ISME

تحليل برخورد و نفوذ پرتابه هاي با چرخش غيرمحوري در صفحات فلزي ضخيم

سعيدفعلي[1]
استاديار

محمدابراهيم اعلمي آل آقا [2]
استاديار

سعيد ملكيان[3]
كارشناس ارشد

در اين مقاله مدل تحليلي جديدي براي تحليل نفوذ مايل پرتابه هاي با چرخش غير محوري (تامبليگ) در صفحات فلزي توسعه داده شده است. پرتابه تغيير شكل پذير و مدل رفتار ماده صفحه فلزي صلب - پلاستيك با كار سختي غير خطي مي باشد. در اين مدل تحليلي فرايند نفوذ به سه مرحله فرسايش هدف، پلاگينگ و توسعه سوراخ و مرحله پلاگينگ نفوذ بر اساس سرعت موج تنش پلاستيك در پلاگ حاصل در هدف، به ۴ مرحله ايجاد حفره، شكل گيري پلاگ، جدايش پلاگ و لغرش پلاگ تقسيم بندي شده است. در هر مرحله معادلات حاكم با توجه به معادله بقاء اندازه حركت و روابط هندسي موجود استخراج گرديده و حل شده اند. سرعت باقيمانده و زاويه آبليك نهايي حاصل از اين مدل تحليلي همخواني مناسبي با نتايج تجربي داشته است. لذا اين مدل تحليلي مي تواند روش جديدي در شبيه سازي نفوذ پرتابه هاي با چرخش غير محوري در اهداف فلزي ضخيم باشد.

واژه‌هاي راهنما: پرتابه، چرخش غير محوري، صفحه فلزي، پلاگينگ

۱ - مقدمه

بحث برخورد اجسام و نفوذ پرتابه در هدف بيش از صد سال است كه مورد توجه دانشمندان و محققين واقع شده و در دهه هاي اخير دهها كنفرانس و سمپوزيوم علمي بين المللي تحت عناوين شوك و ضربه، بالستيك و ضربه مافوق صوت برگزار گرديده است. اين موضوع ابتدا با انگيزه هاي دفاعي و نظامي دنبال شد و در مواردي از قبيل طراحي بدنه مقاوم خودروهاي نظامي، كشتيهاي نظامي و ... كاربرد پيدا كرد، ولي امروزه اين موضوع كاربردهاي غيرنظامي متنوعي يافته است. محافظت ازماهواره ها و فضاپيماها در برابر برخورد شهابها ، محافظت از راكتورها و وسايل حمل مواد خطرناك كه از جهت زيست محيطي بسيار قابل اهميت است و همچنين مقاوم سازي بدنه هليكوپترها و هواپيماها در برابر برخورد و طراحي پناهگاهها نمونه هايي هستند كه مستقيما با بحث مكانيك نفوذ ارتباط دارند.

[1] نویسنده مسئول، استادیار، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه Felisaeid@gmail.com
[2] استاديار، بخش مهندسي مكانيك، دانشگاه رازي، كرمانشاه
[3] کارشناس ارشد، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

مدلسازي تحليلي نفوذ مايل پرتابه هاي با چرخش غير محوري (Tumbling) در اهداف فلزي از جمله موضوعات جديد در علم مکانيک نفوذ مي باشد. در اين حالت، پرتابه بصورت مايل به هدف برخورد مي کند و علاوه بر آن داراي چرخش غير محوري حول مرکز جرم با سرعت زاويه اي ω مي باشد.

در اكثر تحقيقات تحليلي، عددي يا تجربي موجود برخورد و نفوذ پرتابه در هدف يا بصورت عمودي و بدون چرخش محوري در نظر گرفته شده و يا در نفوذ مايل، از اثر سرعت زاويه اي و چرخش غير محوري در فرايند نفوذ صرفنظر شده است.

بررسي كاملي از مكانيك نفوذ عمودي يا مايل پرتابه‌ها بدون چرخش غير محوري در اهداف عمدتاً فلزي توسط Backman و Goldsmith [۱] ، Zukas [۲] و Corbett و همكاران [۳] انجام شده است. اين مقالات شامل اكثر تحقيقات تجربي و تحليلي انجام شده توسط محققين در مسائل نفوذ عمودي پرتابه‌هاي مختلف در اهداف فلزي مي‌باشد. علاوه بر آن در مراجع [۴] تا [۸] مكانيك نفوذ پرتابه ها در شرايط متفاوت برخورد و نفوذ در اهداف فلزي و غير فلزي توسط محققين اين مقاله بررسي و تحليل شده است.

Liss و Goldsmith [۹] مدل تحليلي براي نفوذ عمودي پرتابه ها در ورقهاي فلزي نازک ارائه نمودند. پرتابه بصورت صلب و بدون تغيير شكل و رفتار ماده هدف نيز به صورت صلب – پلاستيک با كار سختي خطي در نظر گرفته شده است. در اين روش از تئوري انتشار موج تنش پلاستيک استفاده شده و فرايند نفوذ به پنج مرحله شامل: فرورفتگي، شکل گيري پلاگ، جدايش پلاگ لغزش پلاگ و تغيير شکل بعد از نفوذ تقسيم بندي شده و در هر مرحله معادلات حاکم استخراج گرديده است. نتايج اين روش تحليلي با نتايج تجربي مقايسه و همخواني مناسبي بين نتايج مدل تحليلي و تجربي مشاهده گرديده است.

Li و Goldsmith [۱۰] مدل تحليلي براي توصيف فرايند نفوذ پرتابه هاي صلب با چرخش غير محوري (تامبلينگ) در اهداف نازک ارائه نمودند. در اين روش هدف به صورت صلب كاملاً پلاستيک و پرتابه صلب در نظر گرفته شده است. در اين مدل تحليلي فرايند نفوذ به سه مرحله شامل پلاگينگ، توسعه سوراخ و پتالينگ تقسيم شده است. در مرحله پلاگينگ و توسعه سوراخ معادلات حركت و نيروي اعمال شده بر پرتابه محاسبه گرديده و در مرحله پتالينگ، كار لازم براي خمش و پارگي پتالها و انرژي جنبشي آنها محاسبه شده است. در زاويه برخورد زياد نتايج اين مدل تحليلي با نتايج تجربي همخواني ندارد.

مدلي تحليلي ديگري توسط Li و Goldsmith [۱۱] براي نفوذ پرتابه هاي با چرخش غير محوري (تامبلينگ) در اهداف فلزي ضخيم ارائه گرديد. اين كار از قويترين مدلهاي تحليلي است كه تا به حال در مورد پرتابه داراي چرخش غير محوري (تامبلينگ) ارائه شده است. در اين مدل تحليلي فرايند نفوذ در چهار فاز جداگانه شامل فرسايش، پلاگينگ ،توسعة سوراخ و پتالينگ تقسيم بندي شده و در هر مرحله معادلات حاكم استخراج گرديده است. در اين روش پرتابه بصورت صلب و ماده هدف بصورت صلب كاملا پلاستيک در نظر گرفته شده است.

در اين مقاله مدل تحليلي جديدي بر اساس مدل تحليلي Li و Goldsmith [۱۱] ارائه گرديده كه محدوديتهاي اين روش را پوشش ميدهد. در اين مدل تحليلي پرتابه بصورت تغيير شكل پذير در نظر گرفته شده و كاهش جرم ناشي از فرسايش آن در نظر گرفته شده است. همچنين مدل رفتار ماده هدف نيز بصورت صلب- پلاستيک با كار سختي غير خطي در نظر گرفته شده و سرعت انتشار موج تنش پلاستيک بر اساس

شرايط كرنش محوري در پلاگ اصلاح گرديده است، همچنين اثرات اصطكاک بين پرتابه و هدف در حين نفوذ در نظر گرفته شده است.

۲ - مدل تحليلي

تحليل فرايند نفوذ پرتابه ها در اهداف فلزي بواسطه كثرت پارامترهاي تاثير گذار در فرايند و مكانيزمهاي پيچيده ايجاد تغيير شكل در پرتابه و هدف پيچيده مي باشد. مطابق شكل ۱، پرتابه با زاويه θ نسبت به محور پرتابه، با سرعت زاويه اي ω و با سرعت V_0 به سطح هدف برخورد مي نمايد. زاويه بين محور اصلي پرتابه با راستاي بردار سرعت مركز جرم زاويه ياو (Yaw) يعني α و زاويه بين بردار سرعت و عمود بر سطح هدف زاويه β يا زاويه آبليك (Oblique) ناميده مي شود. مشخص است كه $\theta = \alpha - \beta$. بعد از برخورد به هدف سرعت زاويه اي، زواياي فوق و همچنين سرعت پرتابه تغيير نموده و پرتابه دچار كاهش جرم و تغيير طول مي گردد و مقداري از انرژي جنبشي اوليه آن صرف تغيير شكل پلاستيك در هدف خواهد شد.

