

اصلاح و تعمیم مدل دیکشیت و ساندراراجان برای تحلیل نفوذ پرتابه تغییر فرم پذیر

حسین خدارحمی
دانشجوی دکترا

علیرضا فلاحي آرزودار
استادیار

دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

غلامحسین لیاقت
دانشیار

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

مدل دیکشیت و ساندراراجان (۱۹۹۲) برای تحلیل نفوذ پرتابه های بادماغه اجابو در هدفهای فلزی در شرایطی که پرتابه تغییر فرم ناچیزی داشته باشد همخوانی خوبی با نتایج تجربی دارد، ولی در مورد پرتابه های معمولی که در برخورد با هدف تغییر فرم قابل توجهی دارند، عمق نفوذ را خیلی بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی می کند. در این مقاله برای در نظر گرفتن تغییر فرم پرتابه، کار پلاستیک انجام گرفته بر روی آن در حین پروسه نفوذ تخمین زده شده و به عنوان یک انرژی مصرفی قابل توجه به سه نوع تلفات انرژی مطرح شده در مدل اولیه اضافه گردیده است. مقایسه نتایج حاصل از مدل ارائه شده در این مقاله با مقادیر تجربی بدست آمده از تستهای بالستیکی انجام گرفته با پرتابه های ۵/۵۶ و ۷/۶۲ میلیمتر در هدفهای فولادی St 37 نشان می دهد که مدل جدید جوابهای خوبی داشته و می تواند برای مطالعات پارامتریک و طراحی هدفهای فلزی مقاوم در برابر نفوذ مورد استفاده قرار گیرد.

An Extension to Diskshit & Sundararajan Model for Penetration Analysis of Deforming Projectiles

H.Khoda-Rahmi
Ph.D.Student

Mechanical Engineering Department,
Amirkabir University of Technology

A. Fallahi Arezodar
Assistant Professor

Mechanical Engineering Department,
Amirkabir University of Technology

G. H. Liaghat

Associate Professor

Mechanical Engineering Department,
Tarbiat Modarres University

Abstract

An analytical model of penetration analysis of ogival projectiles into metallic target has been presented by Dikshit & Sundararajan (1992). That model under condition of negligible deformation of projectile has given good results, but in the real case of current projectile with considerable deformation due to impact, it overestimates the depth of penetration.

In this paper, the plastic work done on the projectile during the penetration process has been evaluated and as a considerable dissipating energy added to the other three dissipating energies involoved in the initial model of Dikshit & Sundararajan.

Besides, a series of ballistic tests using 7.62 and 5.56mm projectiles and steel plates have been done and the experimental results compared with analytical solutions.

This Comparison shows that the modified model of this paper gives appropriate estimation for depth of penetration and may be used for further parametric studies and designing of metallic targets.

Keywords

"Penetration Mechanics", "Deforming Projectile", "Metallic Target".

مقدمه

در بررسی و تحلیل پدیده نفوذ پرتابه در هدف از سه رویکرد مشخص استفاده می شود که عبارتند از:

۱- استخراج روابط تجربی بر مبنای تستهای بالستیکی متعدد
۲- حل عددی معادلات حاکم با استفاده از روش هایی از قبیل اجزاء محدود (F. E. M.)

۳- استفاده از مدل های تحلیلی مهندسی که با انجام فرضیاتی، مکانیزم واقعی پروسه نفوذ ساده سازی شده و روابط فیزیکی حاکم به معادلات جبری یا دیفرانسیلی یک یا دو بعدی تبدیل شده و حل می گردد.

به دلیل مشکلات و محدودیتهای موجود در روشهای تجربی و عددی، امروزه مدل های تحلیلی مهندسی مورد توجه جدی بوده و کاربرد گسترده ای در طراحی زره ها و سازه های مقاوم در برابر نفوذ پرتابه پیدا کرده است و معمولاً تستهای تجربی و جوابهای عددی جهت مقایسه و شناخت بهتر فرایند نفوذ بکار می روند.

