرامیک - فلز پرداختند [۵۷]. در سال ۲۰۰۴، فاووز و همکارانش به بررسی مدل‌های المان محدود نفوذ قائم و مایل در اهداف ترکیبی سرامیک - فلز پرداختند [۵۸]. در سال ۲۰۰۷، روزنبرگ و همکارانش به بررسی پدیده کمانش در برخورد پرتابه در اهداف فولادی پرداختند و مدلی تحلیلی را به دست آوردند، سپس با شبیه‌سازی عددی نیز، زاویه کمانش را تعیین کردند [۵۹]. در سال ۲۰۰۸، شکرپه و جوادپور به بررسی نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی سرامیک - کولار پرداختند. آنها سرعت حد بالستیک و ضخامت بهینه هدف را تعیین کردند [۵۵]. در سال ۲۰۱۳، ضیاء شمامی و همکاران به بررسی تجربی و عددی نفوذ پرتابه صلب سر تخت در سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که میزان جذب انرژی ساختار ساندویچی با افزایش چگالی و ضخامت فوم و افزایش سرعت برخورد بالا می‌رود [۶۱]. در سال ۲۰۱۴، هدایتیان و همکارانش به بررسی عددی و تجربی نفوذ پرتابه با سرعت بالا در کامپوزیت‌های مشبک استوانه‌ای پرداختند. آنها در شبیه‌سازی عددی خود از نرم‌افزار آباکوس استفاده کردند. آنها نمودارهای تغییرات سرعت و نیروی پرتابه، گسترده‌گی سطح خرابی و مکانیسم‌های مختلف شکست را به‌عنوان خروجی بیان کردند

شبیه‌سازی عددی و مقایسه با نتایج تجربی نشان داد. در همین سال، بکمن و گلداسمیث [۱]، در رابطه با بخش پایانی حرکت پرتابه و برخورد به هدف و مکانیک نفوذ در نقطه تقابل پرتابه و هدف نظریه‌ای ارائه کرد. آنها یک دسته‌بندی از اهداف به‌صورت نیمه‌بینهایت، ضخیم، متوسط و نازک انجام دادند. بکمن و گلداسمیث نفوذ کامل و کمانه کردن را بیان کردند. در سال ۱۹۸۸، روزنبرگ و یشورون [۵۲]، رابطه بین اثرهای بالستیک و مقاومت فشاری اهداف سرامیکی را بررسی کردند. آنها در آزمایش‌های خود از یک صفحه پشتیبان ضخیم استفاده کردند که یک روش تجربی جدید برای محاسبه اثرهای بالستیک سرامیک است. آنها نشان دادند که همراه با افزایش پارامتر مقاومت مؤثر که از تقسیم مقاومت فشاری دینامیکی و استاتیکی بر چگالی سرامیک بدست می‌آید، اثرهای بالستیک سرامیک نیز افزایش می‌یابد. در سال ۱۹۹۰، وود وارد [۴۹]، توسعه ساده‌ای از مدل‌های مربوط به نفوذ کامل در اهداف زرهی کامپوزیتی سرامیک انجام داد. او فرآیندهای فیزیکی ضروری را مشخص و وابستگی مقاومت بالستیک روی خواص فیزیکی و پارامترهای ضربه را بیان کرد.

