

ارائه مدل تحلیلی نفوذ جهت تخمین طول باقیمانده نفوذکننده‌های میله بلند

عباس سیفی پور*^۱، مصطفی عطارخراسانی^۲

۱ و ۲ - سازمان صنایع دفاع

(تاریخ وصول: ۸۷/۱۱/۱۳، تاریخ پذیرش: ۸۸/۴/۲۳)

چکیده

نتایج تئوری تیت در تحلیل میزان نفوذ پرتابه‌ها با نتایج تجربی و شبیه‌سازیهای عددی مطابقت خوبی دارد. با این وجود، این مدل دارای اختلافاتی در ابتدا و انتهای پروسه نفوذ می‌باشد. به عنوان مثال، مدل تیت نمی‌تواند طول باقیمانده‌ی پرتابه در هدف را پس از پایان پروسه نفوذ، به درستی پیش‌بینی نماید. اکثر مدل‌های تحلیلی دیگر نیز قادر نیستند با دقت مناسبی طول باقیمانده‌ی پرتابه را تخمین بزنند. در این مقاله، به ارائه‌ی مدل نفوذ جهت تخمین طول باقیمانده‌ی پرتابه‌ی میله بلند سرعت بالادر اصابت به اهداف نیمه بینهایت پرداخته شده است. اساس روش ارائه شده بر مبنای معادله تیلور و معادلات موج هاگونیوت می‌باشد و می‌تواند علاوه بر پیش‌بینی میزان نفوذ پرتابه‌ها، تحلیل درستی از طول باقیمانده‌ی پرتابه نیز ارائه نماید. قابلیت دیگر این مدل تعیین سرعت‌های پربازده نفوذ می‌باشد که در این تحقیق، تطابق موضوع با داده‌های تجربی بررسی گردیده است. جهت اعتبار سنجی مدل، سه مثال با شرایط متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج این روش با نتایج حاصل از تئوری والکر آندرسون، تیت، نتایج عددی و تست‌های تجربی مقایسه شده و صحت پیش‌بینی مدل نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: پرتابه میله بلند، معادلات هاگونیوت، طول باقیمانده‌ی پرتابه، هدف نیمه بینهایت، تئوری نفوذ تیت.

۱. مقدمه

نفوذ، هر دو بر اساس شناخت پدیده‌ی نفوذ در هدف انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر در تحلیل مسائل نفوذ، تمام پارامترهای مورد نظر در پرتابه که می‌تواند عمق نفوذ را افزایش دهد در جهت طراحی پرتابه مورد بهره برداری قرار می‌گیرد و از سوی دیگر، پارامترهای مرتبط با هدف که در کاهش عمق نفوذ تأثیر دارند در طراحی زره می‌توانند به کار روند [۸]. نفوذ پرتابه‌های میله‌ای بلند مافوق سرعت، به دلیل اینکه در آنها تنش‌های ایجاد شده خیلی

تحلیل نفوذ پرتابه‌ی پر سرعت در هدف و شناخت عوامل مؤثر بر آن، شاخه‌ای از مهندسی ضربه می‌باشد و به عنوان یک مبنای مهم در طراحی گلوله‌ها و زره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحلیل نفوذ پرتابه‌های میله بلند، مبنای طراحی گلوله‌های ضد زره را تشکیل می‌دهد. امروزه طراحی پرتابه‌هایی با قابلیت نفوذ بیشتر و در مقابل، طراحی زره‌های مقاوم‌تر در برابر

* E-mail: Seifipoor@yahoo.com

۱- کارشناس ارشد

۲- کارشناس ارشد

نیرو در دو طرف سطح تماس پرتابه - هدف ارائه گردیده (برخلاف تئوری اولیه که بالانس فشار را لحاظ کرده بود) و سطح مقطع موثر برای اثر قارچی پرتابه ۲ برابر سطح مقطع ناحیه صلب آن فرض گردیده است و به کمک تئوری انبساط حفره استوانه‌ای برای نیروی مقاوم هدف، در محدوده سرعت $1500-1400$ m/s جوابهای خوبی در مقایسه با مقادیر تجربی گرفته شده است [۱۳]. لوک و پیکوتووسکی^۹ یک مدل تحلیلی برای نفوذ میله‌های بلند تغییر فرم پذیر در هدفهای فلزی با سرعتهای بالای 2 km/s ارائه دادند که در آن فاز، گذرای تغییر فرم قارچی، فاز نفوذ یکنواخت و فاز نفوذ ثانویه پرتابه صلب لحاظ گردیده و در مقایسه با نتایج بدست آمده از نفوذ میله‌های فولادی 4340 در هدف آلومینیومی T651-6061 و میله تنگستنی در هدفهای فولادی 4340 تطابق خوبی داشته است [۱۴]. سوانسون و دونالدسون^{۱۰} مدلی به نام ITI^{۱۱} ارائه دادند که در آن پرتابه به صورت شفت استوانه‌ای با یک کلاهک استوانه‌ای با قطر بزرگتر در نظر گرفته شده است و در هنگام برخورد، تغییر فرم پرتابه به شکل انبساط شعاعی و انقباض طولی مدل می‌شود و انرژی پرتابه به سه شکل مصرف می‌شود که شامل انرژی مصرف شده در اثر کار پلاستیک هدف در اطراف پرتابه، انرژی الاستیک جذب شده در هدف و انرژی جنبشی ناشی از اینرسی ایجاد شده مواد هدف در اطراف پرتابه است. معادلات حرکت بر مبنای بقاء جرم، مومنتم و انرژی به دست می‌آید. این مدل تنها به خواص مادی اصلی وابسته است و نیازی به ضرایب تجربی دیگر ندارد و به دلیل سادگی برای مطالعات پارامتریک مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. یازویو و ریگل^{۱۲}، مدل ITI را با در نظر گرفتن سه مرحله متوالی برای نفوذ شامل فاز تشکیل کلاهک، فاز نفوذ یکنواخت و فاز نهایی بهبود دادند. این مدل، برخورد عمود و مایل در هدفهای نامحدود و محدود را در محدوده وسیعی از سرعت به طور قابل قبول، پوشش داده است. برای این که در محدوده مافوق سرعت، جوابها با مقادیر تجربی بهتر منطبق شود، اثر نرم شدگی حرارتی^{۱۳} در تنش سیلان، در نظر گرفته شده است. برای هدفهای محدود، اثر سطح پشتی^{۱۴} به عنوان تابعی از سرعت نفوذ و سرعت صوت پیشنهاد شده است [۱۵]. ریوید و بوند^{۱۵} یک حل دو بعدی کامل از مسئله نفوذ میله‌های بلند تغییر فرم پذیر در هدف ضخیم ارائه دادند

بیشتر از مقاومت مواد است، شباهت زیادی به نفوذ جت خرج گود داشته و به همین دلیل در سرعتهای خیلی بالا (بیش از 3000 m/s)، معادله‌ی برنولی (معادله ۱) جواب خوبی داده است ولی در سرعتهای پائین‌تر به دلیل اثر مقاومت مواد، دارای خطا می‌باشد. تیت و الکسویسکی^۱ برای اصلاح تئوری هیدروینامیکی، مقاومت میله و هدف را در معادله‌ی برنولی وارد کردند. این مدل یک بعدی نفوذ (مدل A-T) تقریباً در 40 سال گذشته، به عنوان مدل مرجع استاندارد برای نفوذ میله‌های بلند در هدفهای فلزی نیمه بی‌نهایت به کار رفته است. تیت ابتدا مقاومت پرتابه (Y_p) را با حد الاستیک هاگونیوت^۲ (HEL) که تنش تسلیم تحت شرایط کرنش یک بعدی است، تقریب زد و از آزمایشهای انجام گرفته بر روی پرتابه و هدف فولادی به این نتیجه رسید که مقاومت هدف (R_T) تقریباً $3/5$ برابر HEL هدف است [۴]. تیت بر مبنای نتایج تجربی پرز، هوهرلر و استلیپ^۳ بر روی آلیاژهای آلومینیوم، فولاد و تنگستن، روابطی برای مقاومت دینامیکی پرتابه و هدف ارائه داد [۱]. جانز و گیلیس^۴ مدل تیت را در دو مورد اصلاح نمودند. آنها اولاً در معادله‌ی حرکت ناحیه‌ی صلب پرتابه، انتقال جرم به منطقه پلاستیک را در نظر گرفتند، ثانیاً کرنش قارچی در انتهای در حال تغییر فرم پرتابه را در محاسبات وارد کردند و نشان دادند که فاکتور دومی اثر مهمی در نتایج دارد [۱۰]. فورستال^۵ و همکارانش نفوذ میله‌های بلند فولادی با دماغه نیم‌کره، اجایو و مخروطی با سرعت نسبتاً پائین $1/4-0/4$ Km/s در هدف آلومینیومی را بررسی نموده و با فرض پرتابه صلب و هدف الاستیک- پلاستیک کامل و استفاده از تقریب انبساط حفره (توسط بیشاپ، هیل و موت^۶) معادلاتی را به شکل تحلیلی^۷ ارائه دادند که این معادلات نفوذ به سرعت برخورد، هندسه و جرم پرتابه، خواص مادی هدف و مقاومت اصطکاکی در سطح تماس پرتابه- هدف بستگی دارد. پیش بینی عمق نفوذ توسط این مدل نسبت به مقادیر تجربی برای میله‌های با دماغه نیم‌کره تطابق در حد عالی داشته و برای میله‌های با دماغه اجایو و مخروطی تطابق قابل قبولی داشته است. آنها همچنین در سال ۱۹۹۱ کارسختی را نیز وارد مدل کردند [۱۱ و ۱۲]. یک روش دیگر در تئوری هیدروینامیکی نفوذ پرتابه‌های میله‌ای بلند در هدفهای فلزی توسط روزنبرگ^۸ و همکارانش بر مبنای بالانس