فرایند نفوذ در هدفهای با ضخامت محدود بسیار پیچیده تر از هدفهای نیمه بی نهایت است، چرا که سطح آزاد پشت هدف در فرایند نفوذ تاثیر می گذارد. از طرف دیگر در برخورد پرتابه ها با هدفهای با ضخامت محدود مودهای مختلف شکست از قبیل پلاگینگ، پتالینگ، اسپالینگ و ... می تواند ایجاد شود که نوع شکست به عوامل مختلفی از جمله ابعاد هندسی پرتابه و هدف و خواص مادی آنها بستگی خواهد داشت، در حالی که مکانیزم آسیب در هدفهای نیمه بینهایت تنها ایجاد حفره می باشد. لذا هدفهای نیمه بینهایت مطالعات اولیه بر روی تعامل پرتابه و هدف بسیار مناسب اند، اگر چه از جهت کاربردی هدفهای واقعی با ضخامت محدود مورد توجه می باشند. بنابراین با توجه به پیچیدگی تحلیل مسئله نفوذ در هدفهای با ضخامت محدود، می توان به اهمیت بررسی نفوذ در هدفهای نیمه بینهایت و تئوری های ارائه شده در این زمینه پی برد. در حقیقت تعیین عمق نفوذ در هدفهای نیمه بینهایت می تواند پایه خوبی برای تخمین ضخامت حد بالستیک (ضخامت لازم برای جلوگیری از عبور پرتابه از هدف) باشد که در طراحی زره ها کاربرد موثری دارد. یک مدل تحلیلی برای بررسی نفوذ پرتابه های با دماغه اجایو در هدف فلزی ضخیم توسط (Sundararajan 1992) و Dikshit & (مدل DS) ارائه شده است که در مقایسه با

جوابهای تجربی تطابق نسبتاً خوبی را نشان می دهد. در این مقاله [1] اشتباهاتی بود که بعداً توسط آقایان لیاقت و ملک زاده (1995) اصلاح شد و منجر به نزدیک شدن جوابهای بدست آمده از مدل به نتایج تجربی گردید [2].

همچنین آقایان لیاقت و ملک زاده (۱۹۹۹) یک مدل اصلاحی بر مبنای مدل قبلی ارائه دادند که در آن برای یک رابطه تجربی ارائه شده در مدل، رابطه ای تئوری پیشنهاد شده است که نیاز به رابطه تجربی را بر طرف ساخته و در ضمن جواب های بدست آمده در اکثر مواقع به مقادیر تجربی نزدیک تر است [3].

در مدل دیکشیت - ساندراراجان، مشابه اکثر مدل های تحلیلی دیگر، پرتابه صلب فرض شده و تغییر فرم آن لحاظ نشده است و با توجه به اینکه در تستهای تجربی، سختی پرتابه دو برابر سختی هدف بوده در واقع از تغییر فرمهای کوچک پرتابه صرف نظر شده است. در صورتی که در بسیاری از موارد کاربردی، نفوذ پرتابه های معمولی اغلب با تغییر فرمهای زیادی همراه بوده و مقادیر به دست آمده برای عمق نفوذ اختلاف زیادی با مدل DS نشان می دهد.

بر اساس یک سری تستهای بالستیکی که با استفاده از پرتابه های با کالیبر ۵/۵۶ و ۷/۶۲ میلیمتر در هدفهای فولادی انجام گرفت، اولاً اختلاف زیاد بین نتایج بدست آمده از مدل دیکشیت با تستهای تجربی نشان داد که تا چه حد تغییر فرمهای پرتابه می تواند مهم باشد که در این مدل صرف نظر شده است، و ثانیاً نوع تغییر فرم ایجاد شده در پرتابه نشانگر نوعی سیلان و جریان هیدرو دینامیکی بود که ایده استفاده از تئوری های هیدرو دینامیکی نفوذ را تداعی می کرد. بنابراین کار پلاستیک انجام گرفته روی پرتابه با بعضی فرضیات ساده کننده و به کمک معادله هیدرو دینامیکی ارائه شده توسط Tate (1967) [4] و مدل بهبود یافته Tate (1986) [5] تخمین زده شد و به سه نوع اتلاف انرژی که در مدل DS در نظر گرفته شده بود اضافه گردید.

در این مقاله برای روشن شدن تحقیقات انجام گرفته ابتدا شرح مختصری از تئوری دیکشیت - ساندراراجان و بعضی اصلاحات انجام گرفته توسط آقایان لیاقت و ملک زاده بیان می شود و سپس مدل تعمیم یافته جدید برای لحاظ کردن تغییر فرم پرتابه ارائه گردیده و با نتایج حاصل از تستهای بالستیکی مقایسه خواهد شد.

