

بررسی تحلیلی و عددی نفوذ پرتابه میله‌ای بلند در اهداف بتنی و بتن - فولادی

محمد شفیعی^۱، خداداد واحدی^{۲*}

تهران - دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ وصول: ۹۱/۰۶/۱۴، تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۲۵)

چکیده

نفوذ در اهداف بتنی و بتن- فولادی از اهمیت ویژه‌ای برای محققین صنایع دفاعی و غیردفاعی برخوردار می‌باشد، به علت پیچیده بودن فرآیند نفوذ، اکثر مطالعات انجام گرفته در این زمینه به صورت تجربی می‌باشد. در این پژوهش، عمق نفوذ یک پرتابه میله‌ای بلند در اهداف بتنی، با اصلاح مدل تحلیلی آلکسیوسکی- تیت (که قبلاً برای اهداف فلزی مطرح شده است)، بررسی شده است. با توجه به اینکه استفاده از این مدل تحلیلی، مستلزم داشتن مقاومت دینامیکی هدف می‌باشد، یک رابطه تحلیلی برای مقاومت دینامیکی بتن بر اساس استحکام فشاری آن ارائه شده است، که این رابطه از انطباق داده‌های تجربی و مدل تحلیلی استخراج شده است. همچنین با تعمیم این مدل برای اهداف چندلایه، عمق نفوذ پرتابه میله‌ای بلند در اهداف چندلایه غیرهمگن بتن - فولادی محاسبه شده است. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA مسئله شبیه‌سازی شده و نتایج به دست آمده از حل تحلیلی و عددی با نتایج تجربی موجود مقایسه و تطابق خوبی حاصل شده است.

واژه‌های کلیدی: هدف بتنی و بتن - فولادی، پرتابه، مدل تحلیلی تیت، عمق نفوذ، نرم‌افزار LS-DYNA.

۱- مقدمه

برداشتند، اما بدون شک نقطه عطف این مطالعات به ارائه مدل تیت و آلکسیوسکی [۳ و ۲] برمی‌گردد. این دو با در نظر گرفتن مقاومت‌های پرتابه و هدف و همچنین شتاب کاهنده پرتابه حل مناسبی برای نفوذ در اهداف فلزی ارائه دادند. بسط تئوری انبساط حفره جهت تحلیل نفوذ یک پرتابه میله‌بلند، توسط فورستال و لوک [۴] صورت گرفت. این کار با هدف جامعیت دادن به نفوذ پرتابه‌های میله‌بلند در محدوده وسیعی از سرعت صورت گرفت و به صورت نسبی موفق بود. همچنین فورستال و همکارانش [۵ و ۶] تحقیقات گسترده‌ای را با استفاده از تئوری انبساط بر روی دینامیک نفوذ پرتابه‌ها از قبیل نفوذ مستقیم پرتابه‌ای صلب در هدف بتنی، نفوذ در اهداف الاستیک- پلاستیک (فورستال و لوک [۷]) انجام دادند. در مطالعات لیتل فیلد و

موضوع نفوذ پرتابه در بتن در زمینه نظامی تاریخچه طولانی دارد و در سال‌های اخیر مورد توجه سایر علوم کاربردی شامل طراحی سازه‌های مقاوم به نفوذ برای نیروگاه‌های هسته‌ای، ساختمان‌های متعدد صنعتی و ساختارهای حفاظتی تقویت شده قرار گرفته است. مرور کارهای قبلی نشان می‌دهد که مطالعات گسترده نفوذ در بتن اوایل دهه ۴۰ انجام گرفته است. با این وجود بسیاری از این مطالعات به خاطر جنگ جهانی دوم متوقف شدند که این امر تا دهه ۶۰ ادامه پیدا کرد. هیل و بیرخوف [۱] اولین کسانی بودند که با بسط تئوری نفوذ پرتابه‌های خرج‌گود به پرتابه‌های میله‌بلند، گامی مؤثر در مطالعات نفوذ پرتابه‌های میله بلند

* E-mail: vahedi1710@yahoo.com

۱- کارشناس ارشد

۲- دانشیار

اهداف چند لایه، نتایج نفوذ در اهداف بتن- فولادی مورد مطالعه و بحث قرار گرفته است.

۲- روش تحلیلی

۲-۱- شرح مختصری از تئوری آلفا سیوسکی - تیت و تعمیم آن برای اهداف چند لایه

تئوری هیدرودینامیک بر مبنای معادله برنولی ابتدا برای نفوذ جت خرج‌گود و سپس برای پرتابه‌های میله‌ای بلند مافوق سرعت در هدف نیمه بی‌نهایت به صورت زیر بکار رفته است:

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

که v سرعت پرتابه، u سرعت نفوذ، ρ_P و ρ_T دانسیته پرتابه و هدف هستند و عمق نفوذ هیدرودینامیکی به کمک رابطه (۱) به شکل زیر در می‌آید:

$$\frac{P}{L} = \sqrt{\rho_P / \rho_T} \quad (2)$$

که P عمق نفوذ و L طول پرتابه است.

در سرعت‌های پایین‌تر که اثر مقاومت مواد ظاهر می‌شود، رابطه (۲) خطای زیادی نشان می‌دهد. لذا آلفا سیوسکی و تیت [۳ و ۲] با در نظر گرفتن مقاومت پرتابه (Y) و مقاومت در برابر نفوذ هدف (R) در رابطه (۱) معادله زیر را ارائه دادند:

$$\frac{1}{2} \rho_P (v-u)^2 + Y = \frac{1}{2} \rho_T u^2 + R \quad (3)$$

با کمک معادله حرکت (بقا مومنتوم) و نرخ فرسایش میله به صورت زیر:

$$\rho_P l \frac{dv}{dt} = -Y \quad (4)$$

$$\frac{dl}{dt} = -(v-u) \quad (5)$$

و با حل معادلات (۳) تا (۵) عمق نفوذ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \int_0^t u dt = \frac{\rho_P}{Y} \int_v^{v_0} u l dv \quad (6)$$

در رابطه فوق l طول لحظه‌ای پرتابه است. شرایط اولیه نیز به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} l(t=0) &= L \\ v(t=0) &= v_0 \end{aligned} \quad (7)$$

که L و v_0 به ترتیب طول و سرعت اولیه پرتابه می‌باشند. برای حرکت و نفوذ یک پرتابه میله‌ای بلند در اهداف چند لایه از سه

