

## طراحی بالستیک نهایی پرتابه‌های میله‌ای بلند

حسین خدارحمی\*<sup>۱</sup>، مجتبی ذوالفقاری<sup>۲</sup>، محسن فروتن<sup>۳</sup>

تهران - دانشگاه امام حسین (ع)

(تاریخ وصول: ۸۸/۹/۱۰، تاریخ پذیرش: ۸۹/۲/۲)

### چکیده

برای تحلیل نفوذ پرتابه‌های میله‌ای بلند تاکنون مدل‌های تحلیلی متعددی ارائه شده است، که در این مدل‌ها با داشتن مشخصات پرتابه و هدف و شرایط برخورد، معمولاً تنها مجهول مسئله یعنی عمق نفوذ پرتابه بدست می‌آید. در این مقاله فرمولاسیون مدل تحلیلی آلکسیوسکی و تیت به منظور طراحی مشخصات پرتابه برای رسیدن به یک عمق نفوذ معین تغییر داده شده و با کمک روابط اضافی ناشی از محدودیت‌های انرژی جنبشی و شرط عدم کمانش پرتابه، الگوریتم جدیدی بدین منظور ارائه گردیده است. در این روش با حل همزمان این معادلات، و با معلوم بودن میزان عمق نفوذ پرتابه در هدف معلوم، مشخصات پرتابه شامل سرعت برخورد، طول، قطر و جرم آن محاسبه می‌شود. مقایسه نتایج این فرمولاسیون با مقادیر تجربی سایر محققین و حل عددی به کمک نرم افزار AUTODYN تطابق خوبی را نشان می‌دهد. بعلاوه در یک مثال عملی، طراحی بالستیک نهایی یک پرتابه میله‌ای برای رسیدن به عمق نفوذ معین، به کمک این الگوریتم، انجام شده و مشخصات پرتابه بدست آمده است.

**واژه‌های کلیدی:** بالستیک نهایی، پرتابه میله‌ای بلند، نفوذ، هدف نیمه بی‌نهایت، کمانش.

### ۱- مقدمه

بالستیک داخلی، مشخصاتی از قبیل خرج پرتاب و طول لوله پرتابگر برای رسیدن به یک سرعت دهانه معین بدست می‌آید. پرتابه‌های انرژی جنبشی با نسبت طول به قطر بالا که در منابع علمی بعنوان پرتابه‌های میله‌ای بلند شناخته شده‌اند، بدلیل چگالی و سرعت بالا، قابلیت نفوذ زیادی دارند. این پرتابه‌ها اغلب دارای سایوت بوده و میله پرتابه، قطر کمتری از کالیبر لوله پرتابگر دارد و بعلاوه پایداری آنها توسط فین تأمین می‌گردد. لذا به پرتابه‌های ضدزره فین‌دار با سایوت جداشونده (APFSDS)<sup>۴</sup> شناخته می‌شود. آلکسیوسکی (۱۹۶۶) و تیت (۶۹ و ۱۹۶۷) با در نظر گرفتن

طراحی پرتابه‌های انرژی جنبشی بطور معمول در حلقه‌ای شامل سه مرحله در حوزه‌های بالستیک نهایی، بالستیک خارجی و بالستیک داخلی انجام می‌گیرد. مشخصات اساسی اولیه پرتابه شامل طول، قطر، جرم و سرعت برخورد، برای رسیدن به یک عمق نفوذ مشخص در هدف، در حوزه بالستیک نهایی و بر مبنای مدل‌سازی مکانیک نفوذ تعیین می‌گردد. سپس در حوزه بالستیک خارجی، سرعت دهانه و هندسه خارجی پرتابه برای رسیدن به سرعت برخورد در برد معین مشخص می‌شود. در مرحله آخر در حوزه

\* E-mail: Hossein\_Khodarahmi@yahoo.com

4- Armour Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot

۱- دانشیار

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک دانشگاه امام حسین(ع)

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

برای عمق نفوذ معین، مشخصات پرتابه و سرعت برخورد مجهول است. لذا لازم است از قیود طراحی بعنوان معادلات کمکی استفاده شود.

یکی از محدودیت‌های مهم در طراحی پرتابه‌های میله‌ای بلند، پدیده کمانش پرتابه است. همچنین مقدار انرژی جنبشی پرتابه نیز یکی دیگر از محدودیت‌های اصلی طراحی پرتابه می‌باشد. لذا در اینجا علاوه بر استفاده از یک مدل تحلیلی معتبر برای ارتباط دادن بین عمق نفوذ و مشخصات پرتابه، دو موضوع عدم کمانش و محدودیت انرژی به عنوان قیود طراحی مورد توجه قرار گرفته است.

در این مقاله بر مبنای مدل AT برای نفوذ معین پرتابه‌های میله‌ای بلند در هدف‌های نیمه بی‌نهایت، فرمولاسیون لازم برای طراحی این پرتابه‌ها استخراج گردیده و با قید عدم کمانش پرتابه و محدودیت انرژی جنبشی، الگوریتمی برای تعیین مشخصات پرتابه برای رسیدن به یک عمق نفوذ معین در یک هدف معلوم ارائه گردیده است. سپس به کمک نرم‌افزار MATLAB برنامه‌ای به این منظور تهیه و مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین برای ارزیابی روش طراحی ارائه شده، اولاً مقادیر بدست آمده از روش تحلیلی با مقادیر تست‌های تجربی انجام شده توسط سایر محققین مقایسه گردیده و ثانیاً شبیه‌سازی عددی مسئله نفوذ به کمک کد AUTODYN انجام شده است. بعلاوه در یک مثال عملی، به کمک الگوریتم ارائه شده، طراحی بالستیک نهایی یک پرتابه میله‌ای برای رسیدن به عمق نفوذ معین انجام شده و مشخصات پرتابه بدست آمده است.