۲- خلاصه ای از مدل دیکشیت - ساندراراجان [1]

این مدل بر اساس روش انرژی ارائه شده و تغییرات انرژی جنبشی پرتابه در طی فرایند نفوذ $\left(\frac{dE_{kin}}{dx}\right)$ با

منحنی اجایو دماغه پرتابه از رابطه:

$$r = a\sqrt{x} + b \quad (6)$$

بدست می آید که a و b مقادیر ثابتی هستند.

با توجه به بقاء جرم، سرعت جریان رو به عقب مواد هدف از رابطه زیر بدست می آید:

$$V_b = \frac{V}{\alpha^2 - 1} \quad (7)$$

بنابراین سرعت نسبی جریان مواد هدف نسبت به پرتابه خواهد شد:

$$V_{bp} = V + V_b = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 - 1} V \quad (8)$$

همچنین تغییرات انرژی جنبشی پرتابه طی فرایند نفوذ از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\frac{dE_{kin}}{dx} = (m_o + \beta U_c \rho) V \left(\frac{dV}{dx} \right) + 0.5V^2 \beta \rho \left(\frac{dV}{dx} \right) \quad (9)$$

و از تساوی افت انرژی جنبشی پرتابه با انرژی تلف شده در هدف داریم:

$$\frac{dE_{kin}}{dx} = \frac{dE_{pl}}{dx} + \frac{dE_{fr}}{dx} + \frac{dE_{in}}{dx} \quad (10)$$

که از آن معادله ای به صورت زیر بدست می آید:

$$\frac{dV}{dx} = f(V, m_o, \beta, U_c, \rho, K_{od}, \epsilon, n, U_d, K, \alpha, \mu, A_c) \quad (11)$$

از رابطه اخیر در هر لحظه از فرایند نفوذ، بازاء عمق نفوذ dx ، مقدار تغییر یا کاهش سرعت (dV/dx) بدست می آید و با محاسبه سرعت لحظه ای جدید پرتابه، این رابطه برای عمق نفوذ dx بعدی دوباره حل می شود. و این روند تا زمانی که سرعت پرتابه به صفر برسد ادامه می یابد و در نهایت عمق نفوذ کل محاسبه می گردد.

یکی از مشکلات این مدل نیاز آن به یک رابطه تجربی است که بر مبنای تستهای متعدد پارامتر α ضخامت بی بعد منطقه پلاستیک اطراف حفره را می توان بدست آورد.

مجموع تغییرات سه نوع انرژی مصرفی معادل قرار داده شده است. انرژی های مصرفی عبارتند از:

(E_{pl}) : انرژی صرف شده برای کار پلاستیک مواد هدف

$$\frac{dE_{pl}}{dx} = \left(\frac{K_{od} \epsilon^{n+1}}{n+1} \right) \left(\frac{dU_d}{dx} \right) \quad (1)$$

(E_{in}) : انرژی ایجاد اینرسی جهت تغییر مکان مواد هدف

$$\frac{dE_{in}}{dx} = 0.5k\rho V(1-\beta) \left(\frac{\alpha^2}{\alpha^2 - 1} \right)^2 \left(\frac{dU_c}{dx} \right) \quad (2)$$

(E_f) : اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک بین سطوح لغزش پرتابه و هدف

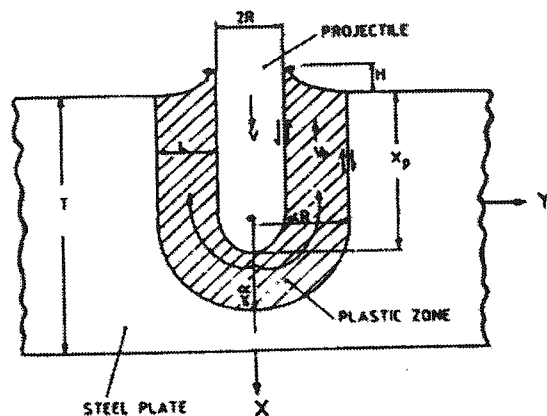
$$\frac{dE_{fr}}{dx} = \mu K_{od} \epsilon^n A_c \left(\frac{\alpha^2}{\alpha^2 - 1} \right) (1-\beta) \quad (3)$$

که در روابط فوق K_{od} و n به ترتیب ضریب استحکام دینامیکی و توان کار سختی است که در رابطه نمایی مربوط به رفتار پلاستیک ماده هدف به صورت زیر می باشد:

$$\sigma = K_{od} \epsilon^n \quad (4)$$

و α ضخامت بی بعد منطقه پلاستیک اطراف حفره به شکل زیر تعریف می شود (شکل ۱):

$$\alpha = \frac{L_p + r}{r} = 1 + \frac{L_p}{r} \quad (5)$$



شکل (۱) طرح شماتیک نفوذ پرتابه و منطقه پلاستیک اطراف حفره.