همکارانش [۸]، سعی شده با ایجاد تغییراتی در تئوری انبساط حفره، آن را برای اهدافی با ضخامت محدود نیز بکار برند. نفوذ کامل پرتابه در لایه بتنی توسط بسیاری از محققین دیگر نیز مورد مطالعه قرار گرفته است و مجموعه‌ای از اطلاعات نفوذ پرتابه در لایه بتنی نیز ارائه شده است [۹]. نفوذ در اهداف نیمه بی‌نهایت به دلیل عدم وجود سطح پشتی، شرایطی را فراهم می‌کند که برای مطالعات مقاومت نفوذ مناسب است. وقتی یک پرتابه در یک هدف بتنی نیمه بی‌نهایت نفوذ می‌کند، به صورت مداوم و پیوسته مواد مقابل خود را خرد و کاملاً به عقب می‌راند، تحت فشار ناشی از تعامل بین پرتابه و هدف ممکن است قسمت جلویی پرتابه شکل قارچی به خود بگیرد. میزان این تغییر شکل به سرعت برخورد و مقاومت پرتابه و هدف، وابسته است.

بسته به عوامل گوناگون مانند مقاومت، اندازه پرتابه، هدف و سرعت پرتابه، نفوذ می‌تواند با و یا بدون خروج پرتابه از هدف انجام گیرد. برای سرعت‌های برخورد نسبتاً پایین (زیر ۱۰۰۰ متر بر ثانیه)، معمولاً پرتابه بدون تغییر شکل باقی می‌ماند. آزمایشات تجربی موجود در این محدوده از سرعت نشان می‌دهد که عمق نفوذ با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. در سرعت‌های خیلی بالا، دماغه پرتابه شروع به فرسایش و خوردگی و یا شروع به قارچی شدن می‌کند و به شدت عملکرد نفوذ را کاهش می‌دهد [۱۰].

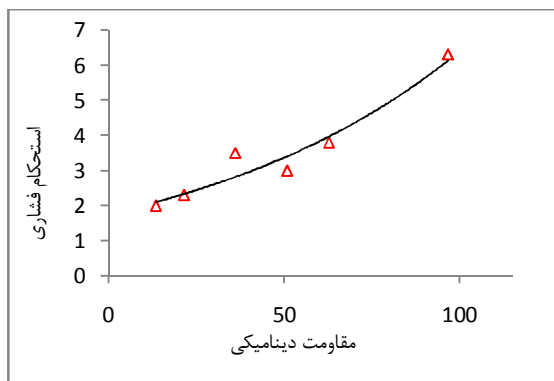
مدل‌های تحلیلی موجود برای پیش‌بینی عمق نفوذ در اهداف بتنی در محدوده سرعت‌های تقریباً زیر ۱۰۰۰ متر بر ثانیه، که در آن پرتابه رفتار صلب دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای سرعت‌های بالاتر که پرتابه دچار فرسایش و قارچی شدن می‌شود مدل خاصی ارائه نشده است. خدارحمی و همکاران [۱۱] مدل آلفا سیوسکی-تیت را برای هدف‌های چند لایه (هدف‌های نیمه بی‌نهایتی که جلوی آن‌ها یک یا چند لایه فلزی با ضخامت محدود قرار گرفته) تعمیم داده‌اند، که نتایج مدل تعمیم یافته با نتایج محققین دیگر مقایسه و تطابق خوبی نشان داده است. نظام‌آبادی [۱۲] با بررسی جامعی از مدل فورستال، مدل آلفا سیوسکی-تیت را برای اهداف غیرهمگن لایه‌ای بکار برده و نتایج حاصل را با نتایج به دست آمده از نرم‌افزار AUTODYN مقایسه کرده و تطابق قابل قبولی ارائه داده است.

در مقاله حاضر، با توجه به اینکه تاکنون مدل تحلیلی مستقلی که بتواند نفوذ پرتابه‌های دارای فرسایش را در اهداف بتنی تحلیل نماید ارائه نشده است، مدل آلفا سیوسکی-تیت (که برای اهداف فلزی مطرح شده است) در اهداف بتنی و تعمیم آن در اهداف چندلایه غیر همگن که می‌تواند در طراحی زره‌های چندلایه کاربردهای عملی خوبی داشته باشد، بکار گرفته شده است. برای این منظور از انطباق نتایج تجربی فورستال [۶ و ۵] با داده‌های مدل تحلیلی آلفا سیوسکی-تیت [۳ و ۲]، یک رابطه تحلیلی برای محاسبه مقاومت دینامیکی بتن (R) بر اساس استحکام فشاری آن ارائه شده است. همچنین با تعمیم این مدل در

$$\frac{1}{2} \rho_P (v-u)^2 + Y = \frac{1}{2} \rho_T u^2 + 1.773 \exp(0.012 f_c') \quad (12)$$

۳- شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی نفوذ پرتابه در هدف باید از یک الگوریتم محاسبه‌گر استفاده شود به طوری که پرتابه قادر باشد از شبکه مش‌بندی هدف عبور کند. در روش لاگرانژی که عموماً برای مسائل سازه‌ای استفاده می‌شود، شبکه مش‌بندی همراه ماده تغییر فرم می‌دهد، از این‌رو در مسائلی مثل برخورد و نفوذ به علت تغییر شکل شدید المان‌ها به ویژه در محل برخورد تحلیل مسئله با نرم‌افزار بسیار مشکل و بعضاً ناممکن می‌شود چرا که برای پایداری حل، نمونه‌های زمانی باید خیلی کوچک شود از این‌رو حل مسئله بسیار کند و بعضاً مش‌ها تغییر فرم شدید داده و حل متوقف می‌شود. برای رفع این مشکل از روش‌های مختلفی از جمله روش اصلاح مجدد محیط و فرسایش المان استفاده می‌شود: در روش اصلاح مجدد محیط پس از تعدادی از سیکل‌های محاسباتی در صورتی که بخشی از شبکه مش‌بندی از حالت طبیعی خود خارج شود، شبکه قبلی روی شبکه‌ای منظم‌تر نگاشته می‌شود.



شکل ۱- مقاومت دینامیکی بتن بر حسب استحکام فشاری.