در اين مدل تحليلي بر اساس روش Li و Goldsmith [۱۱] فرايند نفوذ در سه فاز جداگانه بررسي شده بطوريكه خروجي هر فاز شرايط اوليه فاز بعدي مي باشد، اين سه مرحله براي اهداف ضخيم شامل فرسايش هدف، پلاگينگ و توسعة سوراخ مي باشد و در شكل ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتايج بدست آمده از مطالعات آزمايشگاهي Li و Goldsmith [۱۱] مرحله پتالينگ در زواياي برخورد بالاي ۲۵ درجه بوجود مي آيد و لذا در اين مدل تحليلي با فرض برخورد با زواياي زير ۲۵ درجه از آن صرفنظر شده است. در ادامه روش مدلسازي و تحليل فرايند آورده شده است.

۲-۱- تغيير شكل پرتابه در برخورد به هدف

در مدل ارائه شده در اين مقاله بر خلاف روش Li و Goldsmith [۱۱] كه پرتابه بصورت صلب فرض شده، تغيير شكل پرتابه در طي فرايند نفوذ در نظر گرفته شده است. در مدل حاضر براي توصيف رفتار پرتابه از رابطه Tate [۱۲] و Alekseevskii [۱۳] استفاده شده است. اين رابطه كه بر مبناي معادله برنولي اصلاح شده براي تعادل فشار در فصل مشترك پرتابه- هدف مطرح شده است، به صورت زير بيان مي شود:

$$\sigma_{yp}^{D} + \frac{1}{2}\rho_p (V - V_1)^2 = \sigma_{yt}^{D} + \frac{1}{2}\rho_t V_1^2 \qquad (۱)$$

كه σ_{yp}^{D} تنش ديناميكي مادة پرتابه، σ_{yt}^{D} تنش ديناميكي ماده هدف و در حدود ۱/۵ برابر تنش تسليم استاتيكي مي باشد. V سرعت لحظه اي انتهاي پرتابه و V_1 سرعت نفوذ يا سرعت سطح مشترک پرتابه – هدف مي باشد. تغيير طول پرتابه در هر لحظه زماني برابرست با:

$$\frac{dl}{dt} = -(V - V_1) \qquad (۲)$$

با استفاده از روابط فوق هنگامي كه $V = V_1$ باشد سرعت پيشاني و انتهاي پرتابه برابر شده و فرسايش و تغيير شكل در آن متوقف شده و پرتابه به صورت يک جسم صلب به حركت خود ادامه خواهد داد.

۲-۲- مرحله اول نفوذ- فرسایش هدف

بر اساس روش Li و Goldsmith [۱۱] مرحله فرسايش از لحظه اوليه برخورد آغاز شده و تا زماني كه كل لبه تخت پرتابه با هدف تماس پيدا مي كند، خاتمه مي يابد. فشار اعمالي از سطح تخت پرتابه به هدف سه برابر تنش تسليم ماده هدف در نظر گرفته مي شود:

$$P = 3\sigma_{yp}^{D} \qquad (۳)$$

پارامترهاي هندسه مربوط به اين فاز در شكل ۳ نشان داده شده است. شكل (a -۳) پرتابه اي به شعاع R و طول L كه در هدف به اندازه z_P نفوذ كرده است را نشان مي دهد، در شكل (b -۳) تصويري از نماي روبروي پرتابه و در شكل (c- ۳) مقطع برش خوردة پرتابه در فاصله x_3 از پيشاني پرتابه نشان داده شده است.

شرط ايجاد تغيير شكل و فرسايش در پرتابه بر اساس معادله (۱) و فرض اينكه $\sigma_{yp}^{D} > \sigma_{yt}^{D}$ اين است كه سرعت اوليه برخورد پرتابه (V_0) بيشتر از مقدار زير باشد:

$$V_0 \geq \sqrt{\frac{2(\sigma_{yp}^{D} - \sigma_{yt}^{D})}{\rho_t}} \qquad (۴)$$

در غير اين پرتابه بصورت صلب حركت مي كند.

با توجه به شكلهاي (a- ۳) و (b - ۳) نيرو و گشتاور اعمال شده بر روي سطح پيشاني پرتابه از روابط زير محاسبه مي شوند.

$$F_f = \int_{R-b}^{R} dx_2 \int_{-\sqrt{R^2-x_2^2}}^{\sqrt{R^2-x_2^2}} P\, dx_1 \qquad (۵)$$

$$M_f = \int_{R-b}^{R} dx_2 \int_{-\sqrt{R^2-x_2^2}}^{\sqrt{R^2-x_2^2}} P x_2\, dx_1 \qquad (۶)$$

با توجه به روابط هندسي شكل (a-۳) داريم:

$$z_p = z_c + \frac{L}{2}\cos\theta + R\sin\theta \quad \text{و} \quad b = \frac{z_p}{\sin\theta} \qquad (۷)$$

لذا نيرو و گشتاور اعمال شده بر روي سطح پيشاني پرتابه با انتگرال گيري از معادلات (۵) و (۶) برابرست با:

$$F_f = PR^2\left[\frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\frac{R-b}{R} - \frac{(R-b)\sqrt{2Rb-b^2}}{R^2}\right] \qquad (۸)$$

$$M_f = \frac{2}{3}P(2Rb - b^2)^{3/2} \qquad (۹)$$

همچنين تغييرات عمق نفوذ پرتابه بر حسب زمان از معادله زير به دست مي آيد:

$$\frac{dz_p}{dt} = \left(-\frac{l}{2}\sin\theta + R\cos\theta\right)\frac{d\theta}{dt} + \frac{dz_c}{dt} + \frac{\cos\theta}{2}\frac{dl}{dt} \qquad (۱۰)$$

و:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \qquad \frac{dz_c}{dt} = V_z \qquad (۱۱)$$

به همين روش نيرو و گشتاور اعمال شده بر روي سطح جانبي پرتابه با محاسبات و ساده سازي از روابط زير به دست مي آيد:

$$F_l = p\,tg\,\theta\left[\frac{\pi R^2}{2} - \frac{R\sin\theta - z_p}{\sin^2\theta}\sqrt{z_p^2 - 2Rz_p\sin\theta} - R^2\sin^{-1}\left(1 - \frac{z_p}{R\sin\theta}\right)\right] \quad (۱۲)$$

$$M_l = \left(\frac{l}{2} + R\,tg\,\theta - \frac{z_p}{\cos\theta}\right)F_l - \frac{2}{3}p\,tg^2\theta\left[R^2 - \left(R - \frac{z_p}{\sin\theta}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}} \quad (۱۳)$$

نيروها، گشتاورها و اصطكاک وارد شده بر پرتابه را در اين مرحله مي توان به صورت شكل ۴ نمايش داد، نيروي اصطكاک و برآيند نيروهاي اعمالي بر پرتابه در جهات z, y برابرند با:

$$F_F = \mu F_l \quad (۱۴)$$

$$F_z = -(F_f + F_F)\cos\theta - F_l\sin\theta \quad (۱۵)$$

$$F_y = (F_f + F_F)\sin\theta - F_l\cos\theta \quad (۱۶)$$

با توجه به شكل ۴ برايند گشتاور حول مركز جرم پرتابه برابرست با:

$$M = M_l - M_f \quad (۱۷)$$

لذا نيروي هاي اعمالي به پرتابه در راستاي محورهاي z, y و برايند گشتاور اعمالي بر آن حول محور x با توجه به معادلات حركت برابرند با:

$$F_z = m_p\frac{d^2 z_c}{dt^2} \quad (۱۸)$$

$$F_y = m_p\frac{d^2 y_c}{dt^2} \quad (۱۹)$$

$$M = I_p\frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (۲۰)$$

كه m_p جرم لحظه اي پرتابه در طول فرايند نفوذ است و I_p (ممان اينرسي جرمي پرتابه) نيز با توجه به تغيير طول پرتابه در حين فرايند نفوذ با استفاده از رابطه زير محاسبه مي گردد:

$$\frac{dI_P}{dt} = \left[\frac{R^2}{4} + \frac{l^2}{12}\right]\frac{dm_p}{dt} + \left(\frac{m_p}{6}l\right)\frac{dl}{dt} \quad (۲۱)$$