۲- مدل اصلاحی لیاقت-ملک زاده [3]

در این روش اصلاحی، برای محاسبه پارامتر تجربی ضخامت بی بعد منطقه پلاستیک اطراف حفره (α) یک راه حل تئوری پیشنهاد شده است که مدل قبلی [1] را از یک رابطه تجربی بی نیاز می کند. طبق مدل اصلاحی [3] پارامتر α می تواند از معادل قرار دادن کار اصطکاک با انرژی گرمایی ایجاد شده در ماده جابجا شده در هدف در اثر نفوذ پرتابه بدست آید. انرژی گرمایی مورد نیاز برای افزایش دمای جرم معین m به اندازه ΔT برابر است با:

$$Q = m C_p \Delta T \quad (12)$$

و جرم m خواهد شد:

$$m = \rho \int \pi r^2(x) dx \quad (13)$$

از تساوی کار اصطکاک W_{fr} با انرژی گرمایی Q رابطه ای بصورت زیر بدست می آید:

$$\rho C_p \Delta T \pi \int r^2(x) dx = \mu K_0 \varepsilon^n A \left(\frac{\alpha^2}{\alpha^2 - 1} \right) x \quad (14)$$

در رابطه (14) A و μ پارامترهای وابسته به α هستند و می توان با فرض یک مقدار اولیه α مقادیر A ، μ و α جدید را بدست آورد و این کار را به صورت تکرار متوالی انجام داد تا به مقدار صحیح α رسید.

۴- کار پلاستیک مربوط به تغییر فرم پرتابه

برای پرتابه ای به طول L که در یک مرحله از نفوذ به میزان ΔL تغییر طول بدهد، کار پلاستیک می تواند از رابطه زیر تخمین زده شود:

$$\Delta E_{wp} = \sigma_{yp} A_e \Delta L \quad (15)$$

رابطه فوق را می توان به شکل زیر نوشت:

$$\frac{dE_{wp}}{dx} = \sigma_{yp} A_e \frac{dL}{dx} \quad (16)$$

و همچنین می توان نوشت:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{dL/dt}{dx/dt} \quad (17)$$

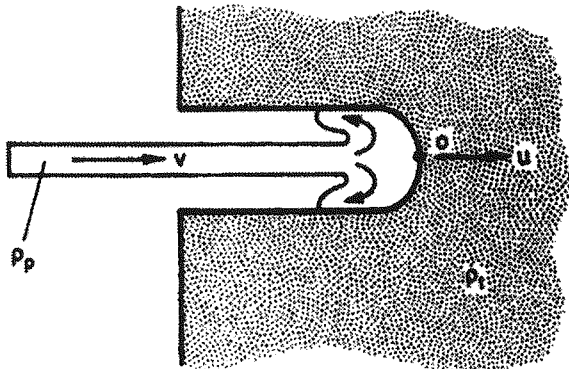
که

$$\frac{dx}{dt} = U \quad (18)$$

سرعت نفوذ پرتابه در هدف است. نرخ فرسایش پرتابه از رابطه ای سینماتیکی به صورت زیر بدست می آید:

$$\frac{dL}{dt} = - (V - U) \quad (19)$$

که V سرعت لحظه ای انتهای پرتابه و U سرعت نفوذ نوک پرتابه در هدف است (شکل ۲).



شکل (۲) طرح هیدرودینامیکی نفوذ پرتابه.

از رابطه (۱۶) و با جایگذاری روابط (۱۷) تا (۱۹) رابطه زیر بدست می آید:

$$\frac{dE_{wp}}{dx} = \sigma_{yp} A_e \frac{V - U}{U} \quad (20)$$

با توجه به تستهای بالستیکی انجام شده و مشاهدات صورت گرفته برای تخمین رابطه بین سرعت نفوذ (U) و سرعت پرتابه (V) با توجه به نوع تغییر فرم سیلانی پرتابه و تشابه با تئوری هیدرودینامیکی ارائه شده توسط Tate (1967) معادله ای به صورت زیر مورد استفاده قرار گرفته است [4]:

$$\frac{1}{2} \rho_p (V - U)^2 + Y_p = \frac{1}{2} \rho_t U^2 + R_t \quad (21)$$

از رابطه فوق می توان نوشت:

$$U = \frac{1}{1 - \eta^2} \left[V - \eta \sqrt{V^2 + B} \right] \quad (22)$$

$$\frac{dE_{wp}}{dx} = \sigma_{yp} A_e \frac{V \left[\frac{1}{1-\eta^2} (V-\eta\sqrt{V^2+B}) \right]}{\frac{1}{1-\eta^2} [V-\eta\sqrt{V^2+B}]} \quad (27)$$