در روش فرسایش المان وقتی وضعیت المان‌ها به یک حد تعیین شده برسد المان‌ها حذف می‌شوند. حد حذف شدن المان‌ها یک حد اختیاری است و مربوط به میزان تغییر شکل یا میزان تنش در المان می‌باشد. مثلاً وقتی کرنش پلاستیک مؤثر یا تنش اصلی در یک المان به حد مشخصی برسد، این المان حذف می‌شود. از این‌رو روش به صورت گسترده در حل مسائل مربوط به نفوذ پرتابه در هدف استفاده می‌شود. نرم‌افزار LS-DYNA امکان استفاده از روش فرسایش المان را برای کاربر فراهم می‌کند، از این‌رو در مقاله حاضر از این قابلیت نرم‌افزار برای شبیه‌سازی فرآیند نفوذ استفاده شده است. برای تحلیل عددی یک مسئله پاسخ مواد را به دو بخش حجمی و دیویاتوریک تقسیم می‌کنند، پاسخ حجمی ماده به تنش‌های هیدرواستاتیک و پاسخ دیویاتوریک مربوط به تنش‌های برشی می‌باشد.

رابطه (۳) تا (۵) به صورت متناوب برای هر لایه استفاده می‌شود، با این تفاوت که رابطه (۳) به صورت زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\frac{1}{2} \rho_P (v-u)^2 + Y = \frac{1}{2} \rho_{Ti} u^2 + R_i \quad (8)$$

که R_i و ρ_{Ti} به ترتیب چگالی و مقاومت دینامیکی لایه i ام هدف می‌باشد.

هنگامی که پرتابه از لایه i ام عبور می‌کند، شرایط خروجی پرتابه همان شرایط اولیه برای لایه $i+1$ می‌باشد، به عبارت دیگر طول پرتابه و سرعت آن در لحظه خروج هر لایه، معادل آن مقادیر در لحظه ورود به لایه بعدی است:

$$\begin{aligned} l(T_i + 0) &= l(T_i - 0) \\ v(T_i + 0) &= v(T_i - 0) \end{aligned} \quad (9)$$

$T_i - 0$ و $T_i + 0$ زمانی است که پرتابه در حال خارج شدن از لایه i و وارد شدن در لایه $i+1$ می‌باشد. باید به این نکته نیز توجه داشت که سرعت نفوذ (u) تابعی از مواد هدف می‌باشد، سرعت نفوذ در لایه i و $i+1$ لزوماً برابر نخواهد بود:

$$u(T_i + 0) \neq u(T_i - 0) \quad (10)$$

۲-۲- استخراج رابطه جدید برای محاسبه مقاومت دینامیکی بتنی بر حسب مقاومت فشاری

در بررسی عمق نفوذ با استفاده از مدل تیت، پارامتر R مهم‌ترین فاکتور مورد توجه می‌باشد که یا بایستی به صورت تست آزمایشگاهی به دست آید و یا یک رابطه ریاضی بر اساس تحلیل فیزیکی برای آن در نظر گرفته شود. بنابراین استفاده از مدل تحلیلی تیت برای پیش‌بینی عمق نفوذ پرتابه در اهداف بتنی مستلزم داشتن مقاومت دینامیکی (R) بتن می‌باشد.

با توجه به اینکه مقاومت دینامیکی بتن تابعی از استحکام فشاری

(f_c') می‌باشد، در این مقاله برای محاسبه مقاومت دینامیکی بتن با استفاده از نتایج تجربی دیگران مطابق نمودار (۱) تغییرات مقاومت دینامیکی بتن بر اساس استحکام فشاری آن نشان داده شده است، رابطه (۱۱) برای بتن غیر مسلح ارائه شده است:

$$R = 1.773 \exp(0.012 f_c') \quad (11)$$

که در این رابطه R مقاومت دینامیکی و f_c' نیز استحکام فشاری بتن بر حسب پاسکال می‌باشند. با توجه به نمودار (۱) با افزایش استحکام فشاری مقاومت دینامیکی نیز افزایش می‌یابد. با جایگزینی رابطه (۱۱) در رابطه (۳)، مدل تیت را برای پیش‌بینی عمق نفوذ پرتابه در سرعت‌های بالا در اهداف بتنی قابل استفاده می‌نماید.

که d_1 و d_2 ضرایبی هستند که توسط کاربر تعیین می‌شوند. رابطه زیر نیز رفتار مواد تخریب شده را نشان می‌دهد:

$$\sigma_f^* = b(p^*)^m \left(1 + c \ln \epsilon^*\right) \leq sfma \quad (19)$$

در رابطه فوق، b ضریب اعمال شده از طرف کاربر بوده و $sfma$ نیز ماکزیمم استحکام شکست نرمالایز شده می‌باشد. d_1 کنترل کننده میزان تخریب است و اگر برابر صفر باشد در یک بازه زمانی، تخریب به صورت کامل رخ می‌دهد.

در مواد تخریب نشده، فشار هیدرواستاتیک به صورت زیر می‌باشد:

$$p = k_1 \mu + k_2 \mu^2 + k_3 \mu^3 \quad (20)$$

که در آن:

$$\mu = \rho / \rho_0 - 1 \quad (21)$$

در رابطه (21) چگالی ماده و ρ_0 چگالی ماده پس از تغییر شکل می‌باشد. وقتی تخریب آغاز می‌شود، فشار افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به حد الاستیک هوگونیوت (HEL) و مدول برشی (G)، آنگاه μ_{HEL} با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$HEL = k_1 \mu_{HEL} + k_2 \mu_{HEL}^2 + k_3 \mu_{HEL}^3 + (4/3)g (\mu_{HEL} / (1 + \mu_{HEL})) \quad (22)$$

با نرمالیزه کردن رابطه فوق، معادله (23) حاصل می‌شود:

$$p_{HEL} = k_1 \mu_{HEL} + k_2 \mu_{HEL}^2 + k_3 \mu_{HEL}^3 \quad (23)$$

و همچنین:

$$\sigma_{HEL} = 1.5(HEL - p_{HEL}) \quad (24)$$

که اگر p_{HEL} برابر صفر باشد نرم‌افزار می‌تواند به صورت اتوماتیک تنش‌ها را محاسبه نماید. ضرایب این مدل نیز بسیار زیاد و پیچیده می‌باشد و تعیین آن‌ها نیز به انجام تست‌های مختلف وابسته است. ضرایب این مدل برای بتن مطابق جدول (1) داده شده است.