۹- Luk & Piekutowaski (1991)

۱۰- Swanson & Donaldson (1978)

۱۱- The Integral Theory of Impact

۱۲- Yaziv & Reigel (1993)

۱۳- Thermal Softening Effect

۱۴- Back-face

۱۵- Ravid & Bodner (1994)

۱- Tate (1967,69), Alekseevskii (1966)

۲- Hugoniot Elastic Limit, HEL

۳- Hohler & Stulp (1977,80), Perez (1980)

۴- Jones & Gillis (1987)

۵- Forrestal (1988, 91)

۶- Bishop, Hill & Mott (1945)

۷- Closed-form

۸- Rosenberg(1990)

۲. تئوری تیت [۱] و [۴]

تیت با در نظر گرفتن مقاومت‌های پرتابه و هدف در مدل اولیه هیدرودینامیکی (جت سیال شکل ۱)، معادله‌ای به شکل ذیل ارائه داد [۱]:

$$\frac{1}{2}\rho_p(V-U)^2 + Y_p = \frac{1}{2}\rho_T U^2 + R_T \quad (1)$$

که در آن R_T و Y_p به ترتیب مقاومت دینامیکی پرتابه و هدف در فرآیند نفوذ، ρ_p و ρ_T چگالی پرتابه و هدف، U سرعت نفوذ (سرعت سطح مشترک پرتابه و هدف) و V سرعت پرتابه (انتهای پرتابه) می‌باشد. در این حالت معادلات حرکت و نرخ فرسایش پرتابه عبارتند از:

$$\rho_p l \frac{dV}{dt} = -Y_p \quad (2)$$

$$\frac{dl}{dt} = U - V \quad (3)$$

که در آن، t زمان و l طول لحظه‌ای پرتابه است. به کمک معادله (۱) می‌توان سرعت نفوذ لحظه‌ای را به شکل زیر محاسبه نمود:

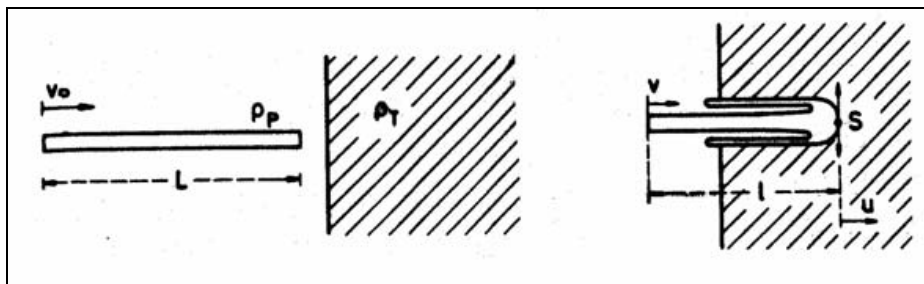
$$U = \frac{V - \mu(V^2 + A)^{\frac{1}{2}}}{1 - \mu^2}, \quad \mu = \left(\frac{\rho_T}{\rho_p}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad A = \frac{2(R_T - Y_p)(1 - \mu^2)}{\rho_T} \quad (4)$$

و به کمک معادلات (۲) و (۳) بدست می‌آید:

$$\frac{dl}{l} = \frac{\rho_p(V-U)}{Y_p} dV \quad (5)$$

با استفاده از معادله (۵) و با جای‌گذاری معادله (۴) در آن و انتگرال‌گیری برای طول لحظه‌ای بین L_0 (طول اولیه پرتابه) تا l و سرعت لحظه‌ای بین V_0 (سرعت اولیه پرتابه) تا V رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{l}{L_0} = \left[\frac{V + (V^2 + A)^{\frac{1}{2}}}{V_0 + (V_0^2 + A)^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{R_T - Y_p}{\mu Y_p}} \cdot \exp\left(\frac{\mu \rho_p}{2(1 - \mu^2) Y_p} \{ [V(V^2 + A)^{\frac{1}{2}} - \mu V^2] - [V_0(V_0^2 + A)^{\frac{1}{2}} - \mu V_0^2] \} \right) \quad (6)$$



شکل ۱- جریان ماده در مدل جت سیال تیت [۴].

که بر خلاف مدل یک بعدی A-T که بر مبنای تئوری هیدرودینامیکی بود، حل آنها بر اساس پلاستیسیته دینامیکی و به کمک یک روش حداقل کار و بالانس نیرو در سطح تماس پرتابه و هدف و بالانس مومنتوم به دست آمده است [۱۶]. واکر و اندرسون^۱ یک مدل تحلیلی ارائه داده‌اند که اثرات فاز گذرا و همچنین اثر L/D در پروسه نفوذ، لحاظ گردیده است که در مدل‌های تحلیلی دیگر معمولاً در نظر گرفته نمی‌شود [۱۷]. آنها اثر L/D را با تست‌های بسیاری در محدوده $10 \leq L/D \leq 30$ مورد بررسی قرار داده و مدل تحلیلی برای توضیح اثر L/D ارائه داده‌اند [۱۸].

در این مقاله ابتدا مبانی تئوری تحلیل نفوذ پرتابه‌های میله‌بلند که می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای طراحی گلوله‌های ضد زره و همچنین زره‌های مقاوم در برابر این پرتابه‌ها مورد استفاده قرار گیرد، مطالعه و بررسی شده است و در این راستا به توضیح مدل نفوذ تیت پرداخته شده است. در ادامه بر پایه تئوری هیدرودینامیکی و معیار ارائه شده در مدل تیت، جهت محاسبه استحکام دینامیکی پرتابه و هدف به ارائه یک مدل نفوذ جدید پرداخته شده است که بر اساس استفاده از معادلات موج هاگونیوت و معادله تیلور در محاسبه مقدار نفوذ و مقدار طول باقیمانده‌ی پرتابه پس از فرآیند نفوذ (در هدف نیمه بینهایت) توسعه داده شده است. دقت این روش در بیان میزان نفوذ، کمتر از مدل تیت است ولی بر خلاف مدل تیت، با دقت خوبی قادر به تخمین طول باقیمانده پرتابه در هدف نیمه بی نهایت جهت پرتابه‌های سرعت بالا می‌باشد. در ادامه با استفاده از این روش به بررسی عمق نفوذ و طول باقیمانده‌ی پرتابه در سرعت‌های برخورد متفاوت و چگالی‌های مختلف پرتابه پرداخته شده است و مزایای این مدل در تعیین سرعت‌های پربازده نفوذ شرح داده شده است.

۱- Walker & Anderson (1995)

نتیجه در سرعت های خیلی بالا طول باقیمانده جهت نفوذ به صورت صلب قابل صرف نظر کردن است.

در حالت کلی به منظور محاسبه عمق نفوذ از رابطه زیر استفاده می شود:

$$Pen = \frac{\rho_P}{Y_P} \int_0^{V_0} U l dV \quad (11)$$

که در آن به جای U معادله (۴) و به جای l معادله (۶) را جایگزین نموده و با انتگرال گیری روی محدوده سرعت، میزان نفوذ را می توان بدست آورد [۱].