وود وارد، مهم‌ترین ویژگی‌های شکست زره سرامیک کامپوزیت را با انباشت جرم ترکیب کرد تا به‌شتاب مواد مربوط شود، بدین ترتیب منجر به تولید مدل‌های ساده‌ای شد که اجازه محاسبات روی اهداف سرامیکی با پشتیبان‌های فلزی نازک و ضخیم را می‌دهد. در سال ۱۹۹۱، دن ریجر [۴۸]، در پایان‌نامه خود توسعه مستقلی از آنالیزهای راوید و همکاران و وود وارد انجام داد. اساس کار او بر مبنای جرم انباشته بود. در سال ۱۹۹۷، زائرا و گالوز [۵۳]، یک مدل تحلیلی از ضربه بالستیک قائم و مایل روی زره‌های سبک سرامیک - فلز ارائه کردند. این مدل بر اساس معادله الکسیوسکی و تیت برای نفوذ پرتابه به داخل سرامیک است؛ درحالی‌که حل مربوط به فلز پشتیبان بر اساس ایده مدل‌های وود وارد و دن ریجر است. مدل آنها، نفوذ در سرامیک را با دقت خوبی نشان می‌دهد. در سال ۱۹۹۸، چوکرون و گالوز [۵۴]، یک مدل کاملاً تحلیلی و خیلی ساده یک‌بعدی از ضربه بالستیک به داخل اهداف زرهی سرامیک-کامپوزیت ارائه کردند. این مدل، هم به‌وسیله آزمایش‌های بالستیک و هم شبیه‌سازی عددی مورد ارزیابی قرار گرفت و تطبیق خوبی را نشان داده است. این مدل امکان محاسبه سرعت

فادرل به بررسی خرابی گلوله در اهداف سوراخ‌دار فولادی با تغییر در شکل سوراخ پرداختند. آنها در آزمایش تجربی خود از سوراخ‌های بیضی و دایره‌ای استفاده کردند و میزان خرابی در گلوله‌های مختلف را در اثر برخورد به مراکز این سوراخ‌ها مقایسه نمودند [۷۰]. در سال ۲۰۱۹، سیاح و همکارانش نیز به بررسی تحلیلی نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی نیمه بی‌نهایت سرامیک - فلز پرداختند. آنها ضمن بررسی نفوذ در اهداف ترکیبی به ارائه یک مدل اصلاحی برای پیش‌بینی عمق نفوذ در این اهداف نیز پرداختند [۷۱].

۴- جمع‌بندی

در این مقاله مدل‌های تحلیلی نفوذ برای اهداف فلزی در کنار مدل‌های اعداد بی‌بعد و مدل‌های تجربی و عددی برای اهداف ترکیبی مرور شد. گستره مدل‌ها در کاربرد از سرعت‌های ضربه، تقریباً پایین (نفوذ جسم صلب) تا سرعت‌های ضربه بسیار بالا (تقریباً هیدرودینامیک) بود. مشاهده شد که قدیمی‌ترین این مدل‌ها، مدل معادله پانسلت بود، معادله (۱) که ذاتاً از مدل تیت بیرون می‌آید. معادله پانسلت نیرویی است که با ترم استاتیک و ترم مربع سرعت متناسب است؛ همچنین از محاسبه نیروی کاهنده سرعت در پرتابه با استفاده از انبساط حفره دینامیکی به دست می‌آید. مشاهده شد که وقتی مدل‌ها بر اساس بقای مومنتوم باشند، مثل مدل تیت و مدل والکر - اندرسون، تمایل دارند تا در یک گستره‌ی وسیع از جنس مواد و سرعت‌های ضربه بالا و کاربردی باشند. مدل‌هایی که بر اساس بقای انرژی است، معمولاً محدودیت‌های کاربرد دارند؛ چراکه اتلاف انرژی با مواد و سرعت ضربه تغییر می‌کند.

هدف تمام این مدل‌های تحلیلی تکرار کردن داده‌های تجربی با استفاده از خواص واقعی مواد است؛ درحالی‌که فاکتورهای تجربی به حداقل برسد. کشف کاربرد و صحت مدل‌ها منجر به فهم خوبی از محدودیت‌ها می‌شود.