۳-۱-۲- مدل مادی جانسون- کوک

برای مدل کردن تنالیوم و فولاد، می‌توان از بسیاری از مدل مادی‌های استاندارد استفاده نمود. البته با توجه به سرعت برخورد پرتابه به هدف، این مدل‌ها می‌توانند تغییر کنند. در سرعت‌های بالاتر از سرعت صوت، بهتر است از مدل مادی جانسون-کوک استفاده شود. این مدل مادی معمولاً در حالت‌هایی استفاده می‌شود که نرخ کرنش بالا باشد. لذا یکی از ملزومات استفاده از این مدل، بکار بردن معادله حالت برای آن می‌باشد.

هایدروکدها برای به دست آوردن پاسخ حجمی از معادله حالت و برای به دست آوردن پاسخ برشی از مدل مادی استفاده می‌کنند. در نرم‌افزار LS-DYNA نزدیک به ۱۹۰ مدل مادی و ۱۳ معادله حالت برای توصیف رفتار مواد مختلف ارائه شده است [۱۳]. در مقاله حاضر برای شبیه‌سازی بتن، مدل جانسون- هالمکوئیست و برای تنالیوم و فولاد جانسون-کوک استفاده شده است.

۳-۱-۳- مدل‌های مادی بکار رفته برای پرتابه و هدف

۳-۱-۳-۱- مدل مادی جانسون - هالمکوئیست

برای بتن، سرامیک، شیشه، و سایر مواد ترد از مدل مادی جانسون- هالمکوئیست استفاده می‌شود. این مدل مادی بهتر از هر مدلی رفتار بتن را بیان می‌کند. تنش معادل در این‌گونه مواد به صورت تابعی از ضریب تخریب D به صورت زیر است:

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (13)$$

که در آن:

$$\sigma_i^* = a \left(p+t \right)^n \left(1 + c \ln \epsilon^* \right) \quad (14)$$

رابطه (14) رفتار مواد تخریب نشده را نشان می‌دهد. علامت * نشان دهنده مقدار نرمالیزه شده کمیت‌ها می‌باشد. تنش کششی نرمالیزه شده، از تقسیم تنش کششی معادل به تنش حد الاستیک هوگونیوت (HEL) مطابق با رابطه (15) به دست می‌آید.

فشار نرمالیزه شده نیز از تقسیم فشار معادل به حد الاستیک هوگونیوت (HEL) مطابق با رابطه (16) به دست می‌آید. در روابط فوق، a پارامتر استحکام نرمالیزه شده برای مواد تخریب نشده بوده و C پارامتر استحکام برای نرخ کرنش‌های مختلف است و ϵ^* نیز نرخ کرنش پلاستیک نرمالیزه شده می‌باشد.

$$t^* = \frac{T}{P_{HEL}} \quad (15)$$

$$p^* = \frac{P}{P_{HEL}} \quad (16)$$

ضریب تخریب نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_f^p}{\epsilon_f^p} \quad (17)$$

که $\Delta \epsilon_f^p$ نمو کرنش پلاستیک و ϵ_f^p کرنش پلاستیک شکست که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\epsilon_f^p = d_1 \left(p+t \right)^{d_2} \quad (18)$$

جدول ۱- پارامترهای مدل جانسون - هالمکوئیست برای بتن - (کلیه واحدها بر حسب SI است [۱۴]).

| مقادیر | خصوصیات ماده | مقادیر | خصوصیات ماده |
|-----------------------|-----------------|-------------------------|---------------|
| ۰/۷۶ | N | ۲۳۰۰ | ρ |
| ۱ | ε^* | $۱۳/۵۶۷ \times ۱۰^{-۶}$ | G |
| ۱۱/۷ | Sf_{max} | ۵۱×۱۰^{-۶} | f'_c |
| ۰/۰۳ | D_1 | ۰/۷۵ | A |
| ۱ | D_2 | ۱/۶۵ | B |
| $۱۷/۴ \times ۱۰^{-۹}$ | K_1 | ۰/۰۰۷ | C |
| $۳۸/۸ \times ۱۰^{-۹}$ | K_2 | ۰/۰۱ | EF_{min} |
| $۲۹/۸ \times ۱۰^{-۹}$ | K_3 | $۱۳/۶ \times ۱۰^{-۶}$ | P_{crush} |
| ۰/۱ | μ_{lock} | ۰/۰۰۵۸ | μ_{crush} |
| | | $۱/۰۵ \times ۱۰^{-۶}$ | P_{lock} |

جانسون و کوک معادله زیر را برای نشان دادن تنش سیلان ماده پیشنهاد داده‌اند:

$$\sigma_y = \left(A + B \varepsilon^{-p^n} \right) \left(1 + c \ln \varepsilon^* \right) \left(1 - T^{*m} \right) \quad (25)$$

در این رابطه σ_y تنش سیلان، ε کرنش پلاستیک مؤثر، ε^* کرنش پلاستیک مؤثر T^* دمای بی‌بعد و A, B, c, n, m ضرایب ثابت مادی هستند. در این مدل مادی، کرنش شکست مطابق رابطه زیر بر حسب مقادیر بی‌بعد شده تنش σ^* ، نرخ کرنش ε^* و دمای T^* ثابت-های مادی D_1 تا D_5 دست می‌آید:

$$\varepsilon^f = \left[D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^* \right] + D_4 \ln \varepsilon^* + D_5 T^* \quad (26)$$

σ^* از تقسیم فشار به تنش مؤثر به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\sigma^* = \frac{p}{\sigma_{eff}} \quad (27)$$

شکست زمانی رخ می‌دهد که ضریب تخریب به صورت زیر:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^f} \quad (28)$$

برابر با ۱ شود.