با جايگذاري روابط (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) در معادلات حركت در هر لحظه شتاب مركز جرم پرتابه در جهات z, y و شتاب زاويه اي آن محاسبه خواهد شد. با استفاده از روابط فوق مولفه هاي شتاب مركز جرم پرتابه در جهات z, y و شتاب زاويه اي آن به صورت زير به دست مي آيند :

$$a_z = \frac{dV_z}{dt} = \frac{F_z}{m_p} \quad (۲۲)$$

$$a_y = \frac{dV_y}{dt} = \frac{F_y}{m_p} \quad (۲۳)$$

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{I_p} \quad (۲۴)$$

از طرفي با توجه به روابط هندسي موجود:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \qquad \frac{dz_c}{dt} = V_z \qquad \frac{dy_c}{dt} = V_y \quad (۲۵)$$

شرايط اوليه جهت حل معادلات ديفرانسيل فوق به صورت زير است :

$$\begin{cases} V_z(0)=V_0 \cos\beta_0 \\ V_y(0)=V_0 \sin\beta_0 \\ \omega(0)=\omega_0 \\ \theta(0)=\theta_0 \end{cases} \quad (۲۶)$$

كه β_0 زاويه راستاي سرعت مركز جرم پرتابه در لحظه برخورد و آغاز مرحله فرسايش است. V_0 سرعت اوليه برخورد، ω_0 و θ_0 به ترتيب سرعت زاويه‌اي اوليه و زاويه محور پرتابه با امتداد عمود بر هدف در لحظه برخورد مي باشند كه در لحظه اوليه برخورد مشخص هستند.

مرحله فرسايش هنگامي به پايان مي رسد كه تمامي پيشاني پرتابه با هدف تماس پيدا كند به عبارتي با توجه به شكل (a-۳):

$$z_p = 2R\sin\theta \quad (۲۷)$$

۳-۲- مرحله دوم نفوذ- پلاگینگ

اين مرحله از زماني كه $z_p \geq 2R\sin\theta$ باشد به عبارتي از زمانيكه تمامي سطح پشتيباني پرتابه با هدف تماس پيدا مي كند، آغاز مي شود. بر اساس روش Li و Goldsmith [۱۱] و مطابق شكل ۵ مرحله پلاگینگ شامل ۴ مرحله شكل گيري حفره، شكل گيري پلاگ، جدايش پلاگ و لغزيدن پلاگ مي باشد. به ماده تحت فشار كه بر اثر نيروي اعمالي پرتابه از ماده هدف جدا شده و تغيير شكل مي دهد، پلاگ گفته مي شود. معادلات حاكم در اين مرحله با توجه به تغيير مدل رفتار مادة هدف، تغيير شكل پذير در نظر گرفتن پرتابه و در نظر گرفتن اصطكاك پيرامون پرتابه تعيين خواهند شد. در مرحله پلاگینگ سطح جانبي پرتابه تحت اثر فشاري معادل فشار مرحله فرسايش است. در اين مرحله نيرو و ممان اعمالي بر روي سطح جانبي پرتابه از روابط زير بدست مي آيد :

$$F_l = 2PRS \quad (۲۸)$$

$$M_l = PR(LS - S^2) \qquad S = z_p / \cos\theta \quad (۲۹)$$

در اين مرحله با توجه به رفتار صلب - پلاستيك با كار سختي غير خطي ماده هدف رابطه تنش كرنش به صورت زير مي باشد:

$$\sigma_s = A + B\varepsilon^n \quad (۳۰)$$

كه ضرايب A، B، n ثوابت خواص ماده هدف و ε كرنش حاصل در پلاگ در شرايط كرنش محوري است و σ_s تنش معادل ايجاد شده در پلاگ مي باشد. در طول مرحله پلاگینگ با توجه به اينكه تمامي سطح پيشاني پرتابه با هدف تماس پيدا كرده، ممان اعمالي بر روي سطح پيشاني پرتابه صفرخواهد بود، لذا:

$$M_f = 0 \Rightarrow M = M_l \quad (۳۱)$$

پارامترهاي هندسي پرتابه و هدف در طول مرحله پلاگینگ در شكل ۵ نشان داده شده اند. جابجايي هاي محوري x_4, x_3, x_2, x_1، سرعتهاي V_4, V_3, V_2, V_1 پرتابه و هدف را در طول فرايند نفوذ ايجاد مي كنند. در ادامه هر يک از چهار مرحله نفوذ پلاگینگ و معادلات حاكم آورده شده است.

۱-۳-۲- ايجاد حفره در هدف

اين حالت هنگامي بوجود مي آيد كه سرعت سطح مشترك پرتابه – هدف از سرعت موج تنش پلاستيك در پلاگ بيشتر شود. در اين حالت موج تنش پلاستيك نمي تواند در پلاگ منتشر شود. با توجه به اينكه پلاگ در شرايط كرنش محوري است سرعت موج تنش پلاستيک در پلاگ در شرايط كرنش محوري از معادله زير استخراج مي گردد [۶]:

$$C_p = (\frac{K}{\rho_t} + \frac{2}{3\rho_t}\frac{\partial\sigma_s}{\partial\varepsilon_x})^{\frac{1}{2}} \quad (۳۲)$$

كه K مدول بالك ماده هدف مي باشد. نيروي محوري اعمال شده بر روي سطح پيشاني پرتابه در اين مرحله از رابطه زير به دست مي آيد:

$$F_f = (\sigma_s + \rho_t V_1^2)\pi\ R^2 \quad (۳۳)$$

علاوه بر آن نيرو و ممان اعمال شده بر سطح جانبي پرتابه از معادلات (۱۲) و (۱۳) تعيين مي گردند. بنابراين مقادير F_y, F_z نيروهاي اعمال شده بر روي پرتابه در جهت y, z از روابط (۱۵) و (۱۶) با جايگذاري روابط (۱۲) ، (۱۳) ، (۱۴) بدست خواهد آمد و سپس با استفاده از معادلات حركت پرتابه يعني روابط (۱۸) تا (۲۰) و با توجه به اينكه در رابطة (۲۰)، $M = M_l$ مي باشد، مي توان در هر لحظه شتاب مركز جرم پرتابه در جهات z, y و شتاب زاويه اي آن را نيز با اعمال روابط (۲۲) تا (۲۴) محاسبه نمود. شرايط اوليه براي حل معادلات ديفرانسيل اين مرحله خروجيهاي مرحله قبل (مرحله فرسايش) مي باشند . انتهاي اين فاز زماني اتفاق مي افتد كه سرعت سطح مشترک به اندازه سرعت موج تنش پلاستيک در هدف افت كند. يعني:

$$V_1 = C_p \quad (۳۴)$$

معادلات حاكم بر اين مرحله شامل ۱۷ معادله ديفرانسيل مي باشند.

۲-۳-۲- شكل گيري پلاگ

در اين مرحله موج تنش پلاستيک در پلاگ كه در شرايط كرنش محوري است با سرعت C_p شروع به انتشار نموده و آنرا به دو ناحية صلب ۴ كه $V_4 = 0$ و ناحية ۲ كه $V_2 = V_1$ است، تقسيم مي كند، با توجه به شكل ۵ رابطه زير بين x_1 و x_2 برقرار است :

$$\frac{d\,(x_2 - x_1)}{dt} = C_p - V_1 \quad (۳۵)$$

نيروي اعمال شده بر روي سطح پيشاني پرتابه با استفاده از اصل بقاء اندازه حركت از رابطه زير محاسبه مي شود:

$$F_f = \frac{[\sigma_s\ A + 2\pi R\,\tau_S\,(x_2 - x_1)]m_p}{m_p + \rho_t\ A(x_2 - x_1)} \quad (۳۶)$$

τ_s تنش برشي ديناميكي ماده هدف مي باشد. كرنش محوري درهر لحظه در پلاگ با توجه به شكل (۵) از رابطه زير به دست مي آيد:

$$\frac{d\varepsilon_x}{dt}=\frac{1}{x_{4i}-x_{1i}}\frac{d\,(x_4-x_1)}{dt} \qquad (۳۷)$$

اتمام اين مرحله زماني است که نيروي اعمال شده به پيشاني جبهه موج تـنش پلاسـتيک بـا نيـروي برشـي محيطي برابر شود يعني:

$$\sigma_s\,A=2\pi R\tau_S\,(x_3+h-x_2) \qquad (۳۸)$$

h ضخامت موثر هدف يا طول پلاگ است و از رابطه زير محاسبه مي شود:

$$h=\frac{H}{\cos\theta}\quad,\quad \frac{dh}{dt}=\frac{\sin\theta}{\cos^2\theta}\,H\,\frac{d\theta}{dt} \qquad (۳۹)$$

که H ضخامت هدف مي باشد.