به‌منظور بهبود مدل‌های تحلیلی در اهداف فلزی و ترکیبی نیاز است تا موارد زیر در نظر گرفته شوند:

- توسعه قواعد منطقی برای تعیین پارامترهای مدل‌سازی. پارامترهای مدل باید قبل از هر اقدامی تعیین شوند و نباید از داده‌های تجربی استفاده

[۶۲]. در سال ۲۰۱۵، راشد و یزدانی به بررسی عملکرد زره چندلایه سرامیک - اپوکسی، در برابر سرعت‌بالا به روش اجزای محدود پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که با تعیین ضخامت مناسب حداقل برای سرامیک می‌توان یک هدف چندلایه به‌جای یک‌لایه استفاده کرد و نتایج بالستیک بهتری دست یافت [۶۳]. در سال ۲۰۱۵، لیاقت و همکارانش به اصلاح مدل تحلیلی وودوارد در اهداف سرامیک - فلز پرداختند. آنها اصلاحاتی از جمله تغییر نیم زاویه شکست مخروط سرامیکی، سایش، قارچی شدن و صلبیت پرتابه و همچنین تغییرات مقاومت فشاری سرامیک در طول فرایند نفوذ تحت عنوان خرابی را در نظر گرفتند [۶۴]. در سال ۲۰۱۵، لیاقت و همکارانش به بررسی تأثیر شکل دماغه پرتابه‌های استوانه‌ای متقارن محوری و همچنین سرعت اولیه آنها بر عملکرد بالستیکی کامپوزیت چندلایه شیشه/ اپوکسی با الیاف بافته‌شده، به‌صورت تجربی پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که بهترین عملکرد بالستیکی را پرتابه اجیوال با شعاع کالیبر ۲/۵ و بدترین عملکرد بالستیکی را پرتابه با دماغه تخت ارائه می‌کند [۶۵]. در سال ۲۰۱۶، لیاقت و همکارانش به بررسی تحلیلی و تجربی ضربه سرعت‌بالا در اهداف ترکیبی سرامیک - نانو کامپوزیت پرداختند. آنها از تئوری انبساط حفره استفاده و زاویه تشکیل مخروط سرامیکی را نیز اصلاح کردند. مدل تحلیلی آنها به‌خوبی فرآیند نفوذ را پیش‌بینی کرده بود [۶۶]. در سال ۲۰۱۶، لیاقت و همکارانش به بررسی تجربی و عددی ضربه روی ورق‌های فولادی انحنادار پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش شعاع انحنای ورق، مقدار حداکثر تغییر شکل ماندگار کاهش یافته ولی شتاب برخورد افزایش می‌یابد [۶۷]. در سال ۲۰۱۷، نی و همکارانش به بررسی نفوذ در اهداف ترکیبی سرامیکی پرداختند. آنها به دنبال ایجاد شرایطی برای نفوذ مایل پرتابه در هدف بودند؛ بنابراین در ساخت هدف از هرم‌های سرامیکی در سازه‌های فولادی به‌صورت مایل استفاده کردند. با ساخت این هدف ضمن نفوذ مایل، مقدار عمق نفوذ نیز کاهش پیدا کرد [۶۸]. در سال ۲۰۱۷، کلیک و همکارانش به بهینه‌سازی هدف سوراخ‌داری پرداختند که قبلاً ارائه کرده بودند. آنها پارامترهای از جمله فاصله هوایی بین دو لایه، قطر سوراخ و فاصله بین مراکز سوراخ‌ها را در این بهینه‌سازی در نظر گرفتند [۶۹]. در سال ۲۰۱۸، فراس و

- ملاک‌های شکست. پیش‌بینی شکست یک مشکل واقعاً سخت است. در حال حاضر پیش‌بینی‌های صحیح برای انتقال از جسم صلب به نفوذ سایشی حل نشده است که بستگی به خواص مواد تشکیل‌دهنده پرتابه، شکل نوک پرتابه و مقاومت هدف دارد. حوزه‌ی دیگری از شک و تردید، شکست هدف است که بستگی به مواد تشکیل‌دهنده هدف و موقعیت‌های بارگذاری دارد؛ بنابراین، پیش‌بینی اولیه شکست (چه پرتابه باشد چه هدف)، اگر غیرممکن نباشد، بسیار مشکل است. این در مورد شبیه‌سازی‌های عددی نیز درست است. شاید همیشه استفاده از نتایج تجربی جهت تنظیم کردن یک مدل برای پیش‌بینی‌های صحیح و دقیق نیاز است.