۳. استخراج روابط تحلیلی مدل

همانگونه که بیان شد، معادلات (۱) تا (۳) معادلات اصلی مدل تیت را تشکیل می دهند. معادله (۲) با برابر قرار دادن تنش فشاری حاصل از اینرسی حرکتی پرتابه با مقاومت دینامیکی پرتابه، تغییرات سرعت پرتابه در حین نفوذ را مدل نموده است. براین اساس، نفوذ تا زمانی ادامه می یابد که در معادله (۱) مقدار U صفر شود. در این تحقیق، مدلی ارائه شده است که از معادلات (۱) و (۳) استفاده کرده و جهت تعیین تغییرات سرعت پرتابه، به جای استفاده از معادله (۲) از معادلات موج هاگونیوت استفاده شده است. با استفاده از این معادلات، ابتدا فشار سطح مشترک (حاصل از برخورد پرتابه به هدف) محاسبه می گردد. این فشار، موجهای طولی رفت و برگشتی در پرتابه ایجاد می کند. با محاسبه سرعت رفت و برگشتی این موجها، می توان فشار ثانویه ایجاد شونده در سطح مشترک پرتابه و هدف را محاسبه نمود. به موج طولی منتشر شده از سطح مشترک پرتابه و هدف که به سمت انتهای پرتابه حرکت می کند، موج راست رو گویند. به همین ترتیب، موج برگشتی از انتهای پرتابه به سمت سطح مشترک موج چپ رو گفته می شود. بر این اساس، آنچه سبب تغییر سرعت پرتابه می شود، برخورد موجهای تنش به انتهای پرتابه می باشد و نفوذ تا زمانی ادامه می یابد که فشار سطح مشترک پرتابه و هدف از مقاومت دینامیکی هدف کمتر شود.

معادلات هاگونیوت بر اساس معادلات بقا تعریف شده اند و بیان کننده ی مرز جدایش پارامترهای قبل از موج و جبهه موج می باشند و قادرند در مرز جامد-جامد تغییرات موج را بیان نمایند. هاگونیوت معادلات موج تنش چپ رو و راست رو منتشر شده در پرتابه میله ای را به شکل زیر بیان می کند [۲]:

$$P_L = \rho_0 C_0 (u_0 - u) + \rho_0 S (u_0 - u)^2 \quad (12)$$

$$P_R = \rho_0 C_0 (u - u_0) + \rho_0 S (u - u_0)^2 \quad (13)$$

اکنون به کمک رابطه (۶) و بسته به مقادیر مختلف R_T و Y_P می توان نتایج زیر را بدست آورد:

الف) حالت $R_T > Y_P$: در این حالت، دو محدوده سرعت موجود است. چنانچه سرعت اولیه پرتابه کمتر از سرعت حدی باشد ($V_0 \leq V_{lim}$) هدف بصورت صلب رفتار می نماید و طول باقیمانده پرتابه توسط فرمول تیلور محاسبه می شود:

$$V_{lim} = \left(\frac{2(R_T - Y_P)}{\rho_P} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\frac{L_R}{L_0} = \exp \left(- \frac{\rho_P V_P^2}{2Y_P} \right) \quad (8)$$

اما در حالتی که $V_0 > V_{lim}$ باشد، نفوذ رخ داده و به وسیله ی معادله (۶) می توان کاهش طول پرتابه را در محدوده V_0 تا V_{lim} بدست آورد. چنانچه L_{lim} طول متناظر با V_{lim} بدست آید، طول باقیمانده کلی پرتابه (L_R) را می توان بازم به کمک فرمول تیلور و با فرض پرتابه با طول L_{lim} و سرعت V_{lim} و برخورد با هدف صلب بدست آورد:

$$\frac{L_R}{L_{lim}} = \exp \left(- \frac{\rho_P V_{lim}^2}{2Y_P} \right) \quad (9)$$

ب) حالت $R_T = Y_P$: در این حالت با توجه به معادله (۷) داریم $V_{lim} = 0$ ، در نتیجه نفوذ در تمام محدوده های سرعت رخ داده و تا سرعت صفر ادامه می یابد و معادله (۶) برای تمام محدوده های سرعت دارای ارزش و اعتبار است.

ج) حالت $R_T < Y_P$: در این حالت نیز سرعت دارای دو محدوده مختلف است:

چنانچه سرعت اولیه پرتابه بیش از سرعت حدی V'_{lim} باشد نفوذ اتفاق افتاده و تغییر شکل پلاستیک در پرتابه رخ می دهد تا زمانی که سرعت پرتابه کاهش یابد و به سرعت حدی V'_{lim} برسد. در این زمان تغییر شکل پرتابه متوقف شده و نفوذ به صورت صلب رخ می دهد.

$$V'_{lim} = \left(\frac{2(Y_P - R_T)}{\rho_T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

البته در سرعت های بالا که مدنظر است، قسمت اعظم فرآیند نفوذ در فاز اولیه (پلاستیک) رخ داده و میله باقیمانده جهت نفوذ، بسیار کوتاه خواهد شد. در

محاسبه نماییم. اگر مقدار فشار سطح تماس (P) از مقاومت دینامیکی هدف بیشتر بود نشان دهنده وقوع نفوذ است و به حل ادامه می‌دهیم. به کمک معادلات (۱۶) و (۱۷) می‌توانیم مقدار U_{SL} و U_{SR} را بدست آوریم و مقدار تغییر سرعت انتهای پرتابه ناشی از انعکاس اولین موج تنش برگشتی را از معادله (۱۸) محاسبه نماییم. اکنون می‌توانیم به وسیله معادله (۱) سرعت نفوذ (U) مربوط به هر دو زمان انتشار موج چپرو و راسترو را بدست آوریم. بدین گونه که در مدت زمان انتشار موج چپرو در پرتابه، سرعت نفوذ (U_L) با قرار دادن $V=V_0$ در معادله (۱) بدست می‌آید و در مدت زمان انتشار موج راسترو، سرعت نفوذ (U_R) با قرار دادن $V=V_0 - \Delta V$ حاصل می‌شود. مدت زمان رسیدن موج تنش تا انتهای پرتابه (t_L) و بازگشت آن (t_R) به شکل زیر بدست می‌آید:

$$t_L = \frac{L}{U_{SL}} \quad (19)$$

$$t_R = \frac{L}{U_{SR}} \quad (20)$$

در روابط فوق، L طول لحظه‌ای و یا طول باقیمانده‌ی پرتابه در هر گام است و برای اولین گام برابر طول اولیه‌ی پرتابه خواهد بود. به دنبال محاسبه زمانهای فوق، برای اولین رفت و برگشت موج تنش می‌توانیم میزان کاهش طول پرتابه که مجموع کاهش طول ناشی از موج چپرو و راسترو در پرتابه است را به فرم زیر محاسبه نماییم:

$$X_L = \frac{V - U_L}{t_L} \quad (21)$$

$$X_R = \frac{V - \Delta V - U_R}{t_R} \quad (22)$$

در نتیجه در انتهای این مرحله (رفت و برگشت موج تنش) میزان نفوذ و طول باقیمانده‌ی پرتابه به شکل زیر بدست می‌آید:

$$L = L_0 - X_L - X_R \quad (23)$$

$$Pen = U_L \cdot t_L + U_R \cdot t_R \quad (24)$$

اکنون با بازگشت موج تنش به سطح تماس مشترک پرتابه و هدف، مراحل قبلی را از ابتدا تکرار می‌نماییم. با این تفاوت که در این حالت، سرعت اولیه‌ی ذره را برابر u در نظر می‌گیریم و سرعت انتهای پرتابه را نیز به $V - \Delta V$ تغییر می‌دهیم. در این حالت نیز پس از محاسبه‌ی P ، آن را با مقاومت دینامیکی هدف مقایسه می‌نماییم. به عبارت بهتر، حل تا آنجا ادامه داده می‌شود که مقدار P کوچکتر از مقاومت دینامیکی هدف شود. در آخرین مرحله با توجه