البته ضرایب بکار رفته در مدل جانسون-کوک و معادله حالت مربوط به آن بسیار زیاد و پیچیده بوده و تعیین دقیق آن‌ها برای پرتابه مورد آزمایش، نیازمند انجام تست‌های زیاد مکانیکی و دینامیکی می‌باشد. در جدول (۲) ضرایب جانسون-کوک برای فولاد و تتالیوم ارائه شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- محاسبه عمق نفوذ در هدف بتنی با استفاده از مدل تحلیلی ارائه شده

مسئله شامل نفوذ پرتابه‌ای از جنس فولاد با نوک تیز^۱ و جرم ۱/۶ کیلوگرم، در هدف استوانه‌ای از جنس بتن با مقاومت فشاری متوسط ۵۱ مگاپاسکال می‌باشد. مقاومت دینامیکی آن با استفاده از رابطه (۱۱) برابر $۳/۶ \text{ kbar}$ محاسبه شده است. شکل (۲) مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از مدل تحلیلی ارائه شده و مدل فورستال [۶] با نتایج تجربی [۱۱] را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است در سرعت‌های پایین (سرعت‌های زیر ۱۰۰۰ متر بر ثانیه) با توجه به صلب بودن پرتابه، نتایج حاصله از مدل تحلیلی فورستال با نتایج تجربی تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد (مدل تحلیلی فورستال با فرض صلب بودن پرتابه عمق نفوذ را بررسی می‌کند)، ولی در سرعت‌های بالا با توجه به تغییر شکل پرتابه و در نتیجه کاهش انرژی جنبشی، عمق نفوذ کاهش می‌یابد، نتایج حاصله از مدل ارائه شده نسبت به فورستال تطابق بهتری را نشان می‌دهد.

۴-۲- محاسبه عمق نفوذ در اهداف چند لایه ناهمگن بتن- فولادی

مسئله شامل برخورد و نفوذ یک پرتابه تغییر شکل پذیر از جنس مس و تتالیوم به یک هدف چند لایه بتن- فولادی همانند شکل (۳) که شامل یک لایه بتنی با ضخامت ۵/۴ سانتی‌متر (لایه اول) و لایه فولادی با ضخامت ۱/۶ سانتی‌متر (لایه دوم) و لایه سوم نیز بتن به صورت نیمه بی‌نهایت با استحکام فشاری $۳۷/۴$ مگاپاسکال می‌باشد. با حل معادلات (۳) تا (۶) و با در نظر گرفتن کل مجموعه هدف به صورت نیمه بی‌نهایت و اعمال شرایط اولیه برای هر لایه، عمق نفوذ نهایی به دست می‌آید. نکته قابل توجه تعیین مقادیر ثابت‌های تجربی R و Y می‌باشد، که با انطباق مدل تحلیلی با نتایج تجربی محاسبه شده است. در نمودارهای (۴) و (۵) مقادیر مختلف R و Y برای پرتابه‌هایی از جنس مس و تتالیوم و نتایج آزمایش‌های تجربی فورستال [۶] برای بتنی با استحکام فشاری $۳۶/۲$ مگاپاسکال مقایسه شده است. با توجه به منحنی‌ها، در سرعت‌های پایین عمق نفوذ با تغییر مقدار Y تغییر محسوسی نمی‌کند، ولی کاملاً به مقدار R وابسته است، اما در ماکزیمم عمق نفوذ به مقدار Y وابسته است.

در سرعت‌های بالا با توجه به فرسایش زیاد پرتابه (کاهش طول و در نتیجه کاهش وزن و انرژی جنبشی) عمق نفوذ کاهش یافته و از مقادیر Y و R مستقل می‌باشد. در نهایت برای پرتابه مسی $Y = ۶/۱۸۶ \text{ kbar}$ و پرتابه تتالیومی $Y = ۱۳/۴۴ \text{ kbar}$ و برای بتن نیز $R = ۴/۲۶ \text{ kbar}$ به دست آمده است (شکل ۶) [۱۰].

جدول ۲- پارامترهای مدل جانسون کوک برای تنتالیوم و فولاد- (کلیه واحدها بر حسب SI است) [۱۶ و ۱۵].

| فولاد | تنتالیوم | خصوصیات ماده | فولاد | تنتالیوم | خصوصیات ماده |
|-------------------|-------------------|--------------|-------------------|-------------------|--------------|
| 586×10^6 | 141×10^9 | B | ۷۸۵۰ | ۱۶۶۵۰ | ρ |
| ۰/۰۱۴ | ۰/۰۱۶ | C | 78×10^9 | 69×10^9 | G |
| ۰/۲۶ | ۰/۰۱۸ | N | 179×10^9 | 179×10^9 | E |
| - ۰/۰۸ | ۱ | D_1 | ۱ | ۱ | M |
| ۲/۱۰ | ۰/۳۲ | D_2 | ۱۵۲۰ | ۱۷۰۰ | T_M |
| - ۰/۵ | - ۱/۲ | D_3 | ۲۹۳ | ۳۳۰ | T_R |
| ۰/۰۰۲ | ۰ | D_4 | ۴۷۷ | ۲۷۰ | C_p |
| ۰/۶۱ | ۰ | D_5 | 910×10^6 | $1/3 \times 10^9$ | A |

در شکل‌های (۴) و (۵) به صورت جداگانه برای پرتابه‌های از جنس مس و تنتالیوم مقادیر مقاومت دینامیکی پرتابه و هدف از انطباق مدل تحلیلی با داده‌های تجربی محاسبه گردیده است که در شکل (۶) بهترین نمودار انطباق داده‌های تجربی با مدل تحلیلی برای هر دو پرتابه از جنس مس و تنتالیوم برای محاسبه مقادیر R و Y آورده شده است. لازم به ذکر است از آنجا که اطلاعات تجربی زیادی در رابطه با نفوذ در بتن در سرعت‌های بالا در مراجع موجود نیست تنها یک نقطه برای هر کدام از پرتابه‌ها موجود بود که همان نقاط مورد توجه قرار گرفته است.

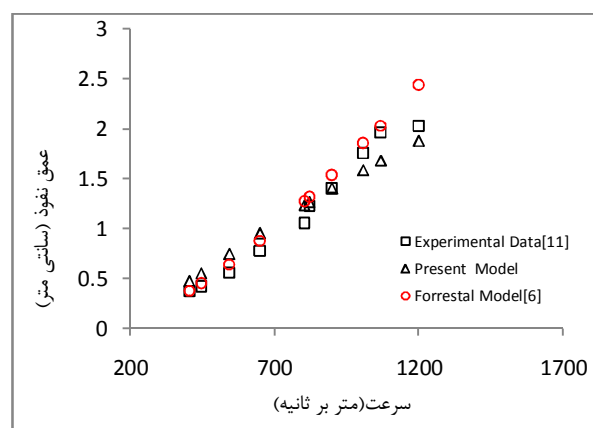
در جدول (۳) مشخصات هندسی پرتابه و عمق نفوذ به دست آمده از مدل تعمیر یافته تیت برای اهداف چند لایه بتن- فولادی و نتایج تجربی [۱۰] بر حسب سرعت برخورد پرتابه ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، در سرعت‌های بالا تطابقی قابل قبول بین عمق نفوذ به دست آمده از مدل تحلیلی ارائه شده با نتایج تجربی [۱۰] را نشان می‌دهد.