## ۲- خلاصه‌ای از مدل تحلیلی AT

در تئوری هیدرودینامیکی نفوذ در برخوردهای بسیار پرسرعت<sup>۱</sup>، با توجه به رفتار شبه سیال پرتابه و هدف، از معادله برنولی استفاده شده و با در نظر گرفتن محوری متحرک در جهت نفوذ که به انتهای حفره متصل شده (شکل ۱) و با نوشتن معادله برنولی در این نقطه، رابطه زیر حاصل می‌شود [۹]:

$$\frac{1}{2} \rho_p (V - U)^2 = \frac{1}{2} \rho_t U^2 \quad (1)$$

که  $V$  سرعت پرتابه،  $U$  سرعت نفوذ و  $\rho_p$  و  $\rho_t$  به ترتیب چگالی پرتابه و هدف است.

مقاومت پرتابه و هدف در تئوری هیدرودینامیکی نفوذ جت، با ارائه مدل خود، گام بزرگی در تحلیل نفوذ پرتابه‌های میله‌ای بلند در هدف‌های نیمه بی-نهایت برداشتند. این مدل که بنام مدل آلکسیوسکی و تیت (AT) و یا مدل تیت شناخته شده، در ۴۰ سال گذشته به عنوان مدل استاندارد مرجع مورد استفاده قرار گرفته و علیرغم ضعفها و محدودیت‌های آن، در تحلیل مسائل بالستیکی نفوذ بسیار مفید بوده است [۶-۱].

در مدل اولیه AT پرتابه‌های میله‌ای با نسبت طول به قطر بالا ( $L/D > 10$ ) و نفوذ فاز یکنواخت پرتابه مورد نظر قرار گرفته است. تیت در سالهای ۱۹۸۵ و ۱۹۸۶ با تخمین عمق نفوذ در فاز گذرای اولیه و فاز انتهایی نفوذ، و افزودن آن به مقدار محاسبه شده از مدل قبلی، تئوری خود را بهبود بخشید [۳]. محققین بسیاری در مورد ضعفها و محدودیت‌های مدل AT، روش حل معادلات آن، نحوه محاسبه مقاومت‌های پرتابه و هدف، کاربرد این مدل در اهداف سرامیکی و ... مقالاتی منتشر نموده اند [۸ و ۷ و ۵-۳].

تحقیقات نسبتاً وسیعی در خصوص تئوری هیدرودینامیکی و مدل AT، ضعفها و محدودیت‌ها و مراحل بهبود آن در سالهای اخیر [۹]، کاربرد تئوری هیدرودینامیکی نفوذ در هدف‌های سرامیکی و سرامیک - فلزی [۱۰]، کاربرد تئوری هیدرودینامیکی در طراحی پرتابه‌های انرژی جنبشی (KE)، وزه‌های مقاوم در برابر آن [۱۱]، تحلیل نفوذ میله‌های بلند در هدف‌های با ضخامت محدود [۱۲]، نفوذ پرتابه‌های میله‌ای بلند در هدف‌های چندلایه [۱۳]، بررسی اثر مدل ماده و پارامتر کرنش شکست در تحلیل عددی نفوذ پرتابه‌های میله‌ای بلند [۱۴]، بررسی، تحلیل و مقایسه مدل‌های نفوذ میله‌های بلند در اهداف نیمه بی‌نهایت [۱۵] و موارد دیگر در سال‌های اخیر به شکل مقاله و پایان نامه در داخل کشور انجام شده است.

اکثر مقالات منتشر شده در زمینه نفوذ پرتابه‌های میله‌ای، با نگاه "تحلیل" پدیده و تعیین مشخصاتی از قبیل عمق نفوذ در هدف نیمه بی‌نهایت و یا محاسبه سرعت حد بالستیک در هدف‌های با ضخامت محدود بوده است. در حالی که، در این مقاله موضوع نفوذ از نگاه متفاوت "طراحی" مورد توجه قرار گرفته و روش طراحی پرتابه، بر مبنای یک مدل تحلیلی مشخص ارائه شده و در انتها در یک مثال کاربردی مشخصات پرتابه بدست آمده است.

لازم به ذکر است در مسائل "تحلیل نفوذ"، کلیه مشخصات پرتابه از قبیل طول، قطر، جرم و سرعت برخورد معلوم بوده و با تعریف هدف معلوم، تنها مجهول مسئله عمق نفوذ پرتابه است. در حالی که در مسئله "طراحی پرتابه"

1- Hypervelocity

$$P = \frac{\rho_p V_p}{Y_p} \int_0^{V_p} U L dV \quad (10)$$

با جاگذاری  $U$  بر حسب  $V$  از رابطه (۴) و  $L$  بر حسب  $V$  از رابطه (۸) و انتگرال گیری از رابطه اخیر، عمق نفوذ محاسبه می شود. در حالتی که  $R_t > Y_p$  باشد، با قراردادن  $U = 0$  در رابطه (۳)، سرعت بحرانی  $V_C$  که بازه آن و مقادیر کمتر نفوذ متوقف می شود، بدست می آید:

$$V_C = \sqrt{2(R_t - Y_p) / \rho_p} \quad (11)$$

و در حالتی که  $R_t < Y_p$  باشد، با قراردادن  $V = U$  در رابطه (۳)، سرعت حدی  $V_S$  که بازه آن و مقادیر کمتر، پرتابه بصورت صلب و بدون تغییر شکل نفوذ خواهد داشت، بدست می آید:

$$V_S = \sqrt{2(Y_p - R_t) / \rho_t} \quad (12)$$

تیت مقاومت پرتابه،  $Y_p$ ، را با حد الاستیک هاگونیوت<sup>۱</sup> (تنش تسلیم تحت شرایط کرنش یک محوری، HEL) تقریب زد و از آزمایش های انجام گرفته بر روی پرتابه و هدف فولادی به این نتیجه رسید که مقاومت هدف  $R_t$  تقریباً ۳/۵ برابر HEL هدف است [۱]. او چندین سال بعد، بر مبنای نتایج تجربی حاصل از آلیاژهای آلومینیوم، فولاد و تنگستن مقادیر مقاومت های پرتابه و هدف را بصورت زیر پیشنهاد داد [۱۳]:

$$Y_p = 1.7 \sigma_{yp} \quad (13)$$

$$\sigma_{yp} = 4.2 BHN \quad (14)$$

$$R_t = \sigma_{yt} \left[ \frac{2}{3} + \ln \frac{0.57 E_t}{\sigma_{yt}} \right] \quad (15)$$

که در آن  $BHN$  و  $\sigma_{yp}$  به ترتیب مقاومت تسلیم دینامیکی برای تنش یک بعدی و سختی برینل پرتابه و  $E_t$  و  $\sigma_{yt}$  به ترتیب مقاومت تسلیم فشاری و مدول یانگ هدف و  $\ln$  علامت لگاریتم طبیعی می باشد.