که در آن P_L و P_R فشار ناشی از انتشار موج تنش در دو حالت راست رو و چپ رو، ρ_0 چگالی پرتابه، C_0 سرعت صوت بالک در ماده و S ضریب بی‌بعد بوده و تابع جنس ماده است (S و C_0 برای مواد مختلف در جداول موجود در مراجع موجودند). u_0 و u نیز سرعت ذره ناشی از انتشار موج، قبل از پیشانی موج و بعد از آن می‌باشند (شرایط اولیه و نهایی). در برخورد اولیه پرتابه و هدف، فشار اولیه‌ی سطح مشترک، سبب ایجاد موج تنش راسترو در هدف و موج تنش چپرو در پرتابه می‌گردد. تا زمانی که تماس پرتابه و هدف برقرار است، فشار سطح مشترک برای پرتابه و هدف یکسان است و سرعت ذره‌ای موجهای چپرو و راسترو منتشر شده از این سطح با هم برابرند. لذا معادلات هاگونیوت برای پرتابه و هدف در این حالت عبارتند از [۲]:

$$P = \rho_{0P} C_{0P} (u_0 - u) + \rho_0 S_P (u_0 - u)^2 \quad (14)$$

$$P = \rho_{0T} C_{0T} u + \rho_{0T} S_T u^2 \quad (15)$$

در معادلات فوق، اندیس P خواص مربوط به پرتابه و اندیس T خواص مربوط به هدف را نشان می‌دهد. در نتیجه در لحظه‌ی اول با قرار دادن u_0 برابر با سرعت اولیه برخورد پرتابه به هدف (V_0) می‌توانیم u که همان سرعت ذره در محل تماس است و P (فشار سطح تماس) را محاسبه نماییم. هاگونیوت بیان می‌کند که در اثر برخورد، سرعت موج تنش چپرو در پرتابه از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$U_{SL} = \frac{P}{\rho_{0P} (u - u_0)} \quad (16)$$

این موج تنش به انتهای پرتابه رفته و در آنجا با برخورد به سطح آزاد پرتابه منعکس می‌گردد. تئوری هاگونیوت بیان می‌کند که موج انعکاسی، پرش ناگهانی نداشته و عملکرد آیزونروپیک دارد. لذا محاسبه سرعت موج تنش برگشتی به کمک رابطه زیر خواهد بود [۲]:

$$U_{SR} = C_{0P} + 2S_P u \quad (17)$$

همچنین در اثر انعکاس موج تنش از انتهای آزاد پرتابه، تغییر سرعت در انتهای پرتابه ایجاد خواهد شد که مقدار آن با استفاده از رابطه تیلور برابر است با [۴]:

$$\Delta V = \frac{2Y_P}{\rho_P \cdot U_{SR}} \quad (18)$$

اکنون به کمک معادلات بالا توانایی محاسبه میزان عمق نفوذ و میزان طول پرتابه را در هر لحظه خواهیم داشت. ترتیب محاسبه بدین صورت خواهد بود که ابتدا با قرار دادن $u_0 = V_0$ ، مقدار u و P را از معادلات (۱۴) و (۱۵)

$$R_T = \sigma_{yT} \left(\frac{2}{3} + \ln \left(\frac{1.14 E_T}{2 \sigma_{yT}} \right) \right) \quad (26)$$

در معادلات فوق، BHN_p سختی برینل پرتابه، Y_p استحکام دینامیکی پرتابه، R_T مقاومت دینامیکی هدف، E_T مدول الاستیسیته‌ی هدف، σ_{yP} استحکام تسلیم پرتابه و σ_{yP} استحکام تسلیم هدف می‌باشند.

۴-۱-۱ مثال ۱

در این مثال، نفوذ یک پرتابه‌ی تنگستنی در هدف فولادی مورد نظر قرار گرفته است. مشخصات پرتابه و هدف و شرایط اولیه به شرح زیر می‌باشند:

$$\begin{cases} \rho_p = 17600 \text{ kg/m}^3, & BHN_p = 350 \\ C_{0P} = 4029 \text{ m/s} \\ S_p = 1.237 \end{cases}$$

مشخصات هدف:

$$\begin{cases} \rho_T = 7800 \text{ kg/m}^3, & E_T = 200 \text{ GPa} \\ C_{0T} = 3574 \text{ m/s}, & \sigma_{yT} = 1200 \text{ MPa} \\ S_T = 1.92 \end{cases}$$

شرایط اولیه:

$$\begin{cases} V_p = 1500 \text{ m/s}, & L/D = 10 \\ L_0 = 0.0817 \text{ m} \end{cases}$$

در مرجع [۳] مدل واکر-آندرسون ارائه گردیده و برای شرایطی مشابه با مثال ۱ نتایج بدست آمده با نتایج عددی مقایسه گردیده است. در جدول (۱) نتایج روش ارائه شده در این مقاله و مدل تیت با نتایج مرجع [۳] مقایسه گردیده‌اند. لازم به یادآوری است که مقادیر بدست آمده برای مقدار نفوذ، مربوط به فاز یکنواخت مدل تیت می‌باشد. جدول ۱ نشان می‌دهد که عملکرد نفوذ مدل ارائه شده، در تطابق با مدل تیت می‌باشد و در مقایسه با نتایج روش عددی، دقت خوبی در پیش‌بینی طول باقیمانده پرتابه دارد.

جدول ۱- مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های مختلف با روش عددی.

مدل	طول نفوذ (cm)	طول باقیمانده پرتابه در هدف (cm)
تیت	۵/۹۵	۰/۰۲
واکر-آندرسون [۳]	۷/۱	۰/۴
نتایج حاصل از روش عددی [۳]	۷/۴	۰/۸
مقاله حاضر	۵/۹۵	۰/۷۶۹

به اینکه نفوذ تا آنجا ادامه می‌یابد که P برابر مقاومت دینامیکی هدف گردد، مقدار P را برابر R_T قرار داده و به کمک روابط (۱۴) و (۱۵) مقدار u_0 و u محاسبه می‌گردد. سپس به کمک روابط (۱۶) الی (۲۴) می‌توان میزان کاهش طول و نفوذ ناشی از مرحله آخر را محاسبه کرد و اثر آنها را به مراحل قبلی اضافه نمود. پس از مرحله آخر، نفوذ متوقف شده و مقادیر بدست آمده همان پاسخ نهایی خواهند بود. جهت توضیح گامهای حل، لازم است مروری بر روش حل صورت پذیرد. مدل نفوذ ارائه شده پس از برخورد پرتابه به هدف، فشار و سرعت اولین موج تنش منتشر شده از سطح مشترک پرتابه و هدف را محاسبه کرده و کاهش سرعت پرتابه در اثر برخورد این موج به انتهای پرتابه را استخراج می‌کند و پس از آن سرعت و فشار موج برگشتی ناشی از برخورد این موج به انتهای پرتابه را محاسبه می‌کند. پس از برگشت این موج به محل سطح مشترک دوباره فشار سطح مشترک بدست آمده و شرایط موج جدید منتشره از این سطح محاسبه می‌گردد. در مدت رفت و برگشت موج اول، کاهش طول پرتابه محاسبه گردیده و موج جدید از محل جدید سطح مشترک پرتابه و هدف و با فشار جدید، منتشر می‌گردد. برای سایر امواج ناشی از انعکاسهای بعدی نیز به همین صورت محاسبات انجام می‌گردد. لذا تعداد گامهای حل بستگی به طول اولیه پرتابه و سرعت برخورد آن دارد و قابل کاهش و یا افزایش نمی‌باشد و تا آنجا ادامه می‌یابد که فشار سطح مشترک بین پرتابه و هدف، کمتر از مقاومت دینامیکی هدف گردد. در این شرایط، آخرین گام حل با محاسبه سرعت و فشار موجی انجام می‌شود که در فشاری برابر مقاومت دینامیکی هدف از سطح مشترک پرتابه و هدف منتشر گردیده است.

۴. مقایسه نتایج و بحث

به منظور بررسی بیشتر، سه مثال زیر در نظر گرفته شده است. در مثال اول نتیجه‌ی بدست آمده از مدل ارائه شده با نتایج مرجع [۳] و مدل تیت مقایسه شده است. در مثال دوم، پاسخ مدل حاضر با نتایج حاصل از مدل تیت و حل عددی انجام گرفته به کمک نرم افزار AnsysAutodyn v.11 مقایسه گردیده است و در مثال سوم نتیجه‌ی پاسخ مدل حاضر با نتایج حاصل از مدل تیت و تستهای تجربی ارائه شده در مرجع [۱۹] مقایسه شده است. در مدل ارائه شده، به منظور محاسبه‌ی مقاومت دینامیکی پرتابه و هدف از معیار تیت استفاده شده است [۱]:

$$\begin{aligned} \sigma_{yP} &= 4.2 BHN_p \text{ (MPa)} \\ Y_p &= 1.7 \sigma_{yP} \end{aligned} \quad (25)$$

است، از نوع لاگرانژی (Lagrangian) می‌باشد. از این رو علاوه بر مدل ماده و معادله حالت به مدل گسست نیز نیاز است. به همین جهت برای مدل گسست نیز از مدل گسست جانسون- کوک استفاده شده است. در مدل ماده جانسون کوک اثر دما و نرخ کرنش در نظر گرفته شده است. این مدل ماده در مواردی استفاده می‌شود که نرخ کرنش دارای تغییرات زیادی باشد. مهمترین مزیت این مدل ماده در این است که کرنش شکست در این مدل ماده مقداری ثابت نیست. تابع تنش سیلان (Flow Stress) در این مدل ماده به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_y = (A + B(\bar{\epsilon}^P)^n) \left(1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)\right) \left(1 - (T^*)^m\right) \quad (27)$$