در مسئله حاضر نودهای قرار گرفته در سطح خارجی هدف در تمام جهات و نودهای موجود روی محور تقارن با توجه به شرایط تقارن مقید شده‌اند. همچنین شرایط اولیه در نظر گرفته شده در مسئله با اعمال سرعت اولیه برای پرتابه محقق شده است. یکی دیگر از نکات مهم در شبیه‌سازی انتخاب و اعمال سطوح تماس و برخورد مناسب می‌باشد که در این شبیه‌سازی از الگوریتم تماس سطح به سطح برای تعریف سطوح تماس استفاده شده است. در جدول (۴) مقایسه عمق نفوذ به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی برای هدف بتنی را نشان می‌دهد.

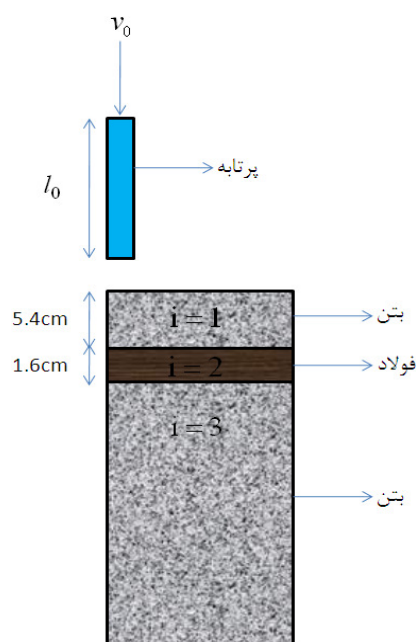
شکل (۸) عمق نفوذ پرتابه بر حسب سرعت‌های برخورد مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار مشخص است نتایج عددی و تجربی تطابق قابل قبولی دارند؛ اختلاف نتایج می‌تواند مربوط به مدل مادی‌های انتخاب شده و یا ضرایب مربوط به آن‌ها در شبیه‌سازی عددی باشد که در سرعت‌های پایین نسبت به سرعت‌های بالا جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌کند، ولی مدل‌های ماده به خصوص در سرعت‌های بالا از دقت کمتری برخوردارند و طرز رفتار ماده را دقیقاً بیان نمی‌کند.

در جدول (۵) اطلاعات عمق نفوذ مربوط به هدف بتن- فولادی به دست آمده از روش تحلیلی، عددی و نتایج تجربی بر حسب سرعت برخورد پرتابه ارائه شده است. اطلاعات این جدول شامل نتایج مدل تعمیر یافته تیت و نتایج شبیه‌سازی اخیر با نرم‌افزار LS-DYNA و داده‌های تجربی [۱۰] می‌باشد.

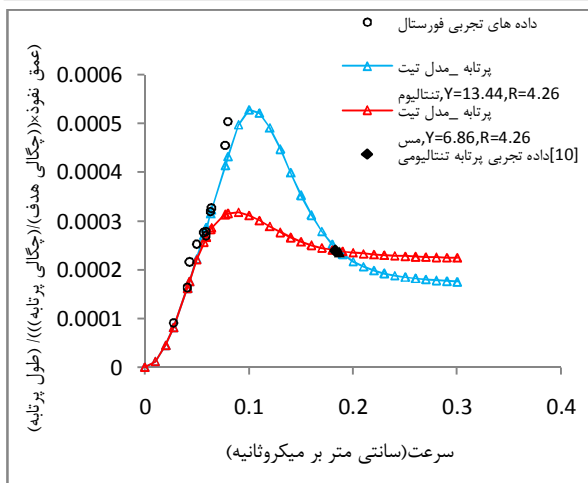
شکل (۹) عمق نفوذ پرتابه بر حسب سرعت‌های برخورد مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار مشخص است نتایج تحلیلی، عددی و تجربی تطابق قابل قبولی دارند. نتایج مدل تحلیلی در سرعت‌های بالاتر تطابق مناسب‌تری با نتایج تجربی و عددی دارد. این موضوع به این



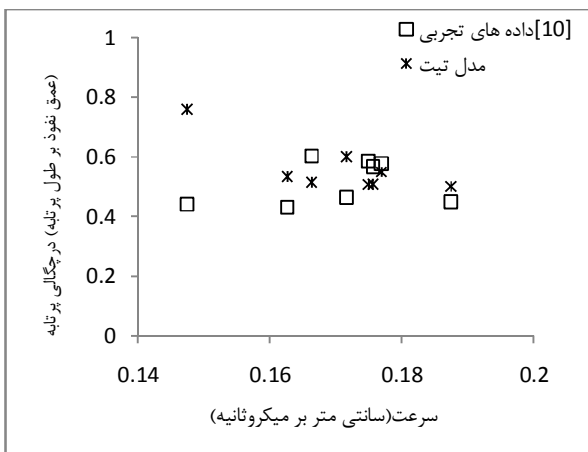
شکل ۲- مقایسه نتایج مدل تحلیلی ارائه شده و مدل فورستال با نتایج تجربی.



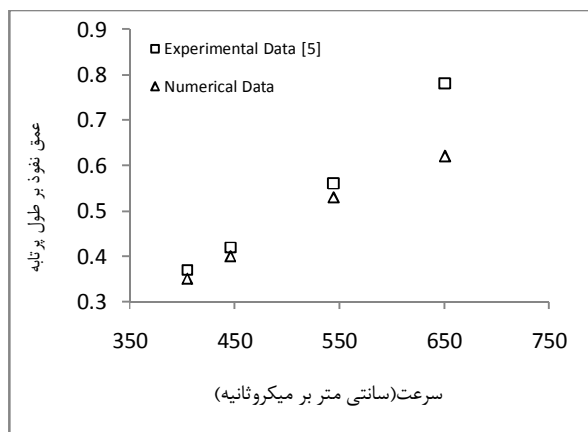
شکل ۳- هدف چند لایه بتن- فولادی.