۳-۲-۳- جدايش پلاگ

اين مرحله از لحظه اي که نيروي اعمال شده از طرف پرتابه در ناحيه عبور موج پلاسـتيک بـا نيـروي برشـي برابر گردد شروع و تا قبل از لحظه اي که سرعت ناحية ۴ به سرعت V_1 برسد ادامه مي يابـد. نيـروي اعمـال شده بر پيشاني پرتابه که ترکيبي از نيروي برش محيطي پلاگ و اندازه حرکت انتقالي به ناحيه ۴ در اثر عبور موج تنش پلاستيك مي باشد از رابطه زير محاسبه مي شود:

$$F_f=\sigma_s\,A+V_1\,(V_1-V_4)\,A\rho_t+2\pi R\tau_s\,(x_4-x_1) \qquad (۴۰)$$

که:

$$\frac{d\,(x_4-x_2)}{dt}=V_4-V_2 \qquad (۴۱)$$

x_3 نيز از رابطه زير به دست مي آيد:

$$x_3=x_1-\left(\frac{z_p}{\cos\theta}-R\,tg\,\theta\right) \qquad (۴۲)$$

در اين مرحله ممکن است يکي از حالتهاي زير رخ دهد:

- $V_1=V=V_4$:

اين بدين معناست که سرعت پيشاني و انتهاي پرتابه و ناحيه ۴ برابـر شـده، فرسـايش پرتابـه خاتمـه يابـد و پرتابه بدون تغيير شکل به نفوذ خود ادامه داده و فاز جدايش به پايان برسد.

- $V=0$

در اين حالت پرتابه درون هدف متوقف شده و فرايند نفوذ خاتمه مي يابد .

- $l=0$؛

در اين حالت پرتابه به طور کامل دچار فرسايش شده و مجدداً فرايند نفوذ خاتمه مي يابد.

دستگاه معادلات ديفرانسيلي که در اين مرحله مي بايست حل شوند شامل ۱۹ معادله ديفرانسيل مرتبـه اول مي باشد.

۲-۳-۴- لغزش پلاگ

شروع اين مرحله زماني است که $V_1 = V_2 = V_4$ باشـد. در ايـن مرحلـه نيـروي اعمـال بـر پيشـاني پرتابـه بـا محاسبات انجام شده و با توجه به قانون بقاء اندازه حرکت از معادله زير محاسبات مي شود [۵]:

$$F_f = \frac{2\pi R \tau_S (h + x_3 - x_1) m_p}{m_p + (x_4 - x_1) A \rho_t} \tag{۴۳}$$

مقدار θ خروجي از اين مرحله برابر زاويه خروج پرتابه از هدف است و V_4 نيز سرعت خروج پلاگ مي باشد، انتهاي اين مرحله زماني است که پلاگ به طور کامل خارج شود به عبارت ديگر:

$$z_p = H + R\sin\theta \tag{۴۴}$$

۲-۴- مرحله سوم نفوذ- توسعة سوراخ

اين مرحله از لحظه اي که پلاگ به طور کامل جدا شود، شروع شده و تا زمـاني کـه پرتابـه از صـفحه هـدف خارج شود ادامه مي يابد. در اين مرحله به پيشاني پرتابه نيرويي اعمال نشده يعني $F_f = 0$ و نيروي مقاوم به حرکت پرتابه نيروي اعمالي به سطح جانبي ناشي از اصطکاک (F_l) مي باشـد کـه از رابطـة (۲۸) محاسـبه مي شود. گشتاور اعمالي بر سطح جانبي پرتابه برابرست با:

$$M_l = pR(LS - S^2 + 2Hx_3S/L\cos\theta - 2Sz_p(L\cos\theta - H)/L\cos^2\theta) \tag{۴۵}$$

اين مرحله تا زمانيکه پرتابه به طور کامل از هدف خارج شود، ادامه مي يابد، يعني:

$$z_p = H + L\cos\theta + 2R\sin\theta \tag{۴۶}$$

دستگاه معادلات ديفرانسيلي که در اين مرحله مي بايست حل شوند شامل ۱۵ معادله مي باشد و خروجيهاي آن شامل زاويه محور پرتابه با هدف، زاويه راستاي بردار سرعت با محور عمود بر هدف و سرعت پرتابه خواهند بود.

براي حل دستگاه معادلات حاکم بر مسئله برنامه کامپيوتري با زبان Matlab آماده شده است که معادلات ديفرانسيل حاکم را با روش عددي رانج- کاتا مرتبه چهار حل مي کند. بازه زماني حل معادلات $0.1\mu S$ در نظر گرفته شده است. بکمك اين برنامه کامپيوتري در هر لحظه زماني مشخصات و پارامترهاي هندسي موثر در نفوذ محاسبه شده و وضعيت نسبي پرتابه و هدف در حين نفوذ تعيين گرديده است و نهايتا مي توان سرعت خروجي پرتابه، سرعت حد بالستيك، جرم پرتابه، زاويه خروجي پرتابه، زاويه آبليك نهايي، سرعت زاويه اي خروجي پرتابه، مشخصات جرمي و سرعتي پلاگ حاصل در هدف و زمان نفوذ را محاسبه نمود.

۳- نتايج و بحث

در اين قسمت نتايج مدل تحليلي جديد با نتايج تجربي و تحليلي Li و Goldsmith [۱۱] مقايسه شده است. نتايج تجربي مرجع [۱۱] تنها نتايج تستهاي تجربي مي باشد که براي نفوذ پرتابه هاي با چرخش غير محوري در اهداف فلزي ارائه شده است. مشخصات پرتابه و هدف بکار برده شده در جدول ۱ آمده است. شکلهاي ۶ و ۷ نمودار درصد افت سرعت پرتابه (يعني $(V_0 - V_f)100/V_0$) را بر حسب زاوية برخورد آن (θ) با سرعتهاي اولية متفاوت به ورق آلومينيومي 6061-T6 نمايش مي دهد. نمودارها بخوبي نمايانگر

قابليت مدل تحليلي جديد در پيش بيني افت سرعت خروجي پرتابه ضربه زننده به هدف فلزي مي باشد، مشاهده مي شود که براي سرعت اولية برخورد ۶۲۰ m/s در دو مورد نتايج مدل تحليلي جديد به داده هاي تجربي نزديکتر و فقط در يک مورد مانند مدل Li و Goldsmith [۱۱] در نتايج اختلاف وجود دارد و براي سرعت اولية ۵۰۰ m/s تمامي نتايج مدل تحليلي جديد نسبت به مدل Li و Goldsmith [۱۱] به داده هاي تجربي نزديکتر و حتي در برخي موارد کاملا" بر آنها منطبق شده است. همچنين با افزايش زاوية برخورد، افت سرعت پرتابه افزايش و سرعت خروجي پرتابه کاهش مي يابد، در اين سيستم بنابر پيش بيني مدل تحليلي حاضر و مدل تحليلي لي و گلداسميت، پرتابه در سرعتهاي برخورد بالاتر قسمت اعظم سرعت اوليه خود را در خروج از هدف حفظ مي کند و افت سرعت خروجي آن کمتر مي شود.

در جدول ۲ سرعتهاي خروجي پرتابه و درصد افت سرعت آن با نتايج تجربي و نتايج مدل Li و Goldsmith [۱۱] مقايسه شده است. ملاحظه مي شود که در تمامي مقادير زاوية برخورد (بجز يک مورد) درصد خطاي مدل جديد در پيش بيني سرعت خروجي پرتابه از هدف به مقادير تجربي نزديکتر از مدل Li و Goldsmith [۱۱] و حتي در بعضي موارد بر آنها منطبق شده است. بر اساس بهينه سازيهاي انجام شده در مدل تحليلي جديد، سرعت خروجي پرتابه پيش بيني شده در زوايا و سرعت برخورد مختلف همخواني مناسبي با نتايج تجربي دارد.

شکلهاي ۸ و ۹ مقادير زاويه آبليك نهايي را در قياس با داده هاي تجربي و نتايج مدل تحليلي Li و Goldsmith [۱۱]، برحسب زاوية برخورد نمايش مي دهد.