در این تابع مقادیر A ، B ، C ، n و m ضرایب ثابت ورودی می‌باشند که برای مواد مختلف در مراجع وجود هستند. همچنین؛

$$\bar{\epsilon}^P: \text{کرنش پلاستیک موثر}$$

$$\dot{\epsilon}_0 = 1s^{-1} \text{ که در حالی که } \dot{\epsilon}^* = \frac{\bar{\epsilon}^P}{\dot{\epsilon}_0}$$

و دمای هموزن^۱ به این صورت تعریف می‌شود:

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$$

کرنش معادل شکست نیز در این مدل ماده به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] [1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*] [1 + D_5 T^*] \quad (28)$$

در اینجا کرنش شکست تابعی از نوع بارگذاری، نرخ کرنش و دمای هموزن می‌باشد. نوع بارگذاری در تابع کرنش شکست، توسط σ^* بیان می‌شود.

$$\sigma^* = \frac{P}{\sigma_{eff}} \quad (29)$$

در رابطه فوق σ_{eff} تنش موثر می‌باشد. شکست، زمانی رخ می‌دهد که پارامتر D زیر، به مقدار یک برسد.

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^P}{\epsilon^f} \quad (30)$$

در این رابطه $\Delta \bar{\epsilon}^P$ کرنش معادل پلاستیک در هر مرحله است. مقادیر D_1 تا D_5 پارامترهای ورودی این مدل گسست برای مواد مختلف هستند. این مدل ماده در نرخهای کرنش پایین نیز به خوبی معتبر می‌باشد. از جمله کاربرهای تاکید شده برای این مدل ماده، شکل‌گیری فلز در فرایند انفجار، نفوذ پرتابه‌ها و ضربه می‌باشد.

۱- Homologous Temperature

مدلهای تیت و واکر- اندرسون در پیش‌بینی طول باقیمانده‌ی پرتابه دقت بسیار کمتری از مدل حاضر دارند.

چنانکه گفته شد وجه تمایز و نقطه قوت مدل ارائه شده در معیار نفوذ و کاهش سرعت پرتابه می‌باشد. در مدل تیت سرعت حدی پرتابه که نشان دهنده توقف نفوذ می‌باشد، با صفر قرار دادن U در معادله (۱) حاصل می‌شود. در حالی که در مدل ارائه شده توقف نفوذ، زمانی اتفاق می‌افتد که فشار سطح مشترک پرتابه و هدف کمتر از تنش تسلیم دینامیکی هدف گردد. جهت کاهش سرعت نیز به جای استفاده از تنش تسلیم دینامیکی بعنوان نیروی کاهنده سرعت، از نیروی حاصل از برخورد موجهای تنش منتشر شده در طول پرتابه به انتهای آن استفاده شده است. علاوه بر اینها این مدل از معادلات موج هاگونیوت برای محاسبه کاهش سرعت استفاده می‌کند. این معادلات نسبت به مدل تیت، پارامترهای بیشتری از خواص پرتابه و هدف را در تحلیل نفوذ وارد می‌سازند که با استفاده از تستهای آزمایشگاهی بدست آمده‌اند. این نکات سبب گردیده است که این مدل قادر به محاسبه طول باقیمانده پرتابه با دقت بیشتری از سایر مدل‌های تحلیلی باشد.

۲-۴-۲- مثال ۲

در این مثال نیز نفوذ یک پرتابه تنگستنی در هدف فولادی مورد نظر قرار گرفته است. مشخصات پرتابه و هدف و شرایط اولیه به شرح زیر می‌باشند:

مشخصات پرتابه:

$$\begin{cases} \rho_P = 17000 \text{ kg/m}^3, & BHN_P = 358 \\ C_{0P} = 4029 \text{ m/s} \\ S_P = 1.237 \end{cases}$$

مشخصات هدف:

$$\begin{cases} \rho_T = 7800 \text{ kg/m}^3, & E_T = 200 \text{ GPa} \\ C_{0T} = 4610 \text{ m/s}, & \sigma_{yT} = 792 \text{ MPa} \\ S_T = 1.73 \end{cases}$$

شرایط اولیه:

$$\begin{cases} V_P = 1408 \text{ m/s}, & L/D = 10 \\ L_0 = 0.0747 \text{ m} \end{cases}$$

همانگونه که گفته شد حل عددی در این مثال به کمک نرم افزار AnsysAutodyn v.11 انجام گرفته است. مدل‌های مواد و معادلات حالت بکار گرفته شده، مدل ماده جانسون- کوک (Johnson-Cook) و معادله حالت گرونایزن (Gerunisen) بوده است. روش شبیه‌سازی که به کار گرفته شده

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (32)$$

در معادلات فوق P فشار، E انرژی داخلی، ρ_0 چگالی پرتابه، S_1 تا S_3 ضرایب ورودی وابسته به خواص جنس و a ، C و γ_0 ضرایب معادله حالت گرونایزن هستند. معادله حالت و مدل ماده استفاده شده در این مثال برای تنگستن و فولاد به شرح جدول ۲ می‌باشد. ثوابت این معادلات از جداول موجود در نرم افزار AnsysAutodyn استخراج شده‌اند. نتایج بدست آمده از مدل ارائه شده در این مقاله و مدل تیت و حل عددی در جدول ۳ آمده است. در شکل ۲ روند فرآیند نفوذ و کانتور تنشهای وارد بر پرتابه و هدف با استفاده از نرم افزار AnsysAutodyn نشان داده شده است.

معادله حالت گرونایزن با توان سوم سرعت شوک- سرعت ذرات، مقدار فشار را برای موادی که تحت تاثیر فشار هستند به صورت زیر بیان می‌نماید:

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{a}{2}\mu^2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{(\mu + 1)} - S_3 \frac{\mu^2}{(\mu + 1)^2}]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (31)$$

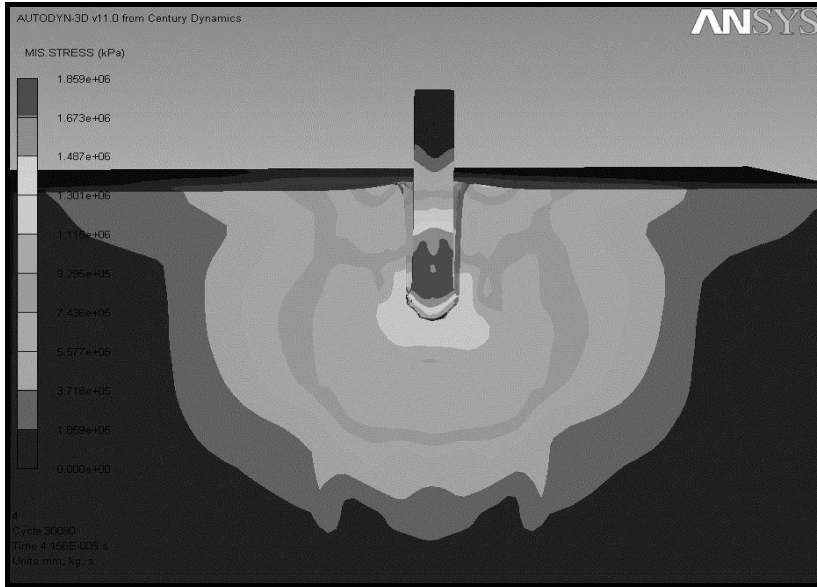
به طوری که:

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$$

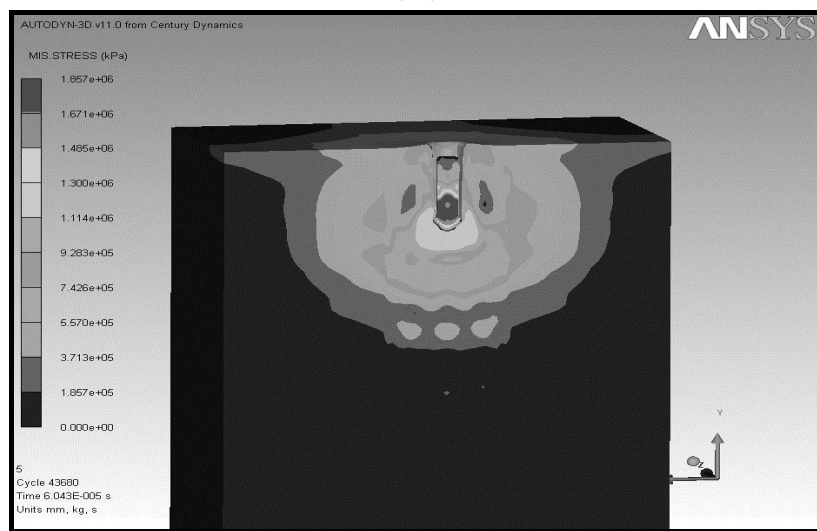
و برای حالتی که مواد تحت تاثیر کشش می‌باشند، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

جدول ۲- معادله حالت و مدل ماده‌ی استفاده شده برای پرتابه و هدف.

