

بررسی اثر تغییر شکل پذیری پرتابه در پدیده نفوذ پرتابه دارای چرخش غیر محوری

طیبه اکبری^۱، غلامحسین لیاقت^{۲*}، سعید فعلی^۳

۱- ۲۰۱ - تهران - دانشگاه تربیت مدرس

۳ - کرمانشاه - دانشگاه رازی

(تاریخ وصول: ۹۰/۹/۱، تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۱/۸)

چکیده

در مقاله حاضر، اثر چرخش غیر محوری پرتابه استوانه‌ای سر تخت در پدیده نفوذ به اهداف آلومینیومی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مدل تحلیلی ارائه شده فرایند نفوذ بسته به نحوه برخورد پرتابه به هدف - به صورت عمودی یا مایل - به چهار مرحله فرسایش، پلاگینگ، توسعه سوراخ و پتالینگ تقسیم می‌شود. مرحله پلاگینگ نیز به صورت حفره‌ای شدن، شکل‌گیری پلاگ، جدایش پلاگ، لغزش پلاگ و تغییر شکل پس از سوراخ کاری در نظر گرفته شده است. در این مدل ماده هدف به صورت صلب - کاملاً پلاستیک و پرتابه تغییر شکل پذیر در نظر گرفته شده است. شکل‌پذیری پرتابه بسته به سرعت نسبی آن در سه شکل: فرسایش، تخت شدن و حرکت صلب پرتابه اتفاق می‌افتد. همچنین اثر نیروی اصطکاک در کل فرایند نفوذ لحاظ شده است. نتایج مدل تحلیلی ارائه شده هم‌خوانی مطلوبی با نتایج تجربی دارد.

واژه‌های کلیدی: چرخش غیر محوری، نفوذ، برخورد عمودی، برخورد مایل، پلاگینگ.

۱- مقدمه

در تحقیقاتی که تاکنون بر روی پدیده نفوذ انجام شده، عموماً برخورد عمودی مورد بررسی قرار گرفته است. رچت و ایپسون [۱] دینامیک نفوذ بالستیک را تحلیل نمودند. لیس و همکاران [۲] مدلی تحلیلی برای نفوذ در اهداف ضخیم ارائه کردند. لیاقت و همکاران در تحقیقاتی [۳ و ۴]، مکانیک نفوذ پرتابه را مورد بررسی قرار داده و اصلاحاتی نیز بر مدل دیکشیت و سانداراجان [۵ و ۶] اعمال نمودند. در پژوهش‌های محدودی نیز برخورد مایل بررسی شده است که در آنها زاویه برخورد ثابت است یعنی از اثرات چرخش پرتابه صرف نظر شده است [۷]. آوروبوخ و بودنر [۸] برخورد مایل

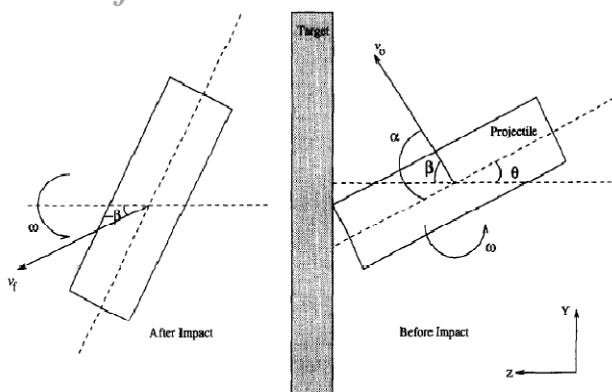
پرتابه به اهداف فلزی را مورد مطالعه قرار دادند. ونکسیو و لاتتینگ [۹] نفوذ پرتابه تغییر شکل پذیر را با استفاده از تئوری انتشار امواج تنش پلاستیک مدل‌سازی نمودند. گلداسمیت و همکاران [۱۰] در تحقیقاتی اثر برخورد مایل پرتابه و اثر برخورد مایل، توأم با چرخش غیر محوری پرتابه را مدل‌سازی نمودند [۱۱]. لیاقت و همکاران [۱۲] مکانیک برخورد مایل پرتابه‌های مخروطی در اهداف چند لایه را مورد تحلیل قرار دادند. در برخورد عمودی بردار سرعت پرتابه به موازات محور تقارن آن و عمود بر صفحه هدف می‌باشد و در برخورد همراه با چرخش غیر محوری، بین بردار سرعت و عمود بر هدف زاویه β و بین محور پرتابه و عمود بر هدف زاویه θ که زاویه برخورد نامیده