برای پرتابه های با سطح مقطع غیر تخت می توان از یک سطح مقطع موثر استفاده کرد. اخیراً (1998) Zaera برای محاسبه قطر، طول و سطح مقطع موثر پرتابه های غیر تخت روابطی به صورت زیر ارائه داده است که می تواند در رابطه (27) مورد استفاده قرار گیرد [12].

$$D_{eq} = \int_0^L D^3(z) dz / \int_0^L D^2(z) dz \quad (28)$$

$$L_{eq} = 4M_p / \pi D_{eq}^2 \rho_p \quad (29)$$

$$A_{eq} = \pi D_{eq}^2 / 4 \quad (30)$$

با اضافه کردن عبارت مربوط به تغییرات کار پلاستیک پرتابه به 3 نوع اتلاف انرژی مطرح شده در مدل قبلی رابطه نهایی به صورت زیر بدست می آید:

$$\frac{dE_{kin}}{dx} = \left(\frac{dE_{pl}}{dx} + \frac{dE_{fr}}{dx} + \frac{dE_{in}}{dx} \right) + \left(\frac{dE_{wp}}{dx} \right) \quad (31)$$

که با جایگذاری هر یک از جملات موجود در رابطه فوق به کمک رابطه ای مشابه رابطه (11) می توان تغییرات سرعت (dV/dx) را بازاء هر مرحله از نفوذ dx محاسبه کرده و همانند روش ذکر شده با حل نمودی عملیات را ادامه داده و عمق نفوذ کل را بدست آورد.

همچنین می توان با در نظر گرفتن بقاء مومنتم و از تساوی تنش با مقاومت تسلیم پرتابه به روابط زیر رسید:

$$F = \rho_p LA \frac{dV}{dt} \quad (32)$$

$$Y_p = -\rho_p L \frac{dV}{dt} \quad (33)$$

و با حذف dt از روابط (19) و (33) بدست می آید:

$$dL = \frac{\rho_p L (V-U)}{Y_p} dV \quad (34)$$

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

Tate (1967) برای پرتابه Y_p را برابر حد الاستیک هاگونیوت (HEL) و برای هدف R_t را $2/5$ برابر HEL آن در نظر گرفت [4]. حد الاستیک هاگونیوت به عنوان تنش تسلیم تحت شرایط کرنش یک بعدی تعریف می شود و رابطه آن بر حسب تنش تسلیم به صورت زیر است:

$$HEL = \frac{1-v}{1-2v} \sigma_y \quad (23)$$

Tate (1985, 86) برای Y_p و R_t روابط زیر را ارائه داده است [6,5]:

$$\sigma_{yp} = 4.2 \times Bhn \quad (MP_a) \quad (24)$$

$$Y_p = 1.7 \sigma_{yp} \quad (25)$$

$$R_t = \sigma_{yt} \left[\frac{2}{3} + \ln \frac{0.57 E_t}{\sigma_{yt}} \right] \quad (26)$$

تئوری Tate در سالیان گذشته به طور موفقی در تحلیل نفوذ پرتابه های بلند و هدفهای نیمه بینهایت مورد استفاده قرار گرفته است و در حدود 30 سال گذشته به عنوان یک مدل استاندارد مرجع مطرح بوده است [7]. شرح مبانی و روند بهبود این تئوری در مرجع [8]، بکارگیری تئوری در اهداف سرامیکی و سرامیک - فلزی در مرجع [9] و کاربرد آن در طراحی پرتابه ها و زره های مقاوم در مرجع [10] و مقایسه این مدل با مدل های دیگر در تحلیل نفوذ پرتابه های میله ای در هدف های با ضخامت محدود در مرجع [11] ارائه شده است.