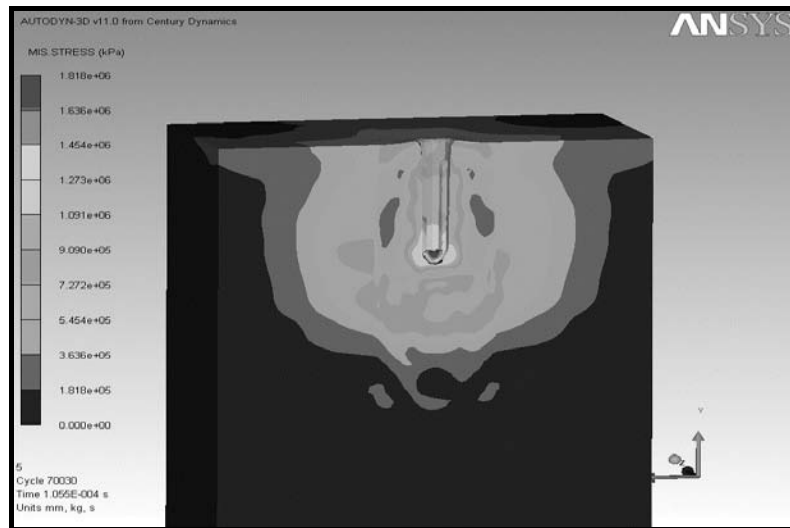
	Rod	Target
Material	Tung.Alloy	Steel
Density (kg/mm^3)	1.70000E-05	7.83000E-06
Equation Of State	Shock	Shock
Gruneisen coefficient	1.54000E+00	1.67000E+00
Parameter C_1 (mm/s)	4.02900E+06	4.61000E+06
Parameter S_1	1.23700E+00	1.73000E+00
Parameter Quadratic S_2 (s/mm)	0.00000E+00	0.00000E+00
Parameter C_2 (mm/s)	0.00000E+00	0.00000E+00
Parameter S_2	0.00000E+00	0.00000E+00
Reference Temperature (K)	3.00000E+02	2.93000E+02
Specific Heat (uJ/kgK)	1.34000E+08	4.77000E+08
Thermal Conductivity (mJ/mKs)	0.00000E+00	0.00000E+00
Strength	Johnson Cook	Johnson Cook
Shear Modulus (kPa)	1.60000E+08	7.70000E+07
Yield Stress (kPa)	1.50600E+06	7.92000E+05
Hardening Constant (kPa)	1.77000E+05	5.10000E+05
Hardening Exponent	1.20000E-01	2.60000E-01
Strain Rate Constant	1.60000E-02	1.40000E-02
Thermal Softening Exponent	1.00000E+00	1.03000E+00
Melting Temperature (K)	1.72300E+03	1.79300E+03
Ref. Strain Rate ($/s$)	1.00000E+00	1.00000E+00
Strain Rate Correction	1st Order	1st Order
Failure	Johnson Cook	Johnson Cook
Damage Constant, D_1	1.00000E+00	5.00000E-02
Damage Constant, D_2	0.00000E+00	3.44000E+00
Damage Constant, D_3	-5.00000E-01	-2.12000E+00
Damage Constant, D_4	0.00000E+00	2.00000E-03
Damage Constant, D_5	0.00000E+00	6.10000E-01
Melting Temperature (K)	1.72300E+03	1.79300E+03
Ref. Strain Rate ($/s$)	1.00000E+00	1.00000E+00
Erosion	Geometric Strain	Geometric Strain
Erosion Strain	1.00000E+00	1.00000E+00



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲- روند فرآیند نفوذ بدست آمده از نرم افزار AnsysAutodyn.

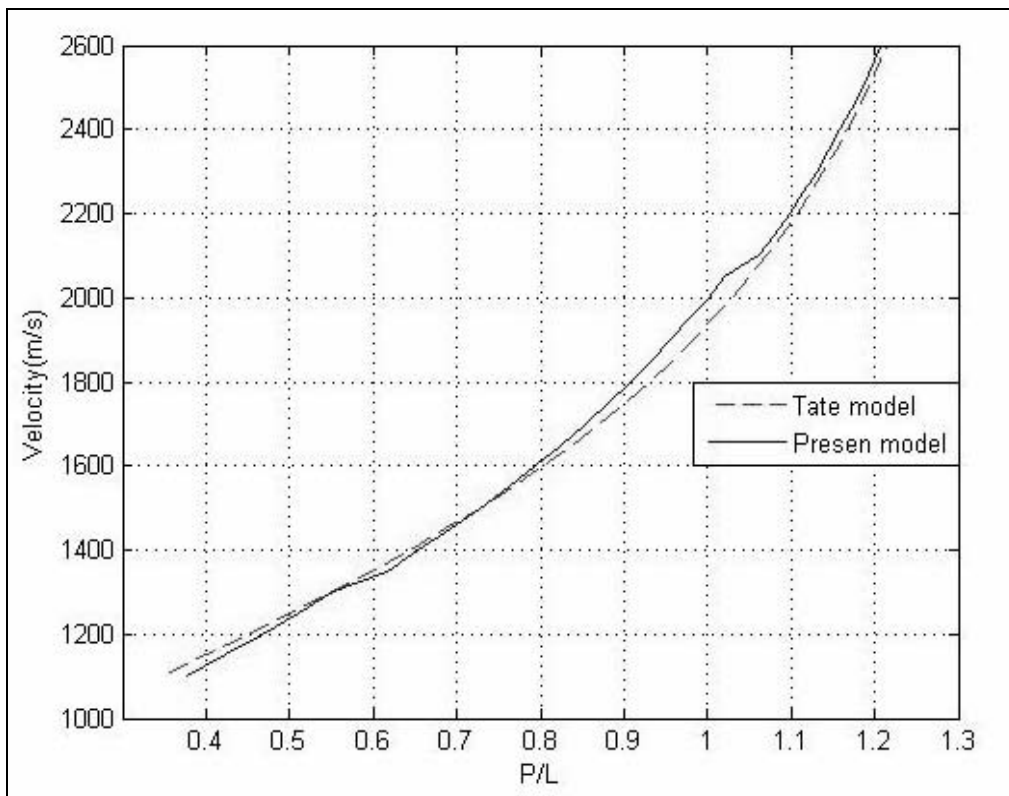
تا ۲۱۰۰ متر بر ثانیه تغییر نفوذ بیشتری را نسبت به سایر سرعتها نشان می‌دهد. در شکل ۴ نیز کاهش طول باقیمانده در این دو محدوده سرعت بیشتر از سایر سرعتها است. لذا می‌توان گفت کاهش طول مانده به معنی افزایش کارایی نفوذ می‌باشد و هرچه طول مانده کمتر باشد، به این معنی است که از انرژی نفوذ استفاده بیشتری صورت گرفته است. در مجموع با مراجعه به شکل‌های ۳ تا ۵ محدوده پربازده سرعت برخورد مشخص گردیده است. با تغییر چگالی پرتابه، محل این نواحی نیز تغییر می‌کند. شکل ۵ نشان می‌دهد که برای پرتابه‌هایی با چگالی ۱۸۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، محدوده سرعت پربازده در محدوده سرعت‌های ۱۲۰۰ تا ۱۲۵۰ و ۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰ قرار دارد.

محدوده سرعت‌های پربازده نفوذ مطابق شکل‌های ۳ تا ۵ تنها در دامنه پیش‌بینی‌های مدل حاضر وجود دارند و در مدل تیت چنین پدیده‌ای دیده نمی‌شود. هرچند این پدیده سبب خطای فاحشی در نتایج نشده است، ولی می‌تواند نکته مهمی در پدیده نفوذ به شمار آید. در این مرحله این سوال پیش می‌آید که آیا در واقعیت موضوع چنین پدیده‌ای وجود دارد یا خیر؟

جدول ۳- مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های مختلف با روش عددی.