* E-mail: Ghlia530@modares.ac.ir

۱- کارشناس ارشد

۲- استاد

۳- دانشیار



شکل ۱- پارامترهای هندسی برخورد پرتابه با چرخش غیر محوری [۱۱].

جدول ۱- مشخصات ماده هدف و پرتابه [۱۱].

استحکام برشی دینامیکی	استحکام تسلیم دینامیکی	سرعت انتشار موج تنش پلاستیک	چگالی ρ (kg/m^3)	نوع ماده
τ_y (Mpa)	σ_y (Mpa)	C_p (m/s)	۷۹۷۷	پرتابه
۸۰۴	۱۳۹۳	۵۳۸	۲۷۸۰	هدف
۱۹۰	۲۹۵	۵۳۸۰		

۱-۲- فرسایش هدف

با توجه به زاویه برخورد، پرتابه ابتدا به صورت نقطه‌ای با هدف برخورد می‌کند و فرسایش آغاز می‌شود. این مرحله تا زمانی که کل پیشانی پرتابه با هدف تماس پیدا کند، ادامه می‌یابد. بر اساس نتایج تجربی بی شاب (۱۹۴۵) در کل فرایند نفوذ فشاری معادل ۳ برابر تنش تسلیم ماده هدف بر روی سطح تماس اعمال می‌شود.

$$P = 3\sigma_y \quad (1)$$

شکل (۳) پارامترهای هندسی پرتابه و هدف را در مرحله فرسایش نشان می‌دهد. با توجه به شکل نیروها و ممان‌های اعمالی به پرتابه به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$b = \frac{z_p}{\sin \theta} \quad (2)$$

$$z_p = z_c + \frac{L}{2} \cos \theta + R \sin \theta \quad (3)$$

$$F_f = R^2 P \left[\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \frac{R-b}{R} - \frac{(R-b)\sqrt{2Rb-b^2}}{R^2} \right] \quad (4)$$

$$M_f = \frac{2}{3} p (2Rb - b^2)^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

می‌شود، به وجود می‌آید.

در زمینه نفوذ همراه با چرخش پرتابه، کارهای بسیار محدودی انجام گرفته که قوی‌ترین آنها مدل تحلیلی-تجربی لی و گلداسمیت [۱۱] است. مدل ارائه شده در مقاله حاضر بر اساس مدل تحلیلی لی و گلداسمیت است که در آن اثرات نیروی اصطکاک و تغییر شکل پذیری پرتابه نیز لحاظ شده است. برای مدل سازی تغییر شکل پذیری پرتابه از مدل ونکسیو [۹] که اساس آن تئوری انتشار امواج تنش پلاستیک می‌باشد، استفاده شده است. با توجه به سرعت اولیه لبه پرتابه نسبت به انتهای آن، تغییر شکل پرتابه طی سه حالت زیر صورت می‌گیرد:

۱. ایجاد فرسایش در پرتابه اگر $V_s \geq C_p$ ؛

۲. تخت شدن لبه پرتابه اگر $V_s \leq C_p$ ؛

۳. حرکت پرتابه به صورت صلب اگر $V_s = 0$ ؛

که V_s عبارتست از سرعت نسبی لبه پرتابه V_c نسبت به سرعت انتهای آن V_p ، یعنی $V_s = V_p - V_c$. پدیده چرخش غیر محوری پرتابه اغلب در ترکش‌ها و یا شهاب سنگ‌های موجود در فضا که شکل هندسی منظمی ندارند و ممکن است ماهواره‌ها و سفینه‌های فضایی را مورد اصابت قرار دهند، مشاهده می‌شود.