همانگونه که ملاحظه مي شود در مدل Li و Goldsmith [۱۱] با افزايش زاوية برخورد، اندازة مطلق زاوية آبليک نهايي تا مقادير مشخصي افزايش و پس از آن کاهش مي يابد. وليکن در مدل تحليلي با افزايش سرعت اوليه برخورد، زاويه آبليك نهايي کاهش يافته است . همچنين در سرعت برخورد ۵۰۰ m/s مطابق شکل ۹، پيش بيني مدل تحليلي جديد براي زاويه آبليك نهايي همخواني مناسبتري با نتايج تجربي نسبت به مدل Li و Goldsmith [۱۱] دارد. اين موضوع بيانگر اين واقعيت است که مدل جديد در سرعتهاي برخورد کمتر پيش بيني بهتري از زاوية آبليک نهايي خواهد داشت.

در شکل ۱۰ تغييرات سرعت اجزاي مختلف سيستم هدف- پرتابه در طي فرآيند نفوذ نشان داده شده است. اين شکل تغييرات سينماتيکي سرعت پرتابه و پلاگ را در طي هر سه مرحله فرايند نفوذ نمايش مي دهد. در اين حالت سرعت برخورد پرتابه به هدف ۱۰۰۰ m/s در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل مشخص است که به محض برخورد، پرتابه شروع به نفوذ بدرون هدف مي نمايد زيرا سرعت نفوذ (V_1) در فاز اول صفر نبوده و سرعت اوليه پرتابه مطابق معادله (۴) بيشتر از سرعت حدي لازم براي نفوذ مي باشد. در مرحلة فرسايش هدف با پيشروي نفوذ، با توجه به اينکه زاوية برخورد نسبتا" کوچک است زمان انتهاي اين فاز کوتاه بوده و سرعتهاي قسمت صلب پرتابه (V) و سطح تماس پرتابه- پلاگ (V_1) کاهش نامحسوسي را تجربه مي کنند. در مرحله شکل گيري پلاگ نيز همين روند ادامه ادامه مي يابد تا اينکه با شروع مرحله جدايش پلاگ و با توجه به چشمگير بودن زمان تکميل آن شيب نمودارها بيشتر مي شود. با آغاز اين مرحله پلاگ شروع به جدايش کرده و شتاب مي گيرد و سرعت انتهاي پرتابه به سرعتي معادل پيشاني آن مي رسد (يعني $V = V_1$ مي شود). در اين مرحله نيروي وارد بر پيشاني پرتابه ترکيبي از نيروي حاصل از اندازه

حركت انتقالي در پلاگ و نيز نيروي برشي محيطي آن مي باشد، به همين دليل شيب نمودار سرعت قسمت صلب پرتابه (V) كاهش بيشتري دارد. در مرحله لغزش پلاگ پرتابه كاهش سرعت ديگري را تجربه مي كند تا اينكه ورق فلزي را كاملا سوراخ نموده و پلاگ بطور كامل از هدف خارج شود در مرحله توسعه سوراخ تنها نيروي مقاوم وارد شده بر پرتابه، نيروي اصطكاك اعمال شده بر سطح جانبي آن مي باشد، شيب نمودار سرعت نسبتا" كم بوده و پرتابه و پلاگ با سرعت زير ۸۰۰ m/s از ماده هدف خارج مي شوند.

در شكل ۱۱ منحني تغييرات سرعت حد بالستيك بر حسب زاويه آبليك برخورد اوليه نشان داده شده است. مشاهده مي گردد كه با افزايش مقدار مطلق زاوية آبليک اوليه، حد بالستيک افزايش مي يابد و نمودار داراي تقعر به سمت بالا ميباشد، بطوريكه براي شرايطي كه زاوية برخورد و سرعت زاويه اي اوليه صفر مي باشد نمودار كاملا" متقارن است. زيرا در اين حالت مقادير مثبت و منفي زاوية آبليک اوليه تأثير يكسان بر مؤلفة عمودي سرعت پرتابه و در جهتهاي عكس دارند .براي حالت β هاي مثبت پرتابه داراي حركت به سمت بالا (y هاي مثبت) و براي مقادير منفي β، داراي حركت به سمت پائين (y هاي منفي) بوده و با مؤلفة سرعتي برابر حالت قبل حركت مي كند و مؤلفة افقي سرعت در هر دو حالت يكسان است.

شكل ۱۲ تغييرات سرعت خروجي پرتابه را بر حسب سرعت زاويه اي آن نشان مي دهد، با ملاحظة اين شكل مشاهده مي شود، هنگامي كه سرعت زاويه اي از 0 به 2500 rad/s ميرسد، سرعت خروجي اندكي تغيير مي كند و در سرعتهاي اولية بالاتر اين تغييرات بسيار كمتر مي شود. تغييرات زاوية Θ (زاوية محور پرتابه با امتداد عمود بر هدف) بر حسب زمان سرعت زاويه اي پرتابه مي باشد و در زمان بسيار كم نفوذ، تغييرات اين زاويه هنگامي محسوس است كه سرعت زاويه اي بسيار بزرگ باشد، علاوه بر اين موقعي كه پرتابه با سرعت اوليه بالاتري برخورد مي كند، زمان نفوذ كاهش مي يابد و سرعت زاويه اي جهت حركت پرتابه را كمتر تغيير داده و نهايتا" تغيير ميزان سرعت خروجي آن بمراتب كاهش مي يابد و مطابق شكل ۱۲ شيب نمودار سرعت تغييرات كمتري دارد. لذا مي توان گفت كه در سرعتهاي برخورد بالا افزايش سرعت زاويه اي پرتابه، تاثير بسزايي در تغييرات سرعت خروجي پرتابه نخواهد داشت.

شكل ۱۳ منحني تغييرات سرعت حد بالستيك را بر حسب سرعت زاويه اي اوليه برخورد نشان مي دهد. تحليل مشابهي براي تغييرات سرعت حد بالستيك وجود دارد و مشاهده مي گردد كه ميزان افزايش سرعت حد بالستيك با افزايش زياد سرعت برخورد خيلي ملموس نمي باشد.

با مقايسه هاي انجام شده بين نتايج مدل تحليلي جديد و نتايج تجربي و بررسيهاي پارامتريك انجام شده توسط ملكيان [۵] مشاهده گرديده كه نتايج حاصل از مدل تحليلي ارائه شده در اين مقاله همخواني مناسبي با نتايج تجربي دارد و با بررسيهاي پارامتريك صحه گذاري بر مدل تحليلي صورت گرفته است. با توجه به شكل ۱ مشاهده مي گردد كه در صورتي كه $\alpha = 0$ يا $\theta = \beta$ باشد، سرعت پرتابه در راستاي محور تقارن آن بوده و مدل تحليلي قادر به پيش بيني پارامترهاي نفوذ در برخورد مايل پرتابه هاي ميله اي تغيير شكل پذير با چرخش غير محوري $(\omega \neq 0)$ و يا بدون چرخش غير محوري $(\omega = 0)$ مي باشد. بر اساس مقايسه هاي انجام شده مدل تحليلي در سرعتهاي برخورد در محدوده سرعت حد بالستيك تا چند برابر آن و نيز براي اهداف ضخيم كه ضخامت هدف در محدوده قطر پرتابه يا اندكي بيشتر از آن است، جوابهاي قابل قبولي ارائه مي نمايد.

۴- نتيجه گيري

مدل تحليلي ارائه شده در اين مقاله فرايند نفوذ پرتابه ها با چرخش غير محوري را در اهداف فلزي ضخيم با شكست پلاگينگ مدلسازي و تحليل مي نمايد. مقادير سرعت باقيمانده پرتابه بعد از برخورد به هدف و زاويه آبليك نهايي بعد از برخورد در زواياي برخورد مختلف پيش بيني شده توسط مدل تحليلي همخواني مناسبي با نتايج تجربي داشته و دقت نتايج بهتر از مدل تحليل Li و Goldsmith [۱۱] مي باشد.

- به كمك نرم افزار كامپيوتري تهيه شده براي حل معادلات حاكم بر مدل تحليلي مي توان اثر پارامترهاي مختلف در نفوذ پرتابه هاي با چرخش غير محوري را در اهداف ضخيم بررسي و از اين نرم افزار براي طراحي اهداف مقاوم به نفوذ استفاده نمود.

- با افزايش زاويه آبليك اوليه پرتابه سرعت حد بالستيك افزايش مي يابد.

- افزايش سرعت زاويه اي غير محوري پرتابه بخصوص در سرعتهاي برخورد بالا، تاثير قابل ملاحظه اي در سرعت خروجي پرتابه ندارد و ميزان سرعت حد بالستيك با افزايش سرعت زاويه اي اندكي افزايش مي يابد.