### ۳- کمناش دینامیکی پرتابه های میله ای بلند

با برخورد یک پرتابه میله ای بلند به یک هدف صلب، بسته به سرعت برخورد، موج تنش الاستیک و بعد از آن موج تنش پلاستیک از سطح برخورد به سمت انتهای دیگر میله منتشر می شود [۱۷]. تحلیل کمناش دینامیکی میله ها در اثر برخورد به سطح صلب، از موضوعاتی است که کمتر روی آن کار

با استفاده از رابطه (۱)، عمق نفوذ هیدرودینامیکی پرتابه بشکل زیر بدست می آید [۹]:

$$P = L \sqrt{\rho_p / \rho_t} \quad (2)$$

آلکسیوسکی (۱۹۶۶) و تیت (۱۹۶۹ و ۱۹۶۷) با در نظر گرفتن مقاومت پرتابه  $Y_p$  و مقاومت هدف  $R_t$  در رابطه (۱)، تئوری هیدرودینامیکی را برای تحلیل نفوذ پرتابه های میله ای بلند در محدوده سرعت های بالا بهبود دادند [۱۶ و ۳]:

$$\frac{1}{2} \rho_p (V-U)^2 + Y_p = \frac{1}{2} \rho_t U^2 + R_t \quad (3)$$

از رابطه اخیر سرعت نفوذ بر حسب سرعت پرتابه به شکل زیر بدست می آید:

$$U = \frac{1}{1-\mu^2} [V - \mu \sqrt{V^2 + B}] \quad (4)$$

$$\mu = \sqrt{\rho_t / \rho_p}, \quad B = 2 \frac{(R_t - Y_p)(1 - \mu^2)}{\rho_t}$$

همچنین به کمک معادله حرکت و نرخ فرسایش میله می توان نوشت:

$$\rho_p L \frac{dV}{dt} = -Y_p \quad (5)$$

$$\frac{dL}{dt} = -(V-U) \quad (6)$$

با ادغام روابط (۵) و (۶):

$$\frac{dL}{dt} = \frac{\rho_p (V-U)}{Y_p} dV \quad (7)$$

با جاگذاری  $U$  از رابطه (۴) در (۷) و انتگرال گیری، رابطه  $L$  بر حسب  $V$  بدست می آید:

$$\frac{L}{L_0} = \left[ \frac{V + (V^2 + B)^{\frac{1}{2}}}{V_0 + (V_0^2 + B)^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{R-Y}{\mu Y}} \times \quad (8)$$

$$\exp \left\{ \frac{\mu \rho_p}{2(1-\mu^2)Y} \left[ \frac{V(V^2 + B)^{\frac{1}{2}} - \mu V^2}{- \left[ V_0(V_0^2 + B)^{\frac{1}{2}} - \mu V_0^2 \right]} \right] \right\}$$



شکل ۱- نفوذ هیدرودینامیکی در برخوردهای بسیار پرسرعت.

که  $L_0$  و  $V_0$  به ترتیب طول و سرعت اولیه پرتابه اند.

همچنین عمق نفوذ پرتابه برابر است با:

$$P = \int_0^t U dt \quad (9)$$

که به کمک رابطه (۵) می توان نوشت:

1- Hugoniot Elastic Limit

قابل توجه است که رابطه (۲۱) تقریباً مقدار متوسطی از مقادیر بدست آمده از رابطه های (۱۹) و (۲۰) برای تکیه‌گاه‌های ساده و گیردار را می‌دهد.

جانسون نیز طول موج ناپایداری را برای یک میله استوانه‌ای توپر به قطر  $D$  را که تحت اثر موج تنش  $\sigma$  قرار گرفته بصورت زیر داده است [۱۷]، که رابطه (۲۱) را تأیید می‌کند:

$$L_{cr} = \pi D \sqrt{\frac{E}{2\sigma}} \quad (22)$$

جهت مقایسه، نسبت طول به قطر بحرانی در تحلیل کمانش استاتیکی به کمک فرمول‌های اوپلر و جانسون [۲۲] رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{L_{cr}}{D} < \pi \sqrt{\frac{E}{8Y}} = 1.11 \sqrt{\frac{E}{Y}} \quad (23)$$

که نشان می‌دهد نسبت بحرانی کمانش دینامیکی تقریباً دو برابر مقدار استاتیکی است.

با معلوم بودن مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت تسلیم پرتابه، از روابط فوق نسبت  $L/D$  بحرانی کمانش بدست می‌آید. در این مقاله نسبت  $L/D$  برای تأمین شرط عدم کمانش بعنوان یک رابطه کمکی مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۴- الگوریتم طراحی پرتابه‌های میله‌ای بلند

طراحی پرتابه در مرحله بالستیک نهایی، با هدف ایجاد عمق نفوذ معین  $P$  در هدف معلوم صورت می‌گیرد و پارامترهای اصلی پرتابه از قبیل طول  $L$ ، قطر  $D$ ، جرم  $M$  و سرعت برخورد  $V_0$  بدست می‌آید. با استفاده از مدل تحلیلی AT، عمق نفوذ  $P$  به کمک رابطه (۱۰) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$P = \frac{\rho_p}{Y_p} \int_{V_C}^{V_0} U \left(\frac{L}{L_0}\right) L_0 dV \quad (24)$$