این نوع چرخش منجر به گشاد شدن دهانه حفره ایجاد شده در هدف و در نتیجه تخریب بیشتر نسبت به برخورد نرمال می‌گردد. پارامترهای هندسی موجود در نفوذ پرتابه دارای چرخش غیر محوری در شکل (۱) نشان داده شده است.

هدف از جنس Al 6061-T6 کاملاً پلاستیک با ضخامت $H=12.7mm$ و پرتابه فولادی صلب با $L/D=3$ و $D=12.7mm$ و سرعت $300 < V_0 < 600$ m/s و با زاویه برخورد $0 < \theta < 25$ deg می‌باشد. سایر مشخصات پرتابه و هدف در جدول (۱) درج شده است.

۲- تئوری

در تحقیق حاضر از تئوری لی و گلداسمیت به عنوان مدل پایه استفاده شده است. در مدل تحلیلی لی و گلداسمیت بر اساس مشاهدات تجربی فرایند نفوذ به چهار مرحله متوالی تقسیم می‌شود که خروجی هر مرحله ورودی مرحله بعدی می‌باشد.

این مراحل به ترتیب عبارتند از: فرسایش، پلاگینگ^۱، توسعه سوراخ^۲ و پتالینگ^۳. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد برای زاویه برخورد‌های کمتر از ۲۵ درجه پتالینگ اتفاق نمی‌افتد. شکل (۲) کلیه مراحل نفوذ را نشان می‌دهد.

1- Plugging
2- Hole enlargement
3- Petaling

و معادله بقای اندازه حرکت عبارت است از:

$$F = \frac{\partial M}{\partial t} + \phi \quad (15)$$

با قرار دادن مقادیر فوق در رابطه بقای اندازه حرکت:

$$\frac{\pi}{4} D_0^2 (\rho_p V_s C_p + \sigma_p - \rho_p (L_1 - L) \frac{\partial V_c}{\partial t}) = F \quad (16)$$

این مرحله تا هنگامی ادامه می‌یابد که $V_s = 0$ یا $z_p = 2R \sin \theta$

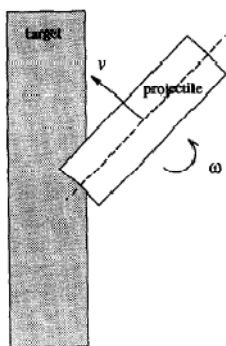
۲-۱-۲- صلب شدن پرتابه، فرسایش هدف

شروع این مرحله هنگامی است که $V_s = 0$ در این مرحله پرتابه بدون تغییر شکل است. روابط مربوط به اندازه حرکت و بقای اندازه حرکت به صورت زیر است

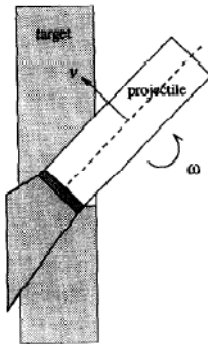
$$M = \rho_p A_0 L V_p, \phi = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\pi}{4} D_0^2 (\rho_p L \frac{\partial V_p}{\partial t}) = -F \quad (18)$$

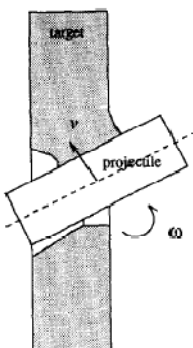
این مرحله تا هنگامی ادامه می‌یابد که $z_p = 2R \sin \theta$



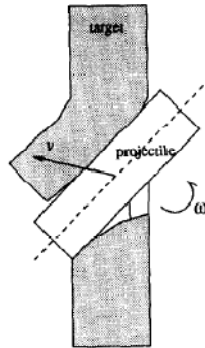
(a) Erosion



(b) Plugging



(c) Hole-enlargement



(d) Petaling

شکل ۲- نفوذ پرتابه با چرخش غیر محوری در اهداف نسبتاً ضخیم [۱۱].