مراجع

[1] Backman, M. E., and Goldsmith, W., “The Mechanics of Penetration of Projectile Into Targets,” International Journal Engineering Sci., Vol. 16, pp. 1-99, (1978).

[2] Zukas, J. A., "*High Velocity Impact Dynamic*," John Wily and Sons, New York, (1990).

[3] Corbett, G. G., and Reid, S.R., and Johanson W., “Impact Loading of Plates and Shells by Free-flying Projectiles, A Review,” International Journal of Impact Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 141-230, (1996).

[۴] فعلي، سعيد، محمد ابراهيم اعلمي آل آقا و زين العابدين، احمدي، "تحليل نفوذ عمودي پرتابه هاي تغيير شكل پذير در اهداف سبك وزن سراميك- فلز"، نشريه پژوهشي مهندسي مكانيك ايران، سال نهم، شماره دوم، (۱۳۸۶).

[۵] ملكيان، سعيد "مدلسازي تحليلي و عددي نفوذ پرتابه هاي با چرخش غير محوري در اهداف فلزي"، پايان نامه كارشناسي ارشد، دانشگاه رازي، كرمانشاه، (۱۳۸۶).

[۶] فعلي، سعيد " تحليل فرايند نفوذ پرتابه‌هاي تغيير شكل‌پذير در اهداف فلزي با استفاده از انتشار امواج تنش پلاستيك"، پايان نامه دكتري، دانشگاه تربيت مدرس، تهران، (۱۳۸۳).

[۷] لياقت، غلامحسين، حسن مسلمي نائيني و فعلي، سعيد، "تحليل نفوذ پرتابه‌هاي تغيير شكل‌پذير در اهداف فلزي به كمك تئوري امواج تنش پلاستيك"، نشريه اميركبير، سال پانزدهم، شماره ب-۵۷، صفحه ۸۴-۱۰۰، (۱۳۸۲).

[۸] لياقت، غلامحسين، مسلمي نائيني،حسن و فعلي، سعيد، "تحليل نفوذ عمودي پرتابه‌هاي تخت تغيير شكل‌پذير در اهداف فلزي نازك تا نيمه ضخيم"، نشريه پژوهشي مهندسي مكانيك ايران، سال پنجم، شماره اول، اسفند (۱۳۸۲).

[9] Liss, J., and Goldsmith, W., "Plate Perforation Due to Impact by Blunt Cylinders", International Journal of Impact Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 37-64, (1984).

[10] Li, K., and Goldsmith, W., "An Analytical Model for Tumbling Projectile Perforation of Thin Aluminum Plates", International Journal of Impact Engineering; Vol. 18, pp. 45–63, (1996).

[11] Li, K., and Goldsmith, W.," A Phenomenilogical Model for Penetration of Moderately Thick Plates by Tumbling Projectiles", International Journal of Solid Stuctures, Vol. 33, No. 24, pp. 3561-3575, (1996).

[12] Tate, A. ," A Theory for the Deceleration of Long Rods after Impact," Journal Mechanics of Physics and Solids , Vol. 15, pp. 387-399, (1967).

[13] Alekseevskii, V. P., " Penetration of a Rod into a Target at High Velocity", in Combustion Explosion and Shock Waves, Vol. 2, Faraday Press, New York, USA, (1966).

فهرست نمادهاي انگليسي

A, B : ثابتهاي رابطه تنش - كرنش موثر هدف
C_p : سرعت موج تنش پلاستيك در پلاگ
F_f : نيروي اعمالي به پيشاني پرتابه
F_l : نيروي اعمالي به سطح جانبي پرتابه
H : ضخامت هدف
I_p : ممان اينرسي جرمي پرتابه
l : طول لحظه اي پرتابه
M_f : گشتاور اعمالي به پيشاني پرتابه
M_l : گشتاور اعمالي به سطح جانبي پرتابه
m_p : جرم پرتابه
n : ضريب كار سختي هدف
P : شار اعمالي از لبه پرتابه به سطح هدف
R : شعاع پرتابه
t : زمان نفوذ
V : سرعت انتهاي پرتابه
V_0 : سرعت اوليه پرتابه
V_1 : سرعت سطح مشترك پرتابه- هدف
V_f : سرعت باقيمانده پرتابه

فهرست نمادهاي يوناني

α : زاويه ياو (Yaw)
β : زاويه آبليك (Oblique)
ε_x : كرنش محوري پلاگ
θ : زاويه برخورد
ω : سرعت زاويه اي پرتابه
μ : ضريب اصطكاك
ρ_t : چگالي هدف
ρ_p : چگالي پرتابه
σ_s : تنش معادل هدف
σ_{yp}^D : تنش ديناميكي پرتابه
σ_{yt}^D : تنش ديناميكي هدف
τ_s : تنش برشي ديناميكي پلاگ

جدولها

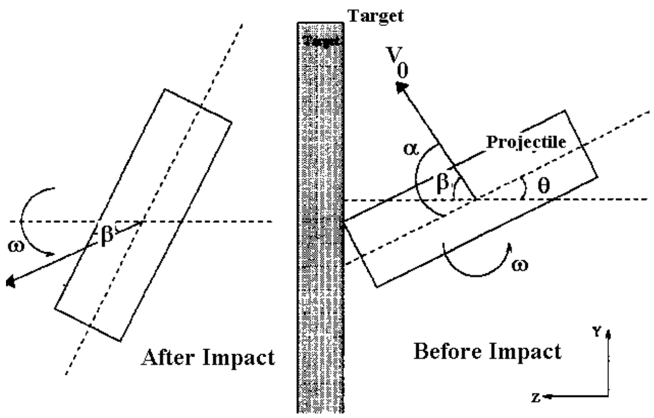
جدول ۱ - مشخصات و خواص مكانيكي هدف و پرتابه[۱۱]

Aluminum 6061 -T6 هدف	**Steel** پرتابه		
۲۷۸۰	۷۹۷۷	ρ (kg/m3)	
۷۰	۲۱۰	E(Gpa)	
۳۳۵	۷۹۲	A (Mpa)	مشخصات مدل رفتار ماده
۸۵	۵۱۰	B (Mpa)	
۰/۱۱	۰/۲۶	N	
۰/۲۹	۰/۳	υ: ضريب پواسون	
--	۶/۳۵	R: شعاع پرتابه	
۱۲/۷	--	H (mm): ضخامت هدف	
--	۳۸/۱	L (mm): طول پرتابه	
۰/۰۵		μ: ضريب اصطكاك	

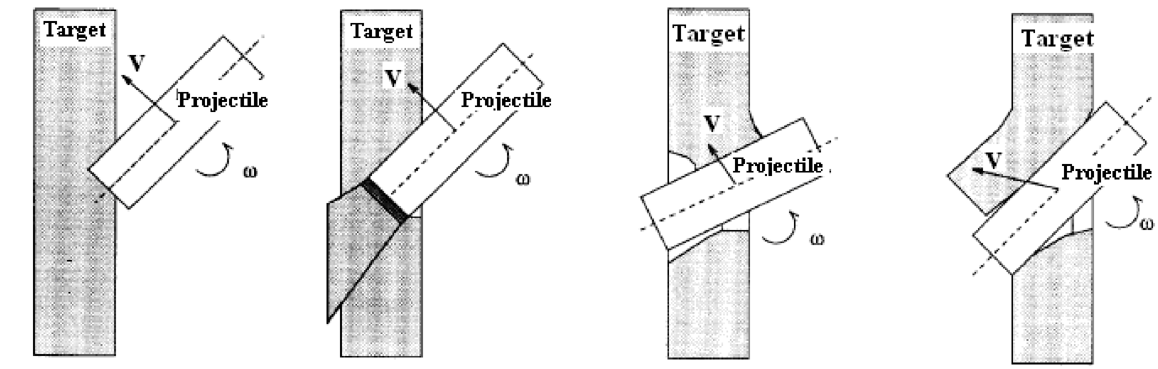
جدول ۲- مقادیر افت سرعت و سرعت خروجي پرتابه در برخورد به هدف آلومينيومي 6061-T6