و با معلوم بودن مقدار عمق نفوذ  $P$ ، از رابطه اخیر طول اولیه  $L_0$  خواهد شد:

$$L_0 = P / \left[ \frac{\rho_p}{Y_p} \int_{V_C}^{V_0} U \left(\frac{L}{L_0}\right) dV \right] \quad (25)$$

که با داشتن  $U$  از رابطه (۴) و  $L/L_0$  از رابطه (۸) و انتگرال‌گیری از رابطه اخیر طول اولیه  $L_0$  بر حسب سرعت برخورد مجهول  $V_0$  برای عمق نفوذ معین  $P$  به شکل تابع زیر بدست می‌آید:

$$L_0 = f(V_0) \quad (26)$$

شده است. اخیراً ونگ و همکارانش مکانیزم کمانش دینامیکی میله‌ها در اثر انتشار موج تنش را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۲۰-۱۸]. در این مدل، کوچکترین زمان کمانش بحرانی  $t_{cr}$ ، متناظر است با اولین مود کمانش دینامیکی. در این لحظه، طولی از میله که تنش محوری را حس کرده برابر است با  $L_{cr} = Ct_{cr}$  که بعنوان طول کمانش دینامیکی بحرانی تعریف می‌شود و  $C$  سرعت انتشار صوت در میله است. رابطه بین تنش فشاری محوری  $\sigma_{cr}$  با  $t_{cr}$  برای اولین مود کمانش دینامیکی بصورت زیر است:

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}^{(1)}}{A} = \frac{\beta_1^{(1)} EI}{AC^2 t_{cr}^2} \quad (16)$$

که  $N_{cr}^{(1)}$  نیروی فشاری بحرانی در میله مربوط به اولین مود کمانش،  $\beta_1^{(1)}$  پارامتر تنش بحرانی و  $E$ ،  $I$  و  $A$  به ترتیب مدول یانگ، ممان اینرسی مقطع و سطح مقطع میله است. از رابطه اخیر، طول بحرانی کمانش به صورت زیر بدست می‌آید:

$$L_{cr} = \sqrt{\frac{\beta_1^{(1)} EI}{\sigma_{cr} A}} \quad (17)$$

که پارامتر  $\beta_1^{(1)}$  برای وضعیت تکیه‌گاه‌های ساده برابر  $5\pi^2$  و برای تکیه‌گاه‌های گیردار  $10\pi^2$  است [۱۹].

با توجه به اینکه شدت موج تنش الاستیک منتشر شده در میله در سرعت برخورد مورد نظر برابر تنش تسلیم  $Y$  است [۱۷]، و با جاگذاری  $I$  و  $A$  بر حسب قطر، از رابطه (۱۷) می‌توان نوشت:

$$\frac{L_{cr}}{D} = \sqrt{\frac{\beta_1^{(1)} E}{16 Y}} \quad (18)$$

نسبت طول به قطر بحرانی برای شرایط تکیه‌گاهی ساده و گیردار خواهد شد: تکیه‌گاه ساده:

$$\frac{L_{cr}}{D} = \pi \sqrt{\frac{5}{16}} \frac{E}{Y} = 1.76 \sqrt{\frac{E}{Y}} \quad (19)$$

تکیه‌گاه گیردار:

$$\frac{L_{cr}}{D} = \pi \sqrt{\frac{10}{16}} \frac{E}{Y} = 2.48 \sqrt{\frac{E}{Y}} \quad (20)$$

همچنین روبین و یارین به روش دیگری یک مقدار حدی برای کمانش دینامیکی میله‌ها پیشنهاد داده‌اند [۲۱]. بر مبنای این تئوری با شرط زیر کمانش در میله اتفاق نمی‌افتد:

$$\frac{L_{cr}}{D} < \pi \sqrt{\frac{E}{2Y}} \quad (\approx 2.22 \sqrt{\frac{E}{Y}}) \quad (21)$$

$$L_o = \left[ \frac{8C_E C_B^2}{\rho\pi V_o^2} \right]^{1/3} \quad (32)$$

بنابراین، ترکیب شرط عدم کماتش و محدودیت انرژی جنبشی منجر به رابطه‌ای برای  $L_o$  بر حسب  $V_o$  خواهد شد که بشکل تابع زیر می‌تواند نوشته شود:

$$L_o = g(V_o) \quad (33)$$

از حل همزمان روابط (۲۵) و (۳۲) پارامترهای  $L_o$ ،  $V_o$  بدست می‌آید. سپس از معیار کماتش (رابطه ۲۷) قطر پرتابه  $D$  و از محدودیت انرژی (رابطه ۲۸) مقدار جرم پرتابه  $M$  بدست می‌آید. از حل معادلات فوق ممکن است یک سری جواب و یا جواب‌های متمایزی حاصل شود و یا اینکه هیچ جوابی بدست نیاید. جواب نداشتن معادلات به این معنی است که سطح انرژی و نسبت طول به قطر داده شده نمی‌تواند منجر به عمق نفوذ مورد نظر شود. مسیر طراحی پرتابه در شکل ۲ خلاصه شده است.

در مسائل طراحی پرتابه‌ها، به کمک این روش می‌توان مشخصات اصلی پرتابه و سرعت برخورد را در مرحله بالستیک نهایی بدست آورد و سایر مشخصات از قبیل سرعت دهانه، هندسه دماغه و فین، توزیع جرم، و نوع و میزان خرج پرتاب را از مراحل بالستیک خارجی و داخلی تعیین نمود.

با توجه به شرط عدم کماتش پرتابه پس از برخورد به سطح هدف، از رابطه (۲۱) و با در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان مناسب می‌توان نوشت:

$$\frac{L_o}{D} = \frac{2.22}{S.F.} \sqrt{\frac{E}{Y}} = C_B \quad (27)$$

بنابراین، شرط عدم کماتش به یک حد معین و ثابت  $C_B$  برای نسبت  $\frac{L_o}{D}$  منجر می‌گردد.