$$F_l = p \operatorname{tg} \theta \left(\frac{\pi R^2}{2} + \frac{R \sin \theta - z_p}{\sin^2 \theta} \sqrt{z_p^2 - 2Rz_p \sin \theta} - R^2 \sin^{-1} \left(1 - \frac{z_p}{R \sin \theta} \right) \right) \quad (6)$$

$$M_l = \left(\frac{L}{2} + R \operatorname{tg} \theta - \frac{z_p}{\cos \theta} \right) F_l - \frac{2}{3} p \operatorname{tg}^2 \theta \quad (7)$$

$$\left(R^2 - \left(R - \frac{z_p}{\sin \theta} \right)^2 \right)^{3/2} F_F = \mu F_L \quad (8)$$

به طوری که z_p عمق نفوذ پرتابه، F_l, M_l ممان و نیروی وارد بر سطح جانبی پرتابه، F_f, M_f ممان و نیروی وارد بر پیشانی پرتابه می‌باشند. همچنین اگر زاویه برخورد پرتابه به هدف صفر باشد فاز فرسایش هدف اتفاق نمی‌افتد و نفوذ مستقیماً از مرحله پلاگینگ آغاز می‌شود. در هر مرحله از فرایند نفوذ، ممکن است هر سه مورد تغییر شکل در پرتابه ایجاد شود که وقوع هر یک از آنها بستگی به سرعت اولیه پرتابه و نیز سرعت انتشار امواج تنش پلاستیک دارد. در محدوده سرعت مورد بررسی در این مقاله فرسایش پرتابه رخ نمی‌دهد و مودهای تغییر شکل آن به صورت قارچی شدن و صلب شدن پرتابه است. در ادامه به تشریح کلیه مراحل نفوذ پرداخته می‌شود.

۲-۱-۱- قارچی شدن پرتابه- فرسایش هدف

این مرحله هنگامی آغاز می‌شود که $V_s < C_p$. به طوری که V_s سرعت نسبی پرتابه و C_p سرعت انتشار موج تنش در پرتابه است. روابط اندازه حرکت و شار اندازه حرکت در حجم کنترلی که شامل پرتابه و بخشی از ماده هدف که تغییر شکل می‌دهد، می‌باشد و به صورت زیر است:

$$M = \rho_p A_0 L V_p + \rho_p A_0 (L_1 - L) V_c \quad (9)$$

$$\phi = 0 \quad (10)$$

و F برآیند نیروهای خارجی وارد بر حجم کنترل است.

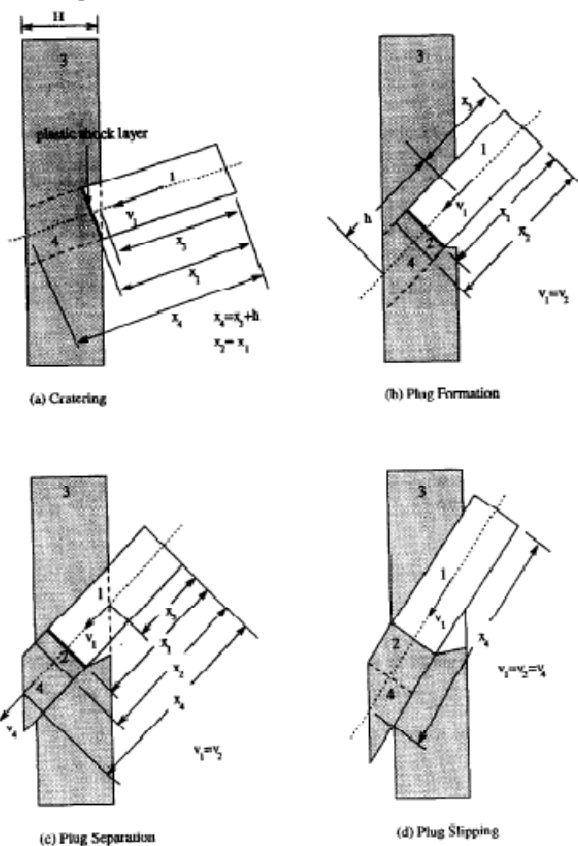
$$F = F_f + \mu F_l \quad (11)$$

سایر معادلات حرکت به صورت زیر است:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -C_p \quad (12)$$

$$\frac{\partial V_p}{\partial t} = -\frac{\sigma_p}{\rho_p L} \quad (13)$$

$$\frac{\partial z_p}{\partial t} = V_c \cos \theta \quad (14)$$



شکل ۴- هندسه پرتابه و هدف در مرحله پلاگینگ [۱۱].