۵- مراجع

- [1] Backman ME, Goldsmith W (1978) The mechanics of penetration of projectiles into targets. *Int J Eng Sci* 16(1): 1-100.
- [2] Jonas GH, Zukas JA (1978) Mechanics of penetration: analysis and experiment. *Int J Engng Sci* 16(11): 879-904.
- [3] Anderson CE, Bodner SR (1988) Ballistic impact: the status of analytical and numerical modeling. *Int J Impact Engng* 7(1): 9-35.
- [4] Goldsmith W (1999) Non-ideal projectile impact on targets. *Int J Impact Engng* 22(2-3): 95-395.
- [5] Ruh R, Stiglich JJ, Rankin DT (1971) Current and potential opaque ceramic armor materials. *SAMPE Q* 2: 46-50.
- [6] Wilkins ML (1978) Mechanics of penetration and perforation. *Int J Eng Sci* 16: 793-807.
- [7] Anderson CE (2002) Developing an ultra-lightweight armor concept. *Ceram transactions* 134: 485-498.
- [8] Skaggs SR (2003) A brief history of ceramic armor development. *Ceram Eng Sci Proc* 24 (3): 337-349.
- [9] Wilkins ML, Honodel CA and Sawle D (1967) Approach to the study of light armor. Report no. UCRL-50284, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, CA, USA.
- [10] Wilkins ML (1977) Use of boron compounds in lightweight armor. Boron and refractory borides 633-648.
- [11] Landingham RL, Casey AW (1972) Final report of the light armor program. Report no. UCRL-51269, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, CA, USA.
- شوند. در صورت نیاز این داده‌ها پیش‌بینی و بعد اثبات شوند.
- تعریف بهبودیافته از پدیده تقابل^۱. در برخورد پرتابه به هدف باید عوامل مختلفی از جمله تشکیل کانال نفوذ، پدیده تقابل شامل ضربه مایل، جهت‌های حرکت غیر صفر^۲، تغییر شکل یافتن پرتابه‌ها و ... در نظر گرفته شوند.
- مدل‌سازی تحلیلی بهبودیافته از توزیع نیرو. در مواردی که هدف ضخیم است، نیاز به توسعه مدل‌سازی با توزیع بهتر نیروها بیشتر احساس می‌شود.
- تأثیر مایل بودن، معمولاً راستای دید ضخامت برای محاسبه مایل بودن هدف استفاده می‌شود. این یک تقریب مستدل است. با این حال در انحراف‌های شدید بخصوص در اهداف ضخیم، حضور سطح آزاد که در نتیجه بارگذاری نامتقارن روی دماغه پرتابه ایجاد می‌شود، می‌تواند منجر به خمش و احتمالاً شکست پرتابه شود. هرچند که می‌توان این کار سریع و به‌خوبی در شبیه‌سازی‌های عددی سه‌بعدی مدل‌سازی نمود، اما در حال حاضر این امر از توانایی قواعد اصلی مدل‌های تحلیلی خارج است.
- تأثیرات جهت حرکت پرتابه. این امر به‌خوبی مشخص است که چرخش حول محور عمودی و چرخش حول محور عرضی می‌توانند به‌طور چشم‌گیری پاسخ نفوذ را تحت تأثیر قرار دهند.
- کوپلینگ حرارتی-مکانیکی و اتلاف گرما. جدا از دیدگاه تنش تسلیم مؤثر در مدل والکر-اندرسون، کوپلینگ حرارتی-مکانیکی شامل بررسی محلی، شاید فراتر از مدل‌های تحلیلی بدون تجربه‌گرایی باشد. با این حال کوپلینگ حرارتی-مکانیکی به-راحتی در شبیه‌سازی‌های عددی مدل می‌شود، هرچند که مسئله مقیاس‌های طولی مختلف در پدیده‌های گوناگون همچنان یک مشکل است.