از سوی دیگر با توجه به اینکه میزان انرژی جنبشی که پرتابگر می‌تواند به پرتابه منتقل نماید محدود است، می‌توان مقدار ثابت  $C_E$  را برای حداکثر انرژی در نظر گرفت:

$$\frac{1}{2} M V_o^2 = C_E \quad (28)$$

که جرم پرتابه  $M$  برابر است با:

$$M = \rho L_o \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (29)$$

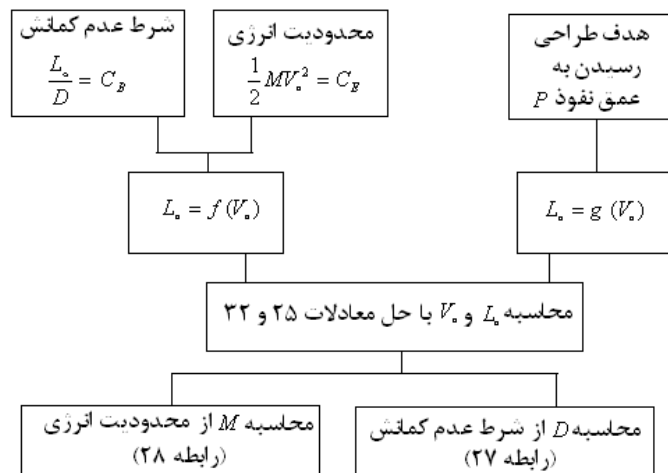
با حذف  $M$  از روابط (۲۸) و (۲۹)،  $L_o$  خواهد شد:

$$L_o = \frac{8C_E}{\rho\pi} \frac{1}{D^2 V_o^2} \quad (30)$$

و با جاگذاری  $D$  از رابطه (۲۷) در (۳۰) می‌توان نوشت:

$$L_o = \frac{8C_E}{\rho\pi} \frac{1}{\left(\frac{L_o}{C_B}\right)^2 V_o^2} \quad (31)$$

و یا:



شکل ۲- نمودار مسیر طراحی پرتابه.

## ۵- نتایج و بحث

## ۵-۱- مقایسه با مقادیر تجربی

جدول ۱- مقاومت های  $Y_p$  پرتابه و  $R_f$  هدف.

$\sigma_{yp}$ (MPa)	$Y_p$ (MPa)	$\sigma_{yt}$ (MPa)	$E_t$ (MPa)	$R_f$ (MPa)
۱۵۰۶	۲۵۶۰	۷۹۲	۲۱۱۰۴۴	۴۵۰۶۳۳

در جدول (۲) مقادیر تجربی از مرجع [۲۳] و مقادیر تحلیلی از روش ارائه شده در این مقاله داده شده است. مقایسه مشخصات بکار رفته برای پرتابه در آزمایش‌های تجربی با مقادیر پیشنهادی از روش تحلیلی نشان می‌دهد، روش تحلیلی ارائه شده دقت خوبی داشته و می‌تواند مبنای طراحی اولیه پرتابه‌های میله‌ای قرارگیرد. برای محاسبه مقادیر طول پرتابه  $L_0$  و سرعت برخورد  $V_0$  به کمک نرم افزار MATLAB دو منحنی بدست آمده از روابط ۲۵ و ۳۲ رسم شده و محل تلاقی آنها تعیین شده است. به عنوان نمونه برای آزمایش شماره ۰۶۸۸ از مرجع ۲۳، مطابق شکل (۳) مشاهده می‌شود که از برخورد منحنی‌های نفوذ و قیود انرژی-کمانش، دو نقطه طراحی متمایز بصورت جدول (۳) بدست آمده است.

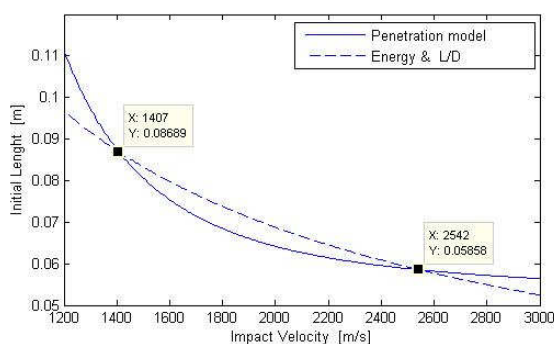
در این قسمت برای ارزیابی فرمولاسیون تحلیلی ارائه شده، با توجه به اینکه نفوذ پرتابه تنگستنی در هدف فولادی از نظر کاربردی جالب‌تر و مورد توجه بیشتری می‌باشد، از نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده توسط چارترز و همکارانش کمک گرفته شده، که در آن از یک سری آزمایش‌های بالستیکی با پرتابه‌های تنگستنی و اهداف فولادی ۴۳۴۰، عمق نفوذ بدست آمده است [۲۳].

در فرمولاسیون تحلیلی، عمق نفوذ بدست آمده از آزمایش‌ها و همچنین میزان انرژی جنبشی و نسبت  $L/D$  را معلوم فرض کرده و مقادیر مشخصات پرتابه شامل طول، سرعت، قطر و جرم بدست آمده از فرمولاسیون با مقادیر مشخصات پرتابه در تست‌های تجربی مقایسه شده است.

با تخمین مقاومت تسلیم پرتابه و هدف از پارامتر  $A$  از ضرائب مدل جانسون-کوک تنگستن و فولاد ۴۳۴۰ [۲۴]، مقادیر مقاومت‌های  $Y_p$  پرتابه و  $R_f$  هدف از روابط (۱۳) و (۱۵) در جدول (۱) تعیین شده‌اند.

جدول ۲- مشخصات پرتابه از تست‌های تجربی [۲۳] و مقادیر تحلیلی بدست آمده در این تحقیق (E, A, % به ترتیب به معنی مقادیر تجربی، تحلیلی و درصد اختلاف آنها است).