مدل	طول نفوذ (cm)	طول باقیمانده پرتابه در هدف (cm)
تیت	۷۳۴	۰٫۰۶
نتایج حاصل از روش عددی	۶۴	۰٫۸۲
مقاله حاضر	۶۷۸	۰٫۹۹۸

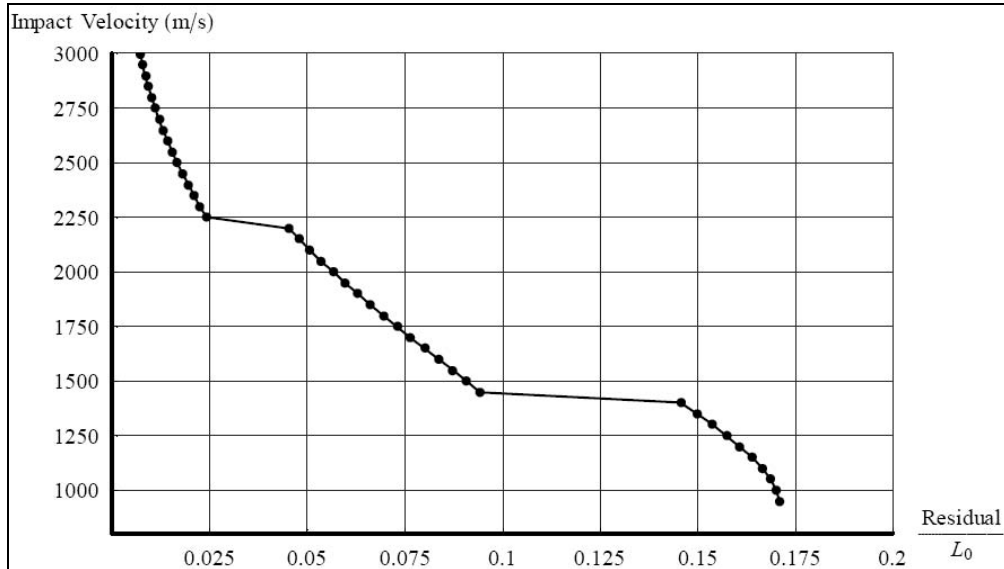
جداول ۱ و ۳ نشان می‌دهند که با تغییر شرایط مساله، دقت پیش‌بینی مدل تفاوت کرده است. به طوری که در مثال اول، عمق نفوذ برابر مدل تیت است. در حالی که در مثال دوم عمق نفوذ حدود ۸ درصد کمتر از مدل تیت پیش‌بینی گردیده است. دلیل این مساله مربوط به رفتار متفاوت این مدل در سرعت‌های خاص می‌باشد. پیش‌بینی مدل تیت در این محدوده سرعتها با مدل حاضر متفاوت است و این مساله سبب تفاوت نتایج در سرعت‌هایی نزدیک به این محدوده‌ها گردیده است. شکل ۳ نشان می‌دهد که در سرعت ۱۵۰۰ متر بر ثانیه دو منحنی یکدیگر را قطع کرده‌اند و به همین دلیل در مثال ۱ میزان نفوذ مدل تیت و مدل حاضر با یکدیگر برابر است. شکل ۳ نشان می‌دهد که مدل حاضر در محدوده سرعت‌های ۱۳۰۰ تا ۱۳۵۰ و ۲۰۵۰



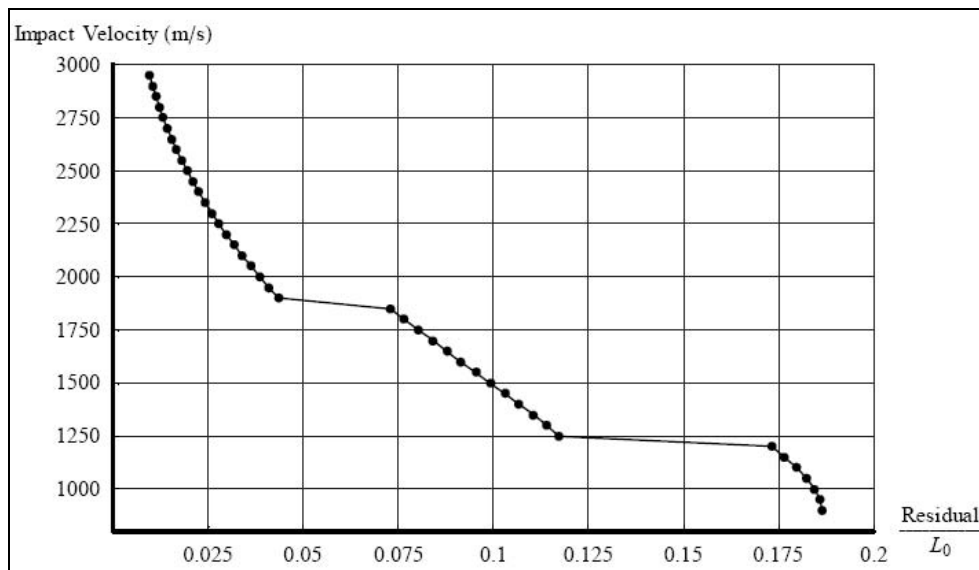
شکل ۳- مقایسه نفوذ پرتابه (بی‌بعد نسبت به طول اولیه) برای مدل حاضر و مدل تیت در سرعت‌های برخورد مختلف و چگالی ۱۷۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب.

جهت بررسی میزان تطابق پیش‌بینی‌های مدل ارائه شده با تست‌های تجربی، میزان نفوذ یک پرتابه تنگستنی در هدف فولادی مطابق شرایط مثال ۳ محاسبه گردیده و در جدول ۴ با نتایج مدل تیت و نتایج تجربی مقایسه گردیده است. داده‌های تجربی ارائه شده در این جدول از مرجع [۱۹] گرفته شده است.

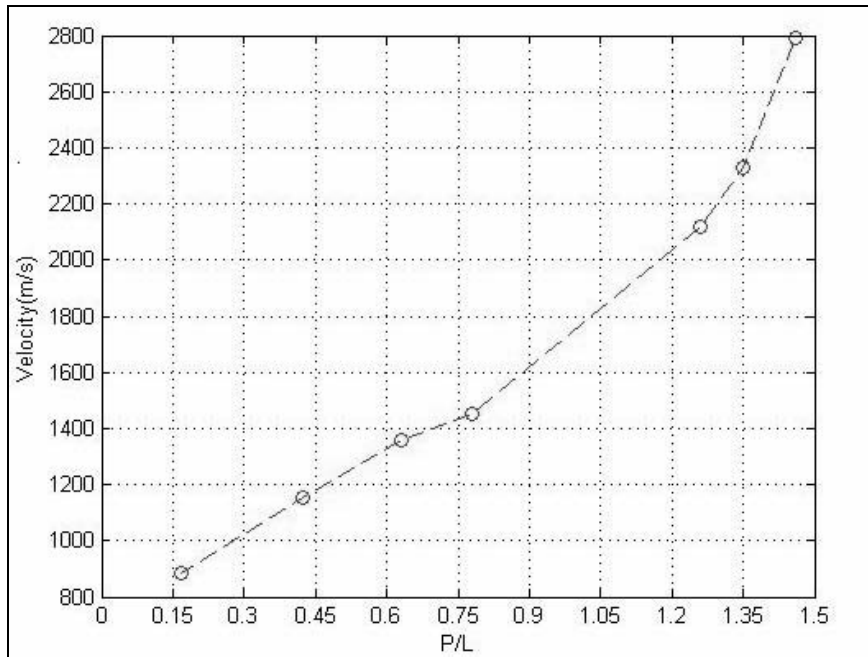
جهت بررسی این موضوع، با استفاده از نتایج تجربی مرجع [۷] نمودار نفوذ هسته تنگستنی در هدف فولادی در سرعت‌های مختلف مطابق شکل ۶ رسم گردید. در این منحنی به دلیل محدودیت داده‌ها محدوده پرتابه بالایی مشخص نشده است. ولی به وضوح می‌توان محدوده پر بازده پایینی را در محدوده سرعت ۱۳۵۰ تا ۱۴۵۰ متر بر ثانیه مشاهده کرد.



شکل ۴- طول باقیمانده پرتابه (بی‌بعد نسبت به طول اولیه) در سرعت‌های برخورد مختلف و در چگالی ۱۷۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب.



شکل ۵- طول باقیمانده پرتابه (بی‌بعد نسبت به طول اولیه) در سرعت‌های برخورد مختلف و در چگالی ۱۸۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب.



شکل ۶- مقایسه نفوذ پرتابه (بی‌بعد نسبت به طول اولیه) برای نتایج تست در سرعت‌های برخورد مختلف و چگالی ۱۷۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب [۷].