5- تعمیم مدل دیکشیت با لحاظ کردن تغییر فرم پرتابه

با در نظر گرفتن کار پلاستیک انجام شده بر روی پرتابه و تغییرات آن به صورت رابطه (20) و با جایگذاری از رابطه (22) عبارت جدید مربوط به تغییرات کار پلاستیک پرتابه به صورت زیر به دست می آید:

۷- مقایسه نتایج تئوری و تجربی

بر اساس مدل دیکشیت - ساندراراجان [1] با بعضی اصلاحات انجام گرفته توسط آقایان لیاقت - ملک زاده (مدل DS - LM) [3] به کمک نرم افزار Matlab برنامه ای تهیه گردید که صحت آن در مقایسه با نتایج ارائه شده در مقاله مرجع [1] مورد تایید قرار می گیرد.

به علاوه برای مدل تعمیم یافته بالحاظ کردن تغییر فرم های پرتابه بر مبنای تئوری ارائه شده در قسمتهای قبل (مدل DS - KH) برنامه کامپیوتری قبلی اصلاح و تکمیل گردید.

نتایج بدست آمده از مدل های تحلیلی و تست های بالستیکی در جدول (۲) خلاصه شده و جهت مقایسه در شکل (۳) نمایش داده شده است.

از شکل (۳) مشاهده می شود جوابهای به دست آمده از مدل جدید (DS-KH) به مقادیر تجربی بسیار نزدیک است، درحالی که مدل اولیه، عمق نفوذ بیشتری را پیش بینی می کند و جوابهای آن با یافته های تجربی تفاوت زیادی دارد.

جدول (۲): مقایسه مقادیر عمق نفوذ (بر حسب mm) از تست های تجربی و مدل های تحلیلی.

شماره تست	مقدار تجربی	مدل اولیه (DS-LM)	مدل جدید (DS-KH)
تست ۱	9.2	20.2	9.6
تست ۲	9.5	20.2	9.6
تست ۳	6.4	18.0	6.9
تست ۴	7.0	18.0	6.9
تست ۵	11	26.7	9.5

۸- نتیجه گیری

الف) تحلیل نفوذ پرتابه در هدف های ضخیم می تواند مبنای خوبی برای تخمین ضخامت حد بالستیک (ضخامت لازم برای جلوگیری از عبور پرتابه از هدف) باشد.

ب) مدل ارائه شده توسط دیکشیت - ساندراراجان (DS) و مدل اصلاحی لیاقت و ملک زاده (DS-LM) برای تحلیل نفوذ پرتابه های خیلی سخت که تغییر فرم های قابل توجهی ندارند، جوابهای خوبی می دهند، ولی برای پرتابه های معمولی که در برخورد با هدف تغییر فرم های قابل توجهی دارند، عمق نفوذ زیادی را پیش بینی می کند که دور از واقعیت است.

ج) در این مقاله کارپلاستیک انجام شده بر روی پرتابه به

از رابطه (۳۴) تغییر طول پرتابه dL به ازاء تغییر سرعت dV بدست می آید و می توان این تغییر طول را در هندسه وارد نمود و در مرحله بعدی نفوذ از طول و هندسه جدید استفاده نمود.

بدین ترتیب دماغه پرتابه در هر مرحله به اندازه dL کوتاه شده و به تدریج تغییر فرم داده و به سطح مقطع آن اضافه می شود.

با در نظر گرفتن این تئوری به کمک روش Tate در حالتی که $R_t > Y_p$ باشد، از رابطه (۲۱) یک سرعت بحرانی (V_c) بدست می آید که بازاء سرعت های کمتر از آن، نفوذ متوقف می گردد ($U = 0$) ولی تغییر فرم پرتابه ممکن است ادامه یابد:

$$V_c = \sqrt{\frac{2(R_t - Y_p)}{\rho_p}} \quad (35)$$

بعلاوه در حالت ($R_t \leq Y_p$) یک سرعت حدی به دست می آید که بازاء آن و سرعت های کمتر، پرتابه تغییر فرمی نمی دهد و به صورت یک جسم صلب در هدف نفوذ می کند ($V = U$):

$$V_s = \sqrt{\frac{2(Y_p - R_t)}{\rho_t}}$$

بنابراین در حالت پرتابه مقاوم تر از هدف ($R_t \leq Y_p$) نفوذ پرتابه و در نتیجه عملیات حل معادلات تا وقتی که پرتابه به سرعت صفر برسد انجام می گیرد و در حالت هدف مقاوم تر از پرتابه ($R_t > Y_p$) نفوذ و عملیات حل تا رسیدن سرعت V به مقدار بحرانی V_c ادامه خواهد داشت و پس از آن نفوذ متوقف می گردد.