$L_0$ (mm)			$V_0$ (m/s)			D (mm)			M (gr)			عمق نفوذ (mm)	$\frac{1}{2}MV_0^2$ (J)	$\frac{L}{D}$	شماره آزمایش
E.	A.	%	E.	A.	%	E.	A.	%	E.	A.	%				
۵۸,۵۰	۵۵/۶۶	۴/۸	۲۵۱۰	۲۷۱۲	۸/۰	۴,۵۰	۴,۸۸	۸/۴	۱۶,۰۰	۱۳,۷۰	۱۴/۳	۷۴,۱	۵۰۴۰۰,۸	۱۳	۰۶۸۷
۵۸,۵۰	۵۸/۶۰	۰/۲	۲۵۴۰	۲۵۴۲	۰/۱	۴,۵۰	۴,۵۱	۰/۲	۱۶,۰۰	۱۵,۹۷	۰/۲	۷۶,۶	۵۱۶۱۲,۸	۱۳	۰۶۸۸
۲۷,۷۰	۲۸/۵۴	۳/۰	۱۸۳۰	۱۸۱۲	۱/۰	۵,۵۴	۵,۷۱	۳/۰	۱۲,۲۴	۱۲,۴۸	۲/۰	۳۲,۸	۲۰۴۹۵,۳	۵	۰۷۶۲



شکل ۳- طول اولیه بر حسب سرعت برخورد از مدل نفوذ و قید کمانش-انرژی.

برای مشبندی پرتابه از المان‌های یکسان و برای هدف، در اطراف محل برخورد، از المانهای هم اندازه با المان‌های پرتابه و در نقاط دورتر، از المان‌های درشت‌تر استفاده شده است. برای بررسی اندازه مناسب المان‌ها، پرتابه و هدف در پنج حالت مشبندی شده است. در جدول (۶) تعداد المان‌های بکار رفته در هر حالت ارائه شده است. عمق نفوذ بدست آمده از حالت‌های سوم تا پنجم تقریباً برابر بوده و همگرایی حل را نشان می‌دهد. در شکل (۴)، مراحل نفوذ پرتابه در لحظات مختلف از لحظه برخورد تا انتهای نفوذ در زمان ۶۶ میکروثانیه، برای حالت چهارم از جدول (۶) نشان داده شده، که عمق نفوذ ۸۳ میلی‌متر از حل عددی بدست آمده است. در جدول (۷) مقادیر عمق نفوذ بدست آمده از حل عددی و حل تحلیلی (رابطه ۱۰) با مقدار تجربی [۲۳] مقایسه شده که تطابق نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد.

به عبارت دیگر بر اساس شرایط مسئله از نظر میزان عمق نفوذ مطلوب با محدودیت‌های انرژی و  $L/D$  دو جواب کاملاً متمایز بدست آمده است، که با توجه به شرایط و ملاحظات دیگر یکی از آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول (۲) جوابهای نقطه برخورد دوم لحاظ شده است. چنانچه از حل معادلات فوق هیچ جوابی حاصل نشود، بیانگر این است که پرتابه‌ای با سطح انرژی و نسبت طول به قطر داده شده نمی‌تواند عمق نفوذ مورد نظر را تأمین نماید.

## ۵-۲- شبیه سازی عددی نفوذ پرتابه

برای مقایسه نتایج، مشخصات آزمایش نفوذ ۰۶۸۸ [۲۳]، به کمک نرم افزار AUTODYN بصورت متقارن محوری شبیه‌سازی شده است. بدین منظور برای پرتابه تنگستنی و هدف فولادی ۴۳۴۰ از مدل مادی جانسون-کوک با ضرایبی مطابق جدول (۴) و معادله حالت گرونینزن<sup>۱</sup> مطابق جدول (۵) استفاده شده است.

جدول ۳- دو سری جواب تحلیلی بدست آمده برای مشخصات پرتابه.

مشخصات پرتابه	جواب اول	جواب دوم
$L_o$ (mm)	۸۶٫۷	۵۸٫۶
$V_o$ (m/s)	۱۴۰٫۷	۲۵۴۲
$D_o$ (mm)	۶٫۶۷	۴٫۵
$M_o$ (gr)	۵۱٫۸۰	۱۵٫۹۱

جدول ۴ - ضرایب مدل مادی جانسون - کوک برای پرتابه و هدف [۲۴].

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$G$ (GPa)	$A$ (MPa)	$B$ (MPa)	$n$	$c$	$m$	$T_m$ (°K)
Tungsten	۱۷۰۰۰	۱۶۰	۱۵۰۶	۱۷۷	۰٫۱۲	۰٫۰۱۶	۱	۱۷۲۳
Steel 4340	۷۸۳۰	۸۱٫۸	۷۹۲	۵۱۰	۰٫۲۶	۰٫۰۱۴	۱٫۰۳	۱۷۹۳

جدول ۵ - ضرایب معادله حالت گرونینزن برای پرتابه و هدف [۲۵].

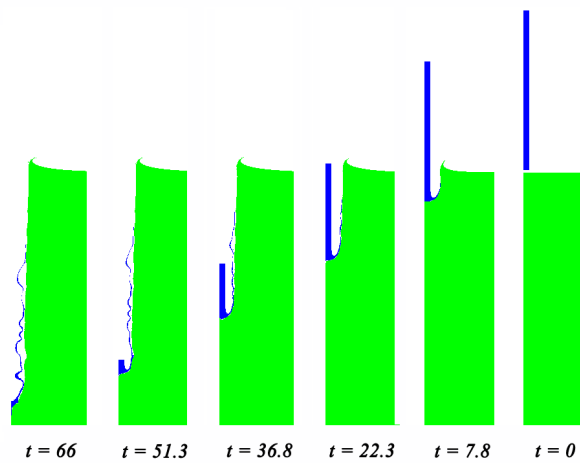
	$C_1$ (m/ms)	$S_1$	$\gamma$	$C_p$ (kJ/kg)	$T_r$ (°K)
Tungsten	۳/۸۵	۱/۴۴	۱/۵۸	۰/۰۰۰۱۳۴	۲۹۳
Steel 4340	۴/۵	۱/۴۹	۲/۱۷	۰/۰۰۰۴۷۷	۲۹۳

جدول ۶ - تعداد امان های پرتابه و هدف در مسیر همگرایی حل.