¹ Interface Phenomena

² Nonzero Flight Orientations

- [26] Tate A (1967) A theory for the deceleration of long rods after impact. *J Mech Phys Solids* 15: 387-399.
- [27] Alekseevskii VP (1966) Penetration of a rod into a target at high velocity. *Fizika Goreniya I Vzryva* 2(2): 99-106.
- [28] Tate A (1969) Further results in the theory of long rod penetration. *J Mech Phys Solids* 17: 141-150.
- [29] Tate A (1986) Long rod penetration Models-Part I. A flow field model for high speed long rod penetration. *Int J Mech Sci* 28(8): 535-548.
- [30] Tate A (1986) Long rod penetration models-Part II. Extensions to the hydrodynamic theory of penetration. *Int J Mech Sci* 28(9): 599-612.
- [31] Bishop RF, Hill R, Mott NF (1945) The theory of indentation and hardness. *Proc Royal Soc* 57(3): 147-159.
- [32] Anderson CE, Behner T, Hohler V (2013) Penetration efficiency as a function of target obliquity and projectile pitch. *J Appl Mech* 80: 031801-1/11.
- [33] Charles JrE, Behner T, Hohler V (2013) Penetration efficiency as a function of target obliquity and projectile pitch. *J Appl Mech* 80 (3): 031801.
- [34] Rubin MB, Kositski R, Rosenberg Z (2016) Essential physics of target inertia in penetration problems missed by cavity expansion models. *Int J Impact Engng* 98: 97-104.
- [35] Rosenberg Z, Dekel E (2016) A comment on 'The effect of target inertia on the penetration of aluminum targets by rigid ogive-nosed long rods' by T. L. Warren. Letter to the Editor *Int J Impact Engng* 93: 231-233.
- [36] Warren TL (2016) Response to: 'A comment on 'The effect of target inertia on the penetration of aluminum targets by rigid ogive-nosed long rods by T. L. Warren' by Z. Rosenberg and E. Dekel. Letter to the Editor *Int J Impact Engng* 93: 234-235.
- [37] Warren TL (2016) The effect of target inertia on the penetration of aluminum targets by rigid ogive-nosed long rods. *Int J Impact Eng* 91: 6-13.
- [38] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2016) Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin Wall Struct* 1 (107): 257-65.
- [39] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Armoudli E (2017) On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *P I Mech Eng E-J Pro Mech Eng* 231 (5): 939-50.
- [40] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2015) Study on the response of circular thin plate under low velocity impact. *Int J Geo Mech* 9 (2): 207-18.
- [41] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T (2016) new dimensionless numbers for deformation of circular
- [12] Damghani Nouri M, Hatami H (2014) Experimental and numerical study of the effect of longitudinal reinforcements on cylindrical and conical absorbers under impact loading. *Indian J Sci Tech* 7 (2): 199-210.
- [13] Hatami H, Shokri Rad M, Ghodsbin Jahromi A (2017) theoretical analysis of the energy absorption response of expanded metal tubes under impact loads. *Int J Impact Eng* 109: 224-239.
- [14] Jahromi Ghodsbin A, Hatami H (2018) Numerical Behavior Study of Expanded Metal Tube Absorbers and Effect of Cross Section Size and Multi-Layer under Low Axial Velocity Impact Loading. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 49 (4): 685-696. (In Persian)
- [15] Najafi M, Hosseini SH, Joudaki J (2018) Penetration of armored piercing projectile into ultra-high strength steel targets: Numerical and experimental investigation. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 8(2): 81-92. (In Persian)
- [16] Hatami H, Fathollahi AB (2018) theoretical and numerical study and comparison of the inertia effects on the collapse behavior of expanded metal tube absorber with single and double cell under impact loading. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 50 (5): 999-1014. (In Persian)
- [17] Hatami H, Hosseini M, Yasuri AK (2019) Perforation of thin aluminum targets under hypervelocity impact of aluminum spherical projectiles. *Mater Eval* 77(3): 411-422.
- [18] Forrestal MJ, Piekutowski AJ (2000) Penetration experiments with 6061-T6511 aluminum targets and spherical-nose steel projectiles at striking velocities between 0.5 and 3 km/s. *Int J Impact Eng* 24: 57-67.
- [19] Stilp AJ, Hohler V (1990) Long rod penetration mechanics. Chapter 5 in *High Velocity Impact Dynamics*. John Wiley & Sons, New York.
- [20] Wickert M (2007) Penetration data for a medium caliber tungsten sinter alloy penetrator into aluminum alloy 7020 in the velocity regime from 250 m/s to 1900 m/s. *Proc 23rd Int Symp Ballistics* 2:1437-1452.
- [21] Birkhoff G, MacDougall DP, Pugh EM and Taylor G (1948) Explosives with lined cavities. *J Appl Phys* 19: 563-582.
- [22] Eichelberger RJ (1956) Experimental test of the theory of penetration by metallic jets. *J Appl Phys* 27(1): 63-68.
- [23] Allen WA, Rogers JW (1961) Penetration of a rod into a semi-infinite target. *J Franklin Inst* 272: 275-284.
- [24] Christman DR, Gehring JW (1966) Analysis of high-velocity projectile penetration mechanics. *J Appl Phys* 37(4): 1579-1587.
- [25] Recht R, Ipson T (1963) Ballistic perforation dynamics. *J Appl Mech* 30 (3): 384-390.