سرعت اولیه (m/s)	زاوية برخورد (deg.)	سرعت خروجي مدل مرجع [۱۱] (m/s)	سرعت خروجي مدل جدید (m/s)	سرعت خروجي تجربي [۱۱] (m/s)	افت سرعت مدل مرجع [۱۱] (%)	افت سرعت مدل جدید (%)	افت سرعت تجربي [۱۱] (%)	خطاي مدل مرجع [۱۱] (%)	خطاي مدل جدید (%)
۶۲۰	۲.۵	۵۲۴	۵۳۳	۵۳۳	۱۵/۵	۱۴	۱۴	۱/۷	۰
	۸	۵۰۲	۵۱۳	۴۸۱	۱۹	۱۷	۲۳	۴/۵	۶/۷
	۹	۴۹۹	۵۱۰	۵۲۱	۲۰	۱۸	۱۶	۴/۲	۲/۱
۵۰۰	۰	۴۰۵	۴۲۰	۴۱۳	۱۹	۱۶	۱۸	۱/۸	۱/۸
	۶/۵	۳۶۷	۳۸۸	۳۹۵	۲۷	۲۳	۲۱	۷	۱/۸
	۱۰/۵	۳۴۰	۳۶۲	۳۷۰	۳۲	۲۸	۲۶	۸	۲/۲
	۱۱	۳۳۲	۳۵۹	۳۵۸	۳۳	۲۸	۲۹	۶/۹	۰/۴۴
	۱۸/۵	۲۷۸	۳۰۱	۳۱۰	۴۴	۴۰	۳۸	۱۰/۳	۳

شکلها

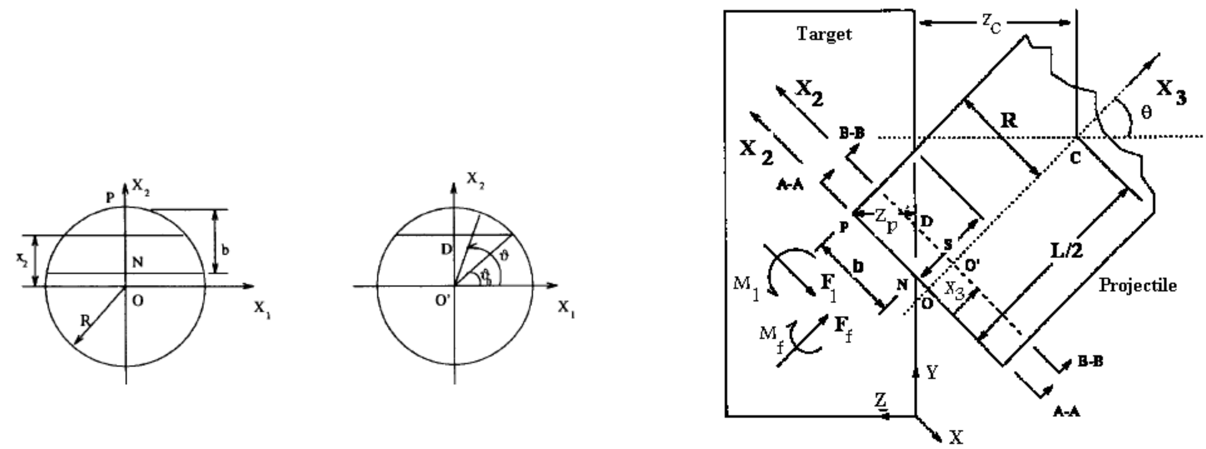


شکل ۱- موقعیت برخورد پرتابه به هدف و پارامترهاي اولیه قبل از برخورد [۱۱]



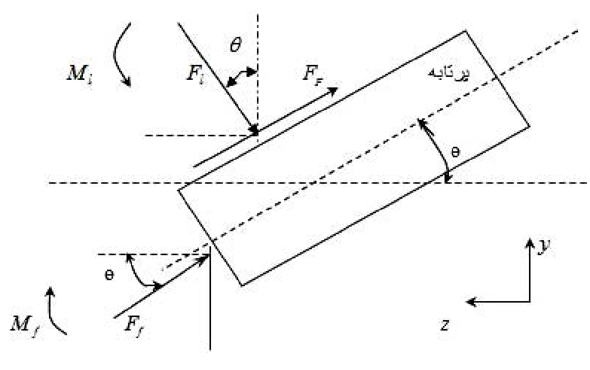
a- Erosion b- Pluging c- Hole-enlargement d- petaling

شكل ۲- فرايند نفوذ پرتابه با حركت تامبلينگ در هدف با ضخامت متوسط [۱۱]

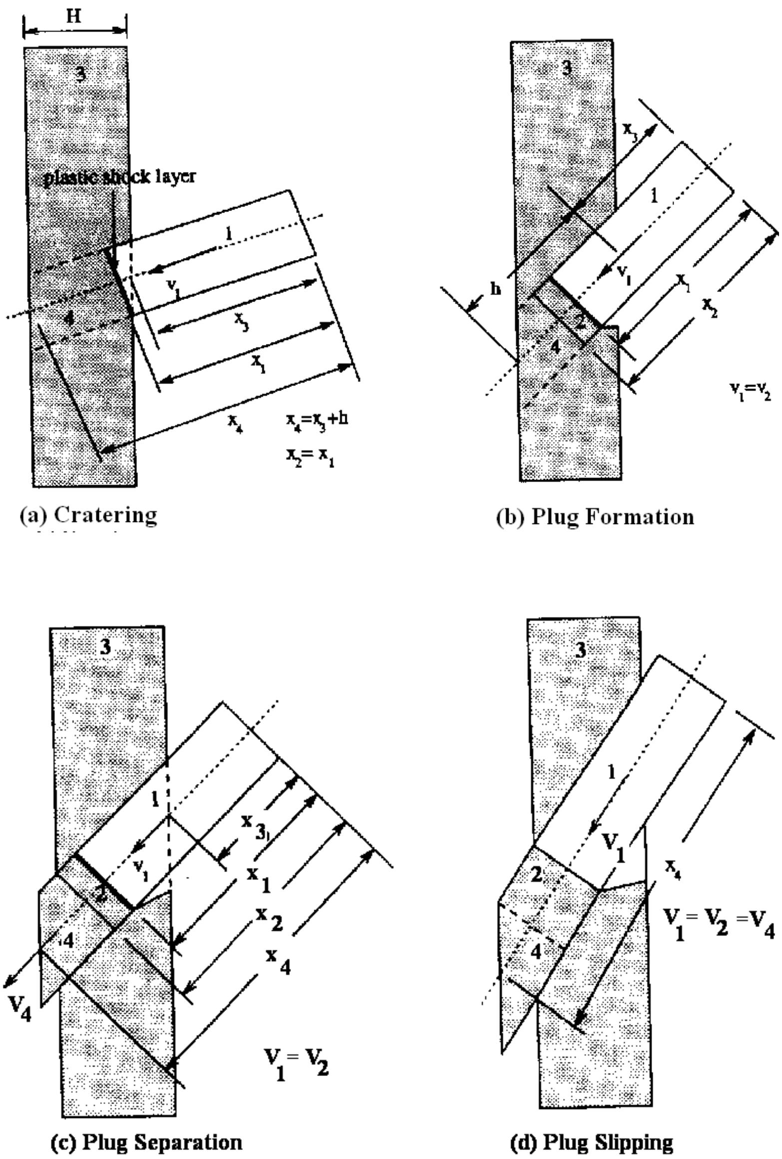


(c) (b) (a)

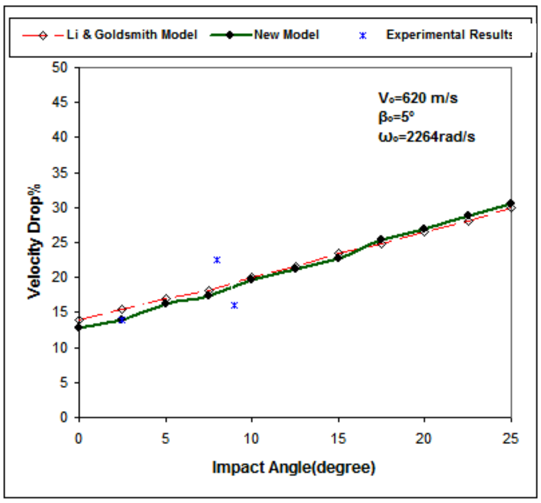
شكل ۳- پارامترهاي هندسي پرتابه و هدف در مرحله فرسايش



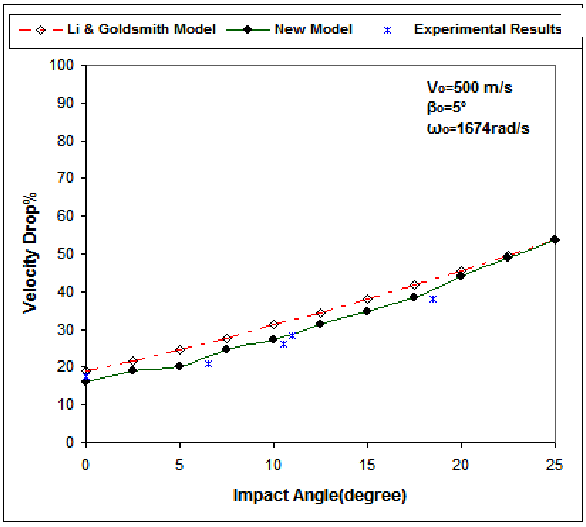
شكل ۴- نيروها و گشتاورهاي اعمالي بر پيشاني و سطح جانبي پرتابه در مرحله اول نفوذ