۲-۲-۲- شکل گیری پلاگ

این مرحله هنگامی آغاز می شود که $V_c < C_t$. نیرو و ممان وارد بر پیشانی پرتابه عبارتند از:

$$F_f = \frac{[\sigma_{yc} A_0 \mu_t + 2\pi R \tau_s \mu_t x] m_p}{m_p + \rho_t A_0 \mu_t x} \quad (21)$$

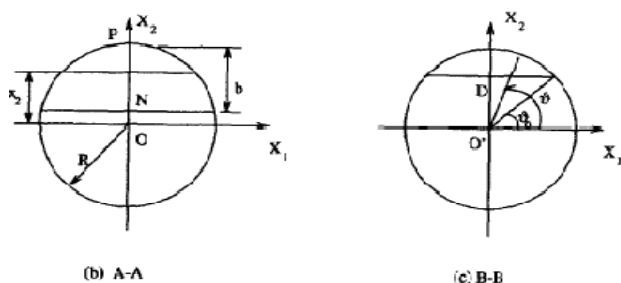
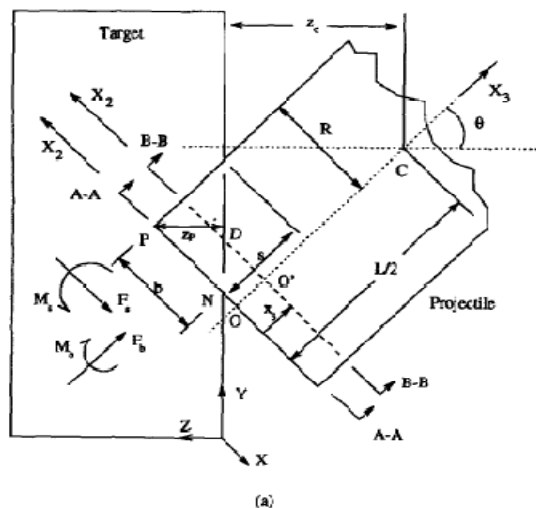
$$M_f = 0 \quad (22)$$

که این نیرو عبارتست از: مجموع نیروهای ناشی از تنش برشی و فشار ناشی از انتشار موج تنش پلاستیک در قسمت تغییر شکل یافته پلاگ. این مرحله شامل دو فاز به صورت زیر است:

الف- تخت شدن پرتابه، شکل گیری پلاگ

این مرحله هنگامی آغاز می شود که $V_s < C_p$ باشد.

در کلیه مراحل که تخت شدن پرتابه رخ می دهد، میزان تخت شدن با محاسبه ضریبی به نام $\mu_t = \frac{A}{A_0}$ به دست می آید. معادلات حاکم بر حرکت حجم کنترل با توجه به شکل (۵) به صورت زیر می باشند:



شکل ۳- پارامترهای هندسی پرتابه و هدف در مرحله فرسایش هدف [۱۱].

۲-۲-۲- پلاگینگ

پلاگ به وسیله نیرویی که از پیشانی پرتابه به هدف وارد می شود، در جلوی پرتابه تشکیل می گردد. پایان این مرحله زمانی است که پلاگ به طور کامل از هدف خارج گردد.

پلاگینگ شامل ۴ مرحله حفره ای شدن، شکل گیری پلاگ، جدایش پلاگ و لغزش پلاگ می باشد که در شکل (۴) نشان داده شده است.