۹- نتایج آزمایش های بالستیکی

یک سری آزمایش های بالستیکی برای بررسی مدل های ارائه شده ترتیب داده شد که در آن پرتابه های با کالیبر ۵/۵۶ و ۷/۶۲ میلیمتر به اهداف فولادی St ۳۷ که در فاصله ۲۵ متر قرار داشت شلیک شد. مشخصات تست شامل نوع تفنگ، کالیبر و سرعت پرتابه، ضخامت هدف و نتایج عمق نفوذ و قطر حفره در جدول (۱) خلاصه شده است:

جدول (۱): مشخصات تست های بالستیکی و نتایج به دست آمده.

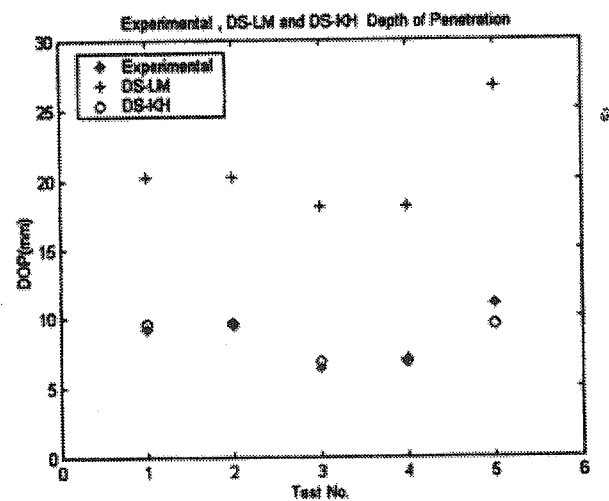
شماره تست	تست ۱	تست ۲	تست ۳	تست ۴	تست ۵
نوع تفنگ	M16	M16	M16	M16	M16
کالیبر (قطر پرتابه) (mm)	5.56	5.56	5.56	5.56	7.62
سرعت پر خورده (mm/s)	1022	1022	857	857	840
ضخامت هدف (mm)	15	15	15	10	25
عمق نفوذ (mm)	9.2	9.5	6.4	7.0	11
قطر حفره (mm)	9.4	9.3	9.9	9.1	---

سه نوع انرژی مصرفی هدف در حین پروسه نفوذ اضافه گردیده است.

د) بر اساس مشاهدات تجربی حاصل از تستهای بالستیکی انجام شده و با توجه به نوع تغییر فرم سیلانی پرتابه، از تئوری هیدروپدینامیکی نفوذ (مدل AT) برای ارتباط بین سرعت پرتابه و سرعت نفوذ در هدف ایده گرفته شده است.

ه) به کمک روابط سینماتیکی و بقاء مومنتم تغییرات هندسه پرتابه تقریب زده شده و در هر مرحله از حل معادلات اعمال گردیده است.

و) جوابهای به دست آمده از مدل ارائه شده در این مقاله (مدل DS-KH) در مقایسه با مقادیر تجربی همخوانی نزدیکی داشته و می توان از این مدل در طراحی هدفهای فلزی مقاوم در برابر پرتابه های رایج با کالیبر کوچک استفاده کرد.



شکل (۳) مقایسه نتایج مدل‌های DS-LM و DS-KH و مقادیر تجربی عمق نفوذ

فهرست علائم

A_c	سطح تماس بین پرتابه و هدف
A_e	سطح مقطع موثر پرتابه
Bhn	سختی برینل
C_p	ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت
D(Z)	منحنی دماغه پرتابه
DS	مدل دیکشیت - ساندررا راجان
DS-LM	مدل تلفیقی دیکشیت - ساندررا راجان و لیاقت - ملک زاده
DS-KH	مدل تلفیقی دیکشیت - ساندررا راجان و خدارحمی
dx	نمو عمق نفوذ
E_{fr}	اتلاف انرژی در اثر اصطکاک
E_{in}	انرژی ایجاد اینرسی مواد هدف