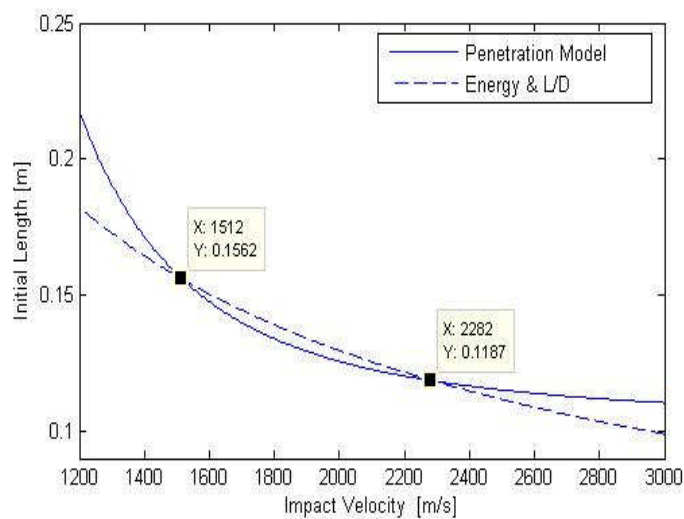
حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم	حالت پنجم	
۳۲۵	۱۳۰۰	۲۹۲۵	۵۲۰۰	۸۱۲۵	پرتابه
۴۱۷۵۰	۱۶۷۰۰۰	۳۷۵۷۵۰	۶۶۸۰۰۰	۱۰۴۲۵۰۰	هدف

جدول ۷ - عمق نفوذ بدست آمده از سه روش برای مشخصات آزمایش شماره ۰۶۸۸.

روش	حل تحلیلی (رابطه ۱۰)	حل عددی (AUTODYN)	مقدار تجربی [۲۳]
عمق نفوذ (mm)	۷۶/۵	۸۳/۰	۷۶/۶



شکل ۴ - مراحل نفوذ پرتابه تنگستنی در هدف فولادی ( زمان بر حسب میکروثانیه)



شکل ۵ - طول اولیه بر حسب سرعت برخورد از مدل نفوذ AT و قید کمانش - انرژی برای نمونه واقعی.



جدول ۸- دو سری جواب تحلیلی بدست آمده برای مشخصات پرتابه واقعی.

مشخصات پرتابه	جواب اول	جواب دوم
$L_o$ (mm)	۱۵۶/۲	۱۱۸/۷
$V_o$ (m/s)	۱۵۱۲	۲۲۸۲
$D_o$ (mm)	۹/۲	۷/۰
$M_o$ (gr)	۱۳۷/۱	۷۶/۸

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی نفوذ یکی از نمونه‌ها، توسط نرم افزار AUTODYN نشان می‌دهد که نتایج تحلیلی و تجربی خیلی نزدیک به یکدیگر بوده و حل عددی کمی بالاتر از آنها قرار دارد. یک نکته جالب در حل معادلات بدست آمده به منظور طراحی پرتابه، این است که این معادلات می‌تواند منجر به جواب‌های کاملاً متمایز شود و یا هیچ جوابی حاصل نگردد. جواب‌های متمایز نشانگر نقاط طراحی متفاوت است و عدم حصول جواب به معنی این است که سطح انرژی و  $L/D$  تعریف شده، عمق نفوذ مورد نظر را تأمین نمی‌کند.

بعنوان یک مثال عملی، طراحی یک پرتابه میله‌ای تنگستنی به منظور نفوذ در هدف فولادی ۴۳۴۰ به میزان ۱۵۰ میلیمتر، انجام گرفته است. با در نظر گرفتن سطح انرژی حدود ۲۰۰ کیلو ژول و نسبت طول به قطر ۱۷، به کمک الگوریتم ارائه شده دو سری جواب متمایز (مطابق جدول ۸) بدست آمده است.

## مراجع

- [1]. Tate, A. "A Theory for the Deceleration of Long Rods after Impact."; J. Mech. Phys. Solids. 1967, 15, 387-399.
- [2]. Herrmann, W.; Wilbeck, J. S. "Review of Hypervelocity Penetration Theories."; Int. J. Impact Eng. 1987, 5, 307-322.
- [3]. Zukas, A. "High Velocity Impact Dynamics."; Wiley, New York, 1990.
- [4]. Rosenberg, Z.; Dekel, E. "A Critical Examination of the Modified Bernoulli Equation Using Two-Dimensional Simulation of Long Rod Penetrators."; Int. J. Impact Eng. 1994, 15, 711-720.
- [5]. Anderson, C. E.; Walker, J. D. "An Examination Long-Rod Penetration."; Int. J. Impact Eng. 1991, 11, 481-492.
- [6]. Orphal, D. L.; Franzen, R. R. "Penetration of Confined Silicon Carbide Targets by Tungsten Long Rods at Impact Velocities from 1.5 to 4.6 km/s."; Int. J. Impact Eng. 1997, 19, 1-13.