۲-۲-۱- ایجاد حفره در هدف

آغاز این مرحله هنگامی است که کل پیشانی پرتابه در تماس با هدف باشد و نیز $V_c > C_t$. نیرو و گشتاور وارد بر پیشانی پرتابه از رابطه زیر به طوری که $\sigma_{yc} = 1.97 \sigma_y$ است، به دست می آید:

$$F_f = (\sigma_{yc} + \rho_t v_1^2) A_0 \quad (19)$$

$$M_f = 0 \quad (20)$$

سایر روابط برای مرحله تخت شدن پرتابه- ایجاد حفره و صلب شدن پرتابه- ایجاد حفره، به ترتیب همچون تخت شدن پرتابه- فرسایش هدف و صلب شدن پرتابه- فرسایش هدف می باشد.

مرحله شکل گیری پلاگ ادامه دارد. اندازه حرکت حجم کنترل عبارتست از:

$$M = (\rho_p A_0 L_1 + \rho_t A_0 \mu_t x) V_c + \rho_t \mu_t A_0 T V_t \quad (30)$$

$$\phi = 0$$

به طوری که $V_p = V_c$. از معادله بقای اندازه حرکت داریم:

$$(\rho_p A_0 L_1 + \rho_t A_0 \mu_t x) \frac{\partial V_c}{\partial t} = -\rho_t \mu_t A_0 \quad (31)$$

$$[V_c \frac{\partial x}{\partial t} + T \frac{\partial V_t}{\partial t} + V_t \frac{\partial T}{\partial t}] - F$$

پایان این مرحله زمانی است که رابطه (۲۹) برقرار باشد.

۲-۲-۳- جدایش پلاگ

در این مرحله نیروی وارد بر پیشانی پرتابه عبارتست از:

$$F_f = \sigma_{yc} A \mu_t + V_c (V_c - V_t) A \rho_t \mu_t + \quad (32)$$

$$2 \pi R \mu_t^{1/2} \tau_s x$$

این مرحله نیز همچون مرحله شکل گیری پلاگ شامل دو مرحله تخت شدن پرتابه و صلب شدن پرتابه است. سایر روابط مانند مرحله قبل است. پایان این مرحله هنگامی است که سرعت پرتابه و پلاگ برابر شود یعنی $V_t = V_c$.

۲-۲-۴- لغزش پلاگ

در این مرحله موج تنش پلاستیک به انتهای پلاگ رسیده و تمام پلاگ به صورت تغییر شکل پذیر می‌باشد. حجم کنترل در این مرحله در شکل (۶) رسم شده است.

نیروی وارد بر پیشانی پرتابه عبارتست از:

$$F_f = \frac{2 \pi R \mu_t^{1/2} \tau_s x}{m_p + \rho_t \mu_t A_0 x} m_p \quad (33)$$

این مرحله نیز شامل دو فاز است:

الف- تخت شدن پرتابه - جدایش پلاگ

معادلات حاکم بر این مرحله به صورت زیر است:

$$M = \rho_p L A_0 V_p + \rho_t \mu_t A_0 x V_c + \rho_p A_0 (L_1 - L) V_c \quad (34)$$

$$[\rho_p A_0 (L_1 - L) + \rho_t \mu_t A_0 x] \frac{\partial V_c}{\partial t} = -F - \rho_p A_0 (V_s \frac{\partial L}{\partial t} + L \frac{\partial V_p}{\partial t}) - \rho_t \mu_t A_0 V_c \frac{\partial x}{\partial t} \quad (35)$$

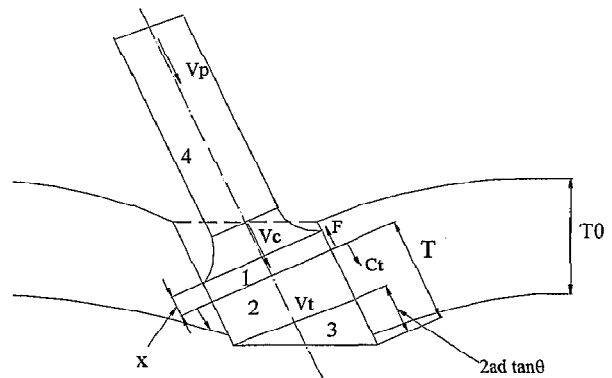
$$M = \rho_p A_0 (L_1 - L) V_c + \rho_p A_0 L V_p + \rho_t \mu_t A_0 (T - 2R \tan \theta) V_t + \rho_t A_0 \mu_t x V_c + \frac{2}{3} \rho_t \mu_t A_0 R \tan \theta V_t \quad (23)$$

$$\phi = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = C_t \quad (25)$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -C_p \quad (26)$$

$$\frac{\partial V_t}{\partial t} = \frac{\sigma_t}{\rho_t (T - \frac{4}{3} R \tan \theta)} \quad (27)$$



شکل ۵- تخت شدن پرتابه- شکل گیری پلاگ [۱۳].