شکل ۶- محاسبه Y و R برای پرتابه‌هایی از جنس مس و تانتالیوم و هدف بتنی.

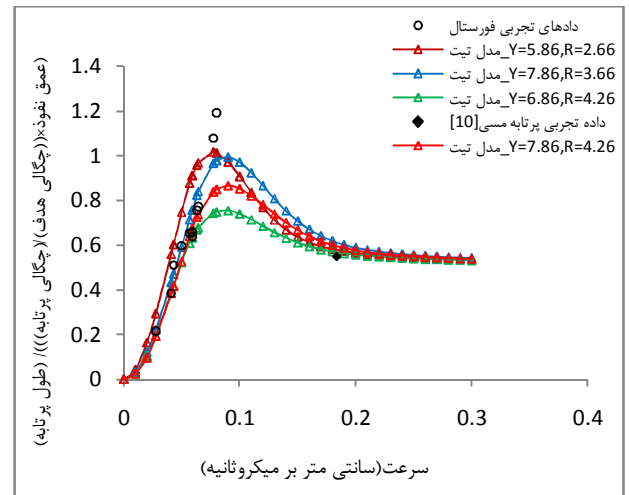


شکل ۷- مقایسه نتایج به دست آمده از مدل تحلیلی حاضر با نتایج تجربی.

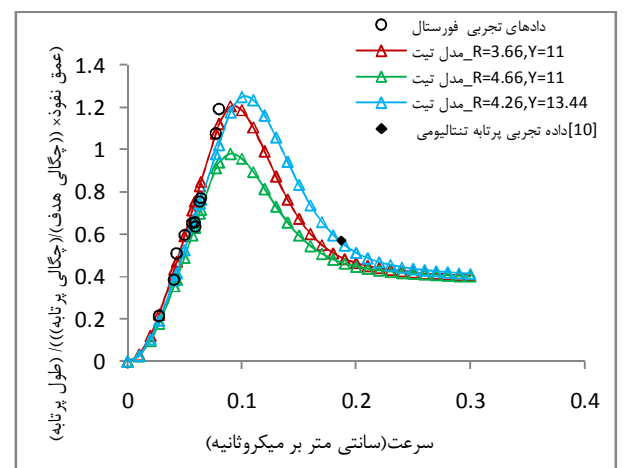


شکل ۸- مقایسه نتایج حل عددی با نتایج تجربی برای هدف بتنی.

علت است که مدل پایه تیت برای پیش‌بینی عمق نفوذ در سرعت‌های بالا ارائه شده است. بعلاوه اختلاف نتایج می‌تواند مربوط به مدل ماده‌های انتخاب شده و یا ضرایب مربوط به آن‌ها در حل عددی و یا ضرایب مورد استفاده در حل تحلیلی باشد.



شکل ۴- منحنی‌های محاسبه شده برای Y و R پرتابه مسی.



شکل ۵- منحنی‌های محاسبه شده برای Y و R پرتابه تانتالیومی.

جدول ۳- مقایسه نتایج مدل تحلیلی حاضر با داده‌های تجربی [۱۰].

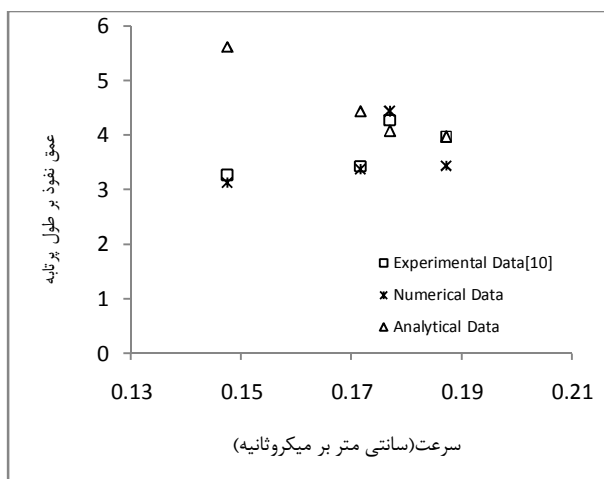
| جنس پرتابه | طول پرتابه (cm) | سرعت برخورد (m/s) | عمق نفوذ تجربی (cm) | عمق نفوذ تحلیلی (cm) |
|------------|-----------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| Ta | ۷/۶۶ | ۱۴۷۵ | ۲۵ | ۱۰/۰۷ |
| Cu | ۱۹ | ۱۶۲۶ | ۳۲/۵ | ۴۰/۰۲ |
| Cu | ۱۴ | ۱۶۶۳ | ۳۳/۵ | ۲۸/۵۶ |
| Ta | ۱۰/۳۲ | ۱۷۱۷ | ۳۵/۴ | ۴۵/۸ |
| Ta | ۱۴ | ۱۷۷۰ | ۳۳/۸ | ۳۲/۲۳ |
| Cu | ۱۴ | ۱۷۵۰ | ۳۲/۵ | ۲۸/۲۶ |
| Cu | ۱۴ | ۱۷۵۶ | ۳۱/۵ | ۲۸/۲۳ |
| Cu | ۱۴ | ۱۸۷۵ | ۲۵ | ۲۷/۹۲ |

جدول ۴- مقایسه عمق نفوذهای به دست آمده از شبیه‌سازی و نتایج تجربی [۵] برای اهداف بتنی.

| سرعت برخورد (m/s) | نتایج تجربی (m) | نتایج شبیه‌سازی (m) | درصد خطا |
|-------------------|-----------------|---------------------|----------|
| ۴۰۵ | ۰/۳۷ | ۰/۳۵ | ۵% |
| ۴۴۶ | ۰/۴۲ | ۰/۴ | ۵% |
| ۵۴۵ | ۰/۵۶ | ۰/۵۳ | ۵% |
| ۶۵۱ | ۰/۸۷ | ۰/۶۲ | ۲۱% |

جدول ۵- مقایسه عمق حل تحلیلی، شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی [۱۰] برای اهداف بتن- فولادی.