جدول ۴- مقایسه نتایج حاصل از مدل حاضر و مدل تیت با تست‌های تجربی.

شماره تست	۵۸۴۱	۵۸۳۵	۵۸۴۲
مدل	طول نفوذ (cm)	طول نفوذ (cm)	طول نفوذ (cm)
تیت	۱۵,۹۵	۲۱,۰۱	۱۷,۲۳
نتایج حاصل از تست	۱۶,۵۲±۰,۰۵	۲۲,۸۵±۰,۰۵	۱۸,۹±۰,۰۵
مقاله حاضر	۱۵,۶۱	۲۰,۹۰	۱۷,۲۳

در این مثال، نفوذ پرتابه‌ی تنگستنی در هدف فولادی مورد نظر قرار گرفته است. مشخصات پرتابه و هدف و شرایط اولیه به شرح زیر می‌باشند:

مشخصات پرتابه:

$$\begin{cases} \rho_P = 17346 \text{ kg/m}^3 & , \quad BHN_P = 287.143 \\ C_{0P} = 4035 \text{ m/s} \\ S_P = 1.24 \end{cases}$$

مشخصات هدف:

$$\begin{cases} \rho_T = 7800 \text{ kg/m}^3 & , \quad E_T = 237 \text{ GPa} \\ C_{0T} = 3574 \text{ m/s} & , \quad \sigma_{yT} = 848 \text{ MPa} \\ S_T = 1.92 \end{cases}$$

شرایط اولیه‌ی تست شماره ۵۸۴۱:

$$\begin{cases} V_P = 2365 \text{ m/s} & , \quad L/D = 23 \\ L_0 = 0.12174 \text{ m} \end{cases}$$

شرایط اولیه‌ی تست شماره ۵۸۳۵:

$$\begin{cases} V_P = 2653 \text{ m/s} & , \quad L/D = 23 \\ L_0 = 0.15575 \text{ m} \end{cases}$$

شرایط اولیه‌ی تست شماره ۵۸۴۲:

$$\begin{cases} V_P = 3580 \text{ m/s} & , \quad L/D = 23 \\ L_0 = 0.12149 \text{ m} \end{cases}$$

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهند که دقت پیش‌بینی عمق نفوذ در مدل تیت به مقادیر تجربی نزدیک‌تر است و با افزایش سرعتها میزان پیش‌بینی عمق نفوذ مدل حاضر با مدل تیت به هم نزدیک می‌گردد به طوری که در سرعت‌های خیلی بالا (بالتر از ۳۰۰۰ m/s) با هم برابر می‌شوند.

قابلیت مهم دیگر این مدل در بررسی تاثیر ترک در سطح مقطع پرتابه بر روی میزان نفوذ و طول باقیمانده پرتابه در هدف می‌باشد. با استفاده از این

- [6]. Z. Rosenberg, E. Dekel, "A Computational Study of the Influence of Projectile Strength on the Performance of Long Rod Penetrators", *Int. J. Impact Eng.*, Vol.18, No.6, pp. 671-677, (1996).
- [7]. K. Vahedi, "Development of an Analytical Method for Ballistic Impact of Long Rod Penetrators", PHD Thesis, Louisiana. Tech. Univ., (1992).
- [8]. خداحمی. ح، لیاقت. غ، فلاحی آرزودارغ، کاربرد تئوری هیدرودینامیکی در طراحی موشکهای ضد زره K.E و زره‌های مقاوم در برابر آنها، اولین همایش سراسری موشکهای هدایت شونده ضد زره، (۱۳۷۹).
- [9]. J. D. Walker, C. E. Anderson, "The Influence of Initial Nose Shape in Eroding Penetration", *Int. J. Impact Eng.* 15(2), 139-148, (1994).
- [10]. S. E. Jones, P. P. Gillis, "On the Penetration of Semi-infinite Targets by Long Rods", *J. Mech. Phys.* 35(1), 121-131, (1987).
- [11]. M. J. Forrestal, K. Okajima, V. K. Luk, "Penetration of 6061-T651 Aluminum Targets with Rigid Long Rods", *J. of Applied Mechanics*, 55, (1988).
- [12]. M. J. Forrestal, N. S. Brar, V. K. Luk, "Penetration of Strain-Hardening Targets with Rigid Spherical-Nose Rods", *J. of Applied Mechanics*, 58, 7-10, (1991).
- [13]. Z. Rosenberg, E. Marmor, M. Maysel, "On the Hydrodynamic Theory of Long Rod Penetration", *Int. J. Impact Eng.* 10, 483-486, (1990).
- [14]. V.K. Luk, A. J. Piekutowski, "An Analytical Model on Penetration of Eroding Long Rods into Metallic Targets", *Int. J. Impact Eng.* 11(3), 323-340, (1991).
- [15]. D. Yaziv, J. P. Riegel, "The Application of the Integral Theory of Impact to Model Penetration of Hypervelocity Impact", *Int. J. Impact Eng.* 14, 843-850, (1993).
- [16]. M. Ravid, S. R. Bodner, I. Holzman, "A Two-Dimensional Analysis of Penetration by an Eroding Projectile", *Int. J. Impact Eng.* 15(5), 587-603, (1994).
- [17]. J. D. Walker, C. E. Anderson, "A Time-Dependent for Long-Rod Penetration", *Int. J. Impact Eng.* 16(1), 19-48, (1995).
- [18]. C. E. Anderson, J. D. Walker, S. J. Bless, Y. Partom, "On the L/D Effect for Long-Rod Penetrators", *Int. J. Impact Eng.* 18(3), 247-264, (1996).
- [19]. Daniel E. Carroll, Eugene S. Hertel, Jr., Timothy G. Trucano, "Simulation of Armor Penetration Tungsten Rods: ALEGRA Validation Report", Sandia National Laboratory, (1997).

مدل می‌توان درصد برخورد و برگشت امواج تنش منتشر شده از سطح مشترک پرتابه و هدف را با توجه به عمق ترک محاسبه کرده و تاثیرات آن را بر عمق نفوذ مشاهده کرد و یا نحوه‌ی کاهش سرعت پرتابه در فرایند نفوذ را بررسی نمود. در حالت کلی، مدل ارائه شده در این مقاله ممکن است مدل کامل و جامعی نباشد، اما می‌تواند سرفصل جدیدی را در بررسی فرآیند نفوذ به کمک معادلات موج هاگونیوت باز نماید.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله به ارائه‌ی یک مدل نفوذ جهت پرتابه‌های میله‌بلند سرعت بالا در اهداف نیمه بینهایت پرداخته شد. مدل ارائه شده با استفاده از معادلات موج هاگونیوت، پارامترهای ورودی بیشتری از خواص ماده را در تحلیل نفوذ وارد می‌نماید و توانایی خوبی در محاسبه میزان طول باقیمانده پرتابه در هدف پس از پایان فرآیند نفوذ دارد. در حالی که از سایر مدل‌های تحلیلی موجود، جهت محاسبه طول باقیمانده نتیجه دقیقی حاصل نخواهد شد. مقایسه نتایج حاصل از مدل حاضر در پیش‌بینی عمق نفوذ با نتایج مدل تیت و تستهای تجربی نشان داد که هر چند دقت پیش‌بینی این مدل کمتر از مدل تیت می‌باشد ولی در حد قابل قبولی قرار دارد. با استفاده از مدل ارائه شده، به بیان سرعت‌های پر بارده پرتابه‌ها پرداخته شد. نشان داده شد که این محدوده سرعتها ثابت نیستند و با تغییر چگالی پرتابه تغییر می‌کنند. از آنجا که این پدیده در سایر مدل‌های تحلیلی نظیر مدل تیت دیده نمی‌شود، تطابق این مساله با نتایج تجربی بررسی گردید. به منظور بسط و گسترش این روش در کارهای بعدی می‌توان برخورد پرتابه‌های مایل و یا دارای ترک را مورد توجه قرار داد.

۶. مراجع

- [1]. Jonas A. Zukas, "High Velocity Impact Dynamics", New York, John Wiley & Sons, (1990).
- [2]. Paul W. cooper, "Explosives Engineering", New York, Wiley-VCH, (1996).
- [3]. J. D. Walker, C. E. Anderson, "A Time-Dependent Model for Long-Rod Penetration", *Int. J. Impact Eng.*, 19-48, (1995).
- [4]. A. Tate, "A Theory for the Deceleration of Long Rods after Impact," *J. Mech. Phys. Solids* 15, 387-399, (1967).
- [5]. D. J. Gee, "Oblique Plate Perforation by Slender Rod Projectiles", *19th Int. S. Ballistic.* (2001).