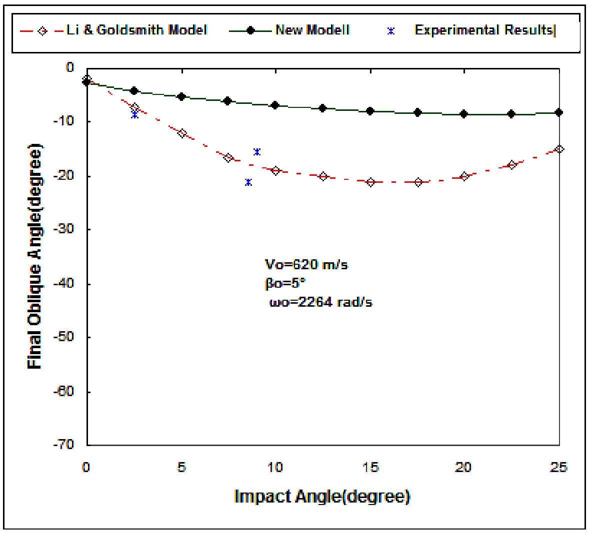
شکل ۵ - هندسه پرتابه و هدف در طول مرحلة پلاگینگ [۱۱]



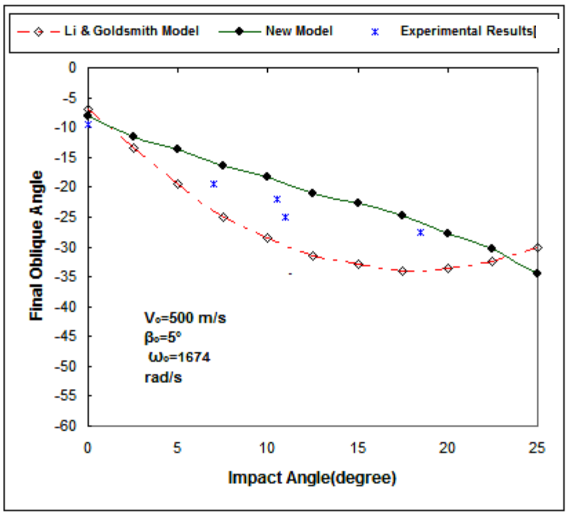
شکل ۶ - منحني درصد افت سرعت پرتابه بر حسب زاويه برخورد در سرعت برخورد ۶۲۰ m/s



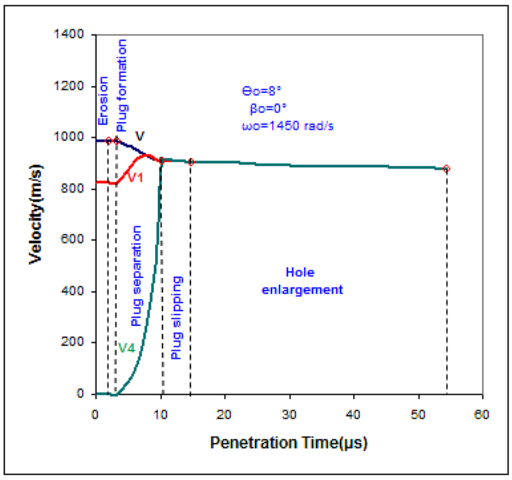
شكل ۷- منحني درصد افت سرعت پرتابه بر حسب زاويه برخورد در سرعت برخورد ۵۰۰ m/s



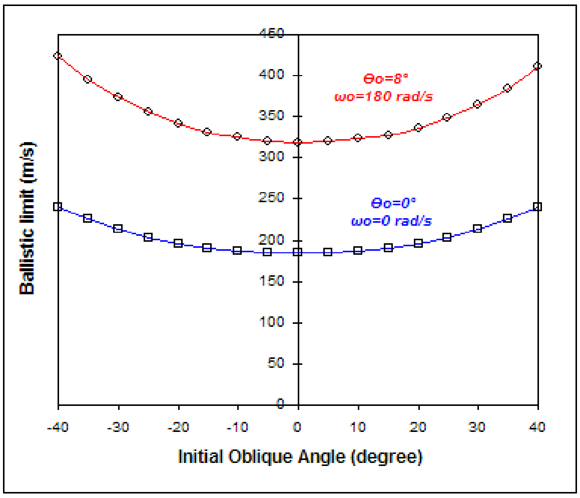
شكل ۸- زاوية آبليک نهايي پرتابه در برخورد به هدف آلومينيومي 6061-T6 با سرعت اولية برخورد ۶۲۰ m/s



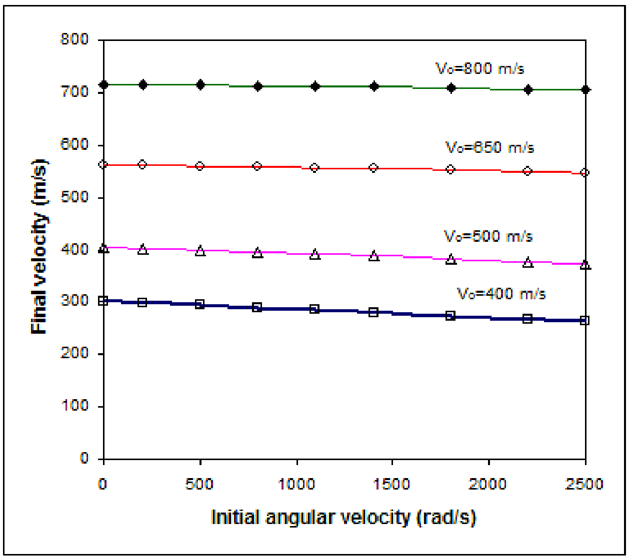
شكل ۹ - زاوية آبليک نهايي پرتابه در برخورد به هدف آلومينيومي 6061-T6 با سرعت اولية برخورد ۵۰۰ m/s



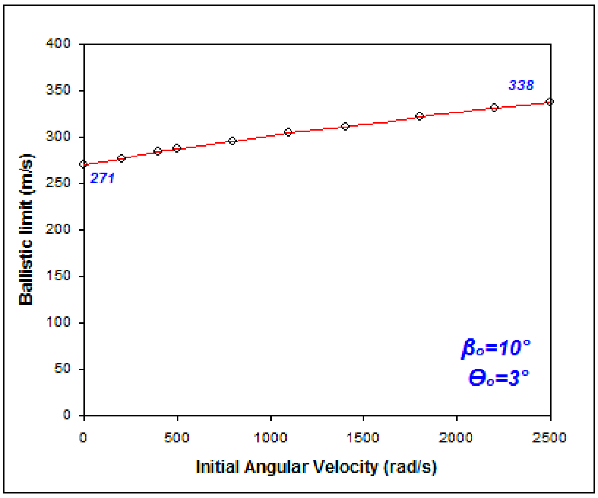
شکل ۱۰- تغييرات سرعت اجزاي سيستم هدف - پرتابه در فازهاي مختلف در طي فرآيند نفوذ



شکل ۱۱- سرعت حد بالستيك پرتابه فولادي بر حسب زاوية آبليک اولية آن در برخورد به هدف آلومينيومي 6061-T6



شکل ۱۲- سرعت خروجي پرتابه فولادي بر حسب سرعت زاويه اي اولية آن در برخورد به هدف آلومينيومي 6061-T6



شكل ۱۳- سرعت حد بالستيك پرتابه بر حسب سرعت زاويه اي اولية آن در برخورد به هدف آلومينيومي 6061-T6

Abstract

In this paper a new analytical model has been developed to describe the mechanism of tumbling perforation of blunt-faced cylindrical projectiles into thick metallic plates. The plate material is considered to be rigid- plastic nonlinear work hardening, while the projectile is regarded as deformable. The perforation process consists of three stages: erosion, plugging and hole enlargement. The modeling of plugging stage consists of cratering, plug formation, plug separation and plug slipping. The governing equations in each stage are derived based on conservation of momentum and geometrical parameters. The residual velocity and final oblique angle were found to be in good agreement with available experimental results. Therefore this analytical model can be described perforation process of tumbling projectiles into thick metallic plates.