- [55] Fellows N, Barton P (1999) Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite armour. *Int J Impact Eng* 22(8): 793-811.
- [56] Zaera R, Sánchez-Sáez S, Pérez-Castellanos JL, Navarro C (2000) Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact. *Compos Part A: Appl Sci Manuf* 31(8): 823-833.
- [57] Hohler V, Weber K, Tham R, James B, Barker A, Pickup I (2001) Comparative analysis of oblique impact on ceramic composite systems. *Int J Impact Eng* 26(1-10): 333-344.
- [58] Fawaz Z, Zheng W, Behdinan K (2004) Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours. *Compos Struct* 63(3-4): 387-395.
- [59] Rosenberg Z, Ashuach Y, Dekel E (2007) more on the ricochet of eroding long rods—validating the analytical model with 3D simulations. *Int J Impact Eng* 34(5): 942-957.
- [60] Shokrieh M, Javadpour G (2008) Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor. *Compos Struct* 82(2): 269-276.
- [61] Ziashamami M, Khodarahmi h, Vahedi K, Pol MH (2013) Experimental and numerical investigation of a blunt rigid projectile penetrating into a sandwich panel having aluminum foam core. *Modares Mech Eng* 13(5): 1-13. {In Persian}
- [62] Hedayatian m, Lighat G, Rahimi CH, Pol MH (2014) Numerical and experimental analyses of projectile penetration in grid cylindrical composite structures under high velocity Impact. *Search Results Web results. Modares Mechanical Engineering* 14(9): 17-26. (In Persian)
- [63] Yazdani M, Rashed A (2015) Studying the performance of multi-layered ceramic-epoxy armor under high velocity ballistic impact with finite element method. *Modares Mechanical Engineering* 15(1): 11-20. (In Persian)
- [64] Tahmasebiabdar M, Liaghat GH, Shanazari H, Khodadadi A, Hadavinia H, Abotorabi A (2015) Analytical and numerical investigation of projectile perforation into ceramic-metal targets and presenting a modified theory. *Modares Mechanical Engineering* 15(9): 353-359. (In Persian)
- [65] Mehrabani Yeganeh E, Liaghat GH, Pol MH (2015) Experimental investigation of cylindrical projectiles nose shape effects on high velocity perforation of woven polymer composite. *Modares Mechanical Engineering* 14(14): 309-318. (In Persian)
- [66] Shanazari H, Lighat GH, Feli S (2016) Analysis of penetration process in hybrid ceramic - nanocomposite targets. *Modares Mechanical Engineering* 16(10): 137-146. (In Persian)
- [67] Bidi A, Liaghat GH, Rahimi CH (2016) Experimental and numerical analysis of impact on steel curved panels. *Modares Mechanical Engineering* 16(4): 281-288. (In Persian)
- mild steel plates with large strains as a result of localized and uniform impulsive loading. *P I Mech Eng L-J Pro Mat Des Appl* 1464420716654195.
- [42] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Armoudli E (2017) on dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. P I Mech Eng E-J Pro Mech Eng* 231 (5): 939-50.