با قرار دادن روابط فوق در معادله بقای اندازه حرکت:

$$(\rho_p A_0 (L_1 - L) + \rho_t A_0 \mu_t x) \frac{\partial V_c}{\partial t} = -\rho_p A_0 (L \frac{\partial V_p}{\partial t} + V_s \frac{\partial L}{\partial t}) - \rho_t \mu_t A_0 \quad (28)$$

$$[V_c \frac{\partial x}{\partial t} + (T - \frac{4}{3} R \tan \theta) \frac{\partial V_t}{\partial t} + (\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{4}{3} R (1 + \tan^2 \theta) \frac{\partial \theta}{\partial t}) V_t] - F$$

پایان این مرحله هنگامی است که نیروی برشی با نیروی ناشی از انتشار موج پلاستیک برابر شود یا اینکه $V_s = 0$ باشد.

$$\sigma_{yc} \mu_t A_0 = 2 \pi R \tau_s \mu_t^{1/2} T \quad (29)$$

ب- صلب شدن پرتابه - شکل گیری پلاگ

در این مرحله از فرایند نفوذ، سرعت موج تنش پلاستیک در پرتابه به صفر رسیده و به صورت جسم صلب حرکت می‌کند یعنی $V_s = 0$ در حالی که

پایان این مرحله زمانی است که:

$$z_p = H + 2R \sin \theta + L \cos \theta \quad (42)$$

و یا اینکه $V_s = 0$

۲-۳-۲- صلب شدن پرتابه- توسعه سوراخ

در این مرحله انتشار موج تنش پلاستیک در پرتابه متوقف شده و صلب می شود. معادلات حرکت مربوط به این مرحله عبارتند از:

$$M = \rho_p A_0 L_1 V_c \quad (43)$$

$$\rho_p A_0 L_1 \frac{\partial V_c}{\partial t} = -F \quad (44)$$

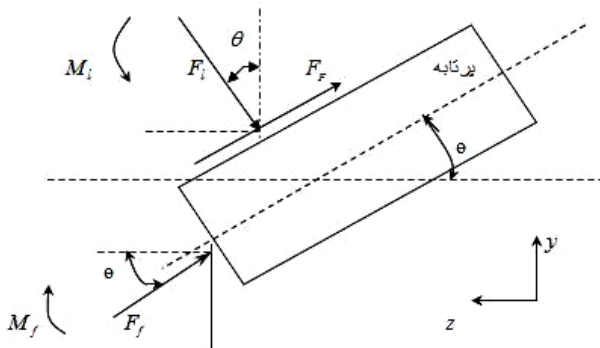
در پایان این مرحله پرتابه به طور کامل از هدف خارج می شود.

۲-۴- پتالینگ

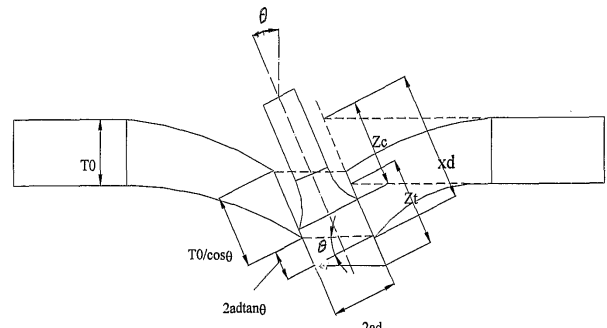
فرض می شود هنگام خروج پلاگ ترک‌هایی در هدف ایجاد می شود. با توجه به اینکه به خاطر سرعت زاویه‌ای