انرژی جنبشی پرتابه	E_{kin}
انرژی مصرفی کار پلاستیک در هدف	E_{pl}
انرژی تلف شده برای کار پلاستیک پرتابه	E_{wp}
مدول الاستیسیته هدف	E_t
حد الاستیک هاگنپوت	HEL
ضریب شکل دماغه پرتابه	K
ضریب استحکام دینامیکی	K_{od}
ضخامت منطقه پلاستیک اطراف حفره	L_p
طول پرتابه	L
تغییر طول در هر مرحله	ΔL
جرم پرتابه	m_o
جرم ماده جابجا شده هدف	m
توان کارسختی	n
انرژی گرمایی	Q
شعاع در هر نقطه از دماغه پرتابه	r
مقاومت هدف در برابر نفوذ	R_t
متوسط دمای محیط و دمای کار گرم هدف	ΔT
زمان	t
حجم حفره	U_c
حجم منطقه پلاستیک اطراف حفره	U_d
سرعت نفوذ پرتابه در هدف	U
سرعت لحظه ای پرتابه	V
سرعت بحرانی	V_c
سرعت حدی	V_s
سرعت جریان رو به عقب مواد هدف	V_b
سرعت نسبی جریان رو به عقب مواد هدف و پرتابه	V_{bp}
کار اصطکاک	W_{fr}
مختصه در امتداد محور پرتابه	x
مقاومت تسلیم دینامیکی پرتابه	Y_p

فهرست علائم یونانی

α	ضخامت بی بعد منطقه پلاستیک اطراف حفره
β	ضریب تعیین کننده جهت حرکت مواد هدف
ϵ	کرنش پلاستیک متوسط
σ_{yp}	تنش تسلیم پرتابه
ν	ضریب پواسون
μ	ضریب اصطکاک
ρ_p	دانسیته پرتابه
ρ_t	دانسیته هدف
σ_{yt}	تنش تسلیم هدف
σ	تنش

مراجع

- [1] S.N. Dikshit, G.Sundararajan, "The Penetration of Thick Steel Plates by Ogival Shaped Projectiles: Experiments and Analysis", *Int.J. Impact Engng.* 12(3), 373-408, (1992).
- [2] G. H. Liaghat, A. Malekzadeh, "A Comment on the Penetration Theory by Dikshit and Sundararajan", *Int.J. Impact Engng.* 16(4), p.691, (1995).
- [3] G. H. Liaghat, A. Malekzadeh, "A Modification to the Mathematical Model of Perforation by Dikshit and Sundararajan", *Int. J. Impact Engng.* 22,543-550,(1999).
- [4] A. Tate, "A Theory for the Deceleration of Long Rods after Impact", *J. Mech. Phys. Solids*, 15,387-399,(1967).
- [5] A. Tate, "Long Rod Penetration Models - Part II. Extensions to Hydrodynamics Theory of Penetration", *Int. J. Mech. Sci.* 28(9), 599-612,(1986).
- [6] A.Zukas, "High Velocity Impact Dynamics", Wiley - Interscience publication (1990).
- [7] Z. Rosenberg, E. Dekel, "A Critical Examination of the Modified Bernolli Equation Using Two-Dimensional Simulation of Long Rod Penetrator", *Int.J. Impact Engng.*, Vol.15,p.711(1994).
- [8] حسین خدارحمی، غلامحسین لیاقت، علیرضا فلاحی آرزودار، "بررسی تئوری هیدرودینامیکی نفوذ پرتابه های انرژی جنبشی بلند" هفتمین کنفرانس مهندسی مکانیک، ۱۳۷۸، جلد ۱
- [9] حسین خدارحمی، علیرضا فلاحی آرزودار، غلامحسین لیاقت، "بررسی نفوذ پرتابه های میله ای بلند در هدفهای سرامیکی و سرامیک - فلزی" فصلنامه فنی و مهندسی "پیام باور"، شماره ۹ و ۱۰، (۱۳۷۸).
- [10] حسین خدارحمی، غلامحسین لیاقت، علیرضا فلاحی آرزودار، "کاربرد تئوری هیدرودینامیکی در طراحی موشکهای ضد زره K.E. و زره های مقاوم در برابر آن"، همایش سراسری موشکهای هدایت شونده ضد زره، (۱۳۷۹).
- [11] حسین خدارحمی، غلامحسین لیاقت، علیرضا فلاحی آرزودار، «تحلیل نفوذ پرتابه های میله ای بلند در هدف های نیمه بی نهایت و تعمیم آن در هدف های چند لایه»، در حال چاپ در فصلنامه فنی مهندسی مدرس دانشگاه تربیت مدرس) (۱۳۸۰).
- [12] R. Zaera, "Analytical Modelling of Normal and Oblique Ballistic Impact on Ceramic Metal Lightweight Armours", *Int. J. Impact Engng.* 21(3), 133-148, (1998).