- [43] Li Q, Jones N (2000) On dimensionless numbers for dynamic plastic response of structural members. *Arch Appl Mech* 70 (4): 245-254.
- [44] Jacob N, Yuen SCK, Nurick G, Bonorchis D, Desai S, Tait D (2004) Scaling aspects of quadrangular plates subjected to localised blast loads—experiments and predictions. *Int J Impact Eng* 30(8-9): 1179-1208.
- [45] Park BW, Cho SR (2006) Simple design formulae for predicting the residual damage of unstiffened and stiffened plates under explosion loadings. *Int J Impact Eng* 32 (10): 1721-1736.
- [46] Yao S, Zhang D, Lu F (2015) Dimensionless numbers for dynamic response analysis of clamped square plates subjected to blast loading. *Arch Appl Mech* 85(6): 735-744.
- [47] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S (2017) On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin Walled Struct* 112: 118-124.
- [48] Reijer PC (1991) Impact on ceramic faced armour PhD thesis, Technical University Delft, Delft, The Netherlands.
- [49] Woodward RL (1990) a simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat. *Int J Impact Eng* 9: 455-474.
- [50] Walley SM (2010) Historical review of high strain rate and shock properties of ceramics relevant to their application in armour. *Adv Appl Cer* 109 (8): 446-466.
- [51] Florence AL, Ahrens T (1967) Interaction of projectiles and composite armor. *Stanford Research Inst Menlo Park CA.*
- [52] Rozenberg Z, Yeshurun Y (1988) the relation between ballistic efficiency and compressive strength of ceramic tiles. *Int J Impact Eng* 7(3): 357-362.
- [53] Zaera R, Sánchez-Gálvez V (1998) Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours. *Int J Impact Eng* 21(3): 133-148.
- [54] Benloulou IC, Sanchez-Galvez V (1998) A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite armors. *Int J Impact Eng* 21(6): 461-471.

- [70] Fras T, Faderl N (2018) Influence of add-on perforated plates on the protective performance of Light-Weight Armour Systems. *Problemy Mechatroniki: uzbrojenie, lotnictwo, inzynieria bezpieczeństwa* 9.
- [71] Sayah badkhor M, vahedi k, Naddaf Oskouei AR (2019) Presenting a modified theory and analytical investigation of projectile penetration into ceramic - metal semi-infinite targets. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(2): 31-45. (In Persian)
- [68] Ni C, Hou R, Han B, Jin F, Ma G, Lu T (2017) Normal and oblique projectile impact of double-layered pyramidal lattice truss structures filed with ceramic insertions. *Thermoplast Compos Mater* 30(8): 1136-1156.
- [69] Kılıç N, Ekici B, Bedir S (2017) Optimization of high hardness perforated steel armor plates using finite element and response surface methods. *Mech Adv Mater Struc* 24(7): 615-624.