## ۶- طراحی پرتابه میله‌ای نمونه با شرایط واقعی

با توجه به اینکه هدف از طراحی پرتابه در مرحله بالستیک نهایی، رسیدن به عمق نفوذ معینی در یک هدف معلوم می‌باشد، به عنوان یک مسئله نمونه عملی، طراحی پرتابه‌ای تنگستنی با عمق نفوذ معلوم ۱۵۰mm در هدف فولادی ۴۳۴۰ را می‌توان مدنظر قرار داد. با در نظر گرفتن انرژی جنبشی اولیه پرتابه‌ای مشابه از نوع APFSDS-T MK 268 به میزان ۲۲۵۰۰۰ ژول [۲۶] و با فرض ۱۰ درصد افت انرژی در طی مسیر پرواز [۲۷]، انرژی جنبشی پرتابه در لحظه برخورد معادل ۲۰۲۵۰۰ ژول لحاظ می‌گردد. بعلاوه با توجه به شرط عدم کماتش (رابطه ۲۷ نسبت  $L/D$  به ۱۷ محدود می‌شود. با رسم نمودارهای  $L_o$  بر حسب  $V_o$  از روابط ۲۵ و ۳۲ (شکل ۵)، از محل برخورد منحنی‌ها، دو سری جواب مطابق جدول (۸) بدست می‌آید، که هر دو سری جواب در شرایط یکسان انرژی و نسبت طول به قطر، عمق نفوذ مورد نظر را تأمین می‌کنند. بر اساس ملاحظات دیگر، یکی از این دو سری جواب انتخاب شده و بعنوان طراحی اولیه پرتابه مد نظر قرار می‌گیرد و بدنبال آن سایر مشخصات نیز بدست می‌آید.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله فرمولاسیون مدل تحلیلی آلکسیوسکی و تیت با هدف طراحی پرتابه و تعیین مشخصات آن تغییر داده شده و به کمک روابط اضافی بدست آمده از محدودیت‌های انرژی جنبشی و شرط عدم کماتش، الگوریتمی ارائه شده که به کمک آن می‌توان از مقدار معلوم عمق نفوذ به مشخصات پرتابه شامل سرعت برخورد، طول، قطر و جرم آن رسید. برای ارزیابی روش ارائه شده، نتایج عمق نفوذ تجربی بدست آمده توسط چارترز و همکارانش، بعنوان ورودی الگوریتم داده شد و مشخصات پرتابه بدست آمده از روش تحلیلی با پرتابه آزمایش شده مقایسه گردید که تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

- [17]. Johnson, W. "Impact Strength of Materials", 1970.
- [18]. Wang, A.; Tian, W. "Mechanism of Buckling Development in Elastic Bars Subjected to Axial Impact."; *Int. J. Impact Eng.* 2007, 34, 232-252.
- [19]. Wang, A.; Tian, W. "Twin-Characteristic-Parameter Solution for Dynamic Buckling of Columns under Elastic Compression Wave."; *Int. J. Solids & Structures.* 2002, 39, 861-877.
- [20]. Wang, A.; Tian, W. "Characteristic-Value Analysis for Plastic Dynamic Buckling of Columns under Elastoplastic Compression Waves."; *Int. J. Non-Linear Mechanics.* 2003, 38, 615-628.
- [21]. Rubin, M. b.; Yarin, A. L. "A Generalized Formula for the Penetration Depth of Deformable Projectile", *Int. J. Impact Eng.* 2002, 27, 387-398.
- [22]. Hamrock, B. J.; Jacobson, B.; Schmid, S. R. "Fundamentals of Machine Elements."; Mc Graw-Hill, 1999.
- [23]. Anderson, C. E. "Penetration Mechanics Database."; 1992, A31.
- [24]. Carleone, J. "Tactical Missile Warheads.", *Progress in Astronautics and Aeronautics.* 1993, 155.
- [25]. Anderson, C. E. "on the Hydrodynamics Approximation Long Rod Penetration."; *Int. J. impact Eng.* 1999, 22, 23-43.
- [26]. "Jane's Ammunition Handbook."; 2004-2005.
- [27]. گزارش پروژه طراحی اولیه پرتابه APFSDS، مرکز تحقیقات بالستیک، ضربه و انفجار دانشگاه امام حسین (ع). ۱۳۸۸.
- [7]. Rozenberg, Z.; Tsaligh, J. "Applying Tates Models for Long Rods Projectiles with Ceramic Targets."; *Int. J. Impact Eng.* 1990, 9, 2431-2439.
- [8]. Walters, W.; Williams, C.; Normandia, M. "An Explicit Solution of the Alekseevskii –Tate Penetration Equations."; *Int. J. Impact Eng.* 2006, 33, 837-846.
- [۹]. خداحمی، ح.، لیاقت، غ.، فلاحی آرزو دار، ع.، "بررسی تئوری هیدرودینامیکی نفوذ پرتابه‌های انرژی جنبشی بلند"، هفتمین کنفرانس مهندسی مکانیک، جلد ۱، ۱۳۷۸.
- [۱۰]. خداحمی، ح.، فلاحی آرزو دار، ع.، لیاقت، غ.، "بررسی نفوذ پرتابه‌های میله‌ای بلند در هدف‌های سرامیکی و سرامیک - فلزی"، هفتمین کنفرانس مهندسی مکانیک، ۱۳۷۸.
- [۱۱]. خداحمی، ح.، لیاقت، غ.، فلاحی آرزو دار، ع.، "کاربرد تئوری هیدرودینامیکی در طراحی موشک‌های K.E. و زره‌های مقاوم در برابر آن"، اولین همایش سراسری موشک‌های هدایت شونده ضد زره در رزم زمینی، ۱۳۷۹.
- [۱۲]. خداحمی، ح.، فلاحی آرزو دار، ع.، لیاقت، غ.، "تحلیل نفوذ در هدف‌های با ضخامت محدود"، نهمین کنفرانس مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، ۱۳۷۹.
- [۱۳]. لیاقت، غ.، خداحمی، ح.، فلاحی آرزو دار، ع.، "تحلیل نفوذ پرتابه‌های میله‌ای بلند در هدف‌های نیمه بی‌نهایت و تعمیم آن در هدف‌های چند لایه"، مجله فنی و مهندسی مدرس، شماره ششم، ۱۳۸۰.
- [۱۴]. خداحمی، ح.، خلجی، ر.، "تحلیل نفوذ پرتابه‌های میله‌ای بلند به کمک کد LS-DYNA و بررسی اثر نوع مدل ماده و پارامتر کرنش شکست"، دومین کنفرانس سازمان هوا و فضا، ۱۳۸۱.
- [۱۵]. قاسمی نیا، ع.، "بررسی، تحلیل و مقایسه مدل‌های نفوذ میله‌های بلند در اهداف نیمه بی‌نهایت"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امام حسین (ع)، ۱۳۷۹.
- [16]. Tate, A.; Billington, E. W. "The Physics of Deformation and Flow."; McGraw-Hill, 1981.