| سرعت برخورد (m/s) | طول پرتابه (cm) | نتایج تجربی (m) | شبیه سازی (m) | نتایج تحلیلی (m) |
|-------------------|-----------------|-----------------|---------------|------------------|
| ۱۴۷۵ | ۷/۶۶ | ۰/۲۵ | ۰/۲۴ | ۰/۴۳ |
| ۱۷۱۷ | ۱۰/۳۲ | ۰/۳۵۴ | ۰/۳۴ | ۰/۴۸۵ |
| ۱۷۷۰ | ۷/۹ | ۰/۳۳۸ | ۰/۳۵ | ۰/۳۲۲ |
| ۱۸۷۲ | ۱۰/۳۲ | ۴۰۹ | ۰/۳۵۵ | ۰/۴۱ |



شکل ۹- مقایسه عمق نفوذ حل تحلیلی، عددی با داده‌های تجربی.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله بررسی نفوذ پرتابه در اهداف بتنی و چند لایه بتن- فولادی در دو بخش تحلیلی و شبیه‌سازی عددی و مقایسه نتایج آن‌ها با تست‌های تجربی موجود صورت گرفته است. با توجه به اینکه تاکنون مدل تحلیلی مستقلی که بتواند نفوذ پرتابه‌های دارای فرسایش را در اهداف بتنی تحلیل نماید، ارائه نشده است، در بخش اول این تحقیق، مدل آلکسیوسکی-تیت (که قبلاً برای اهداف فلزی مطرح شده است) برای اهداف بتنی و تعمیم آن در اهداف چندلایه غیرهمگن، با اصلاحاتی بکار گرفته شد. برای این منظور از انطباق نتایج تجربی با داده‌های مدل تحلیلی، یک رابطه تحلیلی برای محاسبه مقاومت دینامیکی بتن (R) بر اساس استحکام فشاری آن ارائه شد. با بهره‌برداری از این رابطه، عمق نفوذ پرتابه در اهداف بتنی با استفاده از

مدل تیت و برای اهداف بتنی و با تعمیم آن برای اهداف چند لایه به دست آمد. عمق نفوذ محاسبه شده با افزایش سرعت افزایش یافته و در یک نقطه به حد ماکزیمم خود رسیده و پس از آن با توجه به فرسایش پرتابه (کاهش طول) و کاهش انرژی جنبشی و فارچی شکل شدن نوک پرتابه عمق نفوذ کاهش یافت. در تحلیل نفوذ در هدف بتنی، مدل ارائه شده جدید در مقایسه با مدل تحلیلی فورستال در سرعت‌های برخورد بالاتر جواب‌های بهتری ارائه داد. بنابر این، مدل ارائه شده می‌تواند در سرعت‌های بالا که پرتابه با فرسایش همراه است، مناسب باشد. در تحلیل نفوذ در هدف چند لایه بتن- فولادی، مدل تعمیم یافته برای اهداف چند لایه، در مقایسه با مقادیر تجربی جواب‌های خوبی خصوصاً در سرعت‌های برخورد بالاتر ارائه داد (با خطای کمتر از ۱۲ درصد). نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار LS-DYNA در مسئله تحلیل نفوذ در هدف بتنی و بتن- فولادی در مقایسه با مقادیر تجربی تطابق نسبتاً خوبی داشت و در اغلب موارد تفاوتی در حد ۵ درصد را نشان داد.

مراجع

- [1] Birkhoff G., Macdougall P. D., Pugh E. M., Taylor G. "Explosives with Lined Cavities"; J. Appl. 1948, 19, 563.
- [2] Tate, A. "A Theory for the Deceleration of Long Rods After Impact"; J. Mech. Phys. Solids 1967, 15, 387.
- [3] Alekseevskii, V. P. "Penetration of a Long Rod into Target at High Velocity"; Fiz. Goren. Vzryra 1966, 2 - 99.
- [4] Luk V. K., Forrestal M. J. "Dynamical Spherical Cavity-Expansion of Strain- Hardening Materials"; J. Appl. Mech., 1991, 58, 1-6.
- [5] Forrestal, M. J.; Itman, B. S. A; Cargile, J. D.; Hanchak, S. J. "An Empirical Equation for Penetration Depth of Ogive-Nose Projectiles into Concrete Targets"; Int. J. Impact Eng. 1993, 15, 395 - 405.
- [6] Forrestal, M. J.; Frew, D. J.; Hanchak, S. J.; Brar, N. S. "Penetration of Grout and Concrete Targets with Ogive-Nose Steel Projectiles"; Int. J. Impact Eng. 1995, 17, 465 - 476
- [7] Forrestal M. J., Luk V. K. "Dynamic Spherical Cavity-Expansion in a Compressible Elastic-Plastic Solid"; J. Appl. Mech. 1988, 55, 275-279.
- [8] Littlefield D. L., Anderson C. E., Partom Y., Bless S. J., "The Penetration of Steel Targets Finite in Radial Extent"; Int. J. Impact Eng. 1997, 19, 49-62.
- [9] Nash, P. T.; Blaylock, N. W.; Spires, S. W. "Concrete Penetration Data Base and Evaluation of Predictive Equation"; SWRI Report No. 06-8691-001, Southwest Research Institute, San Antonio, TX, 1986
- [10] Gold, V. M. "Concrete Penetration by Eroding Projectiles: Experimental and analysis"; Technical Report ARAED-TR-96014, 1996
- [۱۱] خدارحمی، حسین و فلاحی آرزودار، علیرضا و لیاقت، غلامحسین "تحلیل نفوذ پرتابه‌های میله‌ای بلند در هدف‌های نیمه‌بی نهایت و تعمیم آن در هدف‌های چند لایه"، مجله فنی و مهندسی مدرس، شماره ۶، ۱۳۸۰
- [۱۲] نظام آبادی، علیرضا "بررسی و تحلیل نفوذ میله‌های بلند در اهداف غیرهمگن لایه‌ای"، رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، ۱۳۸۹.

- [15] Vahdi, K.; Khazraian, N. "Numerical Modeling of Ballistic Penetration of Long Rods Into Ceramic/Metal Armors", 8th.Int.LS-DYNA Users Conference, 2005, 14 - 39.
- [16] Johnsonm, G. R. ; Cook, W. H. "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures"; Eng. Fracture Mech. 1985, 21, 31- 48.
- [13] LS-DYNA Manual Reference, Livermore Software Technology Corporation, 2001.
- [14] Yuh-Shiou Tai; Chia-Chin Tang "Numerical Simulation: The Dynamic Behavior of Reinforced Concrete Plates Normal Impact"; Int. J. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 2006, 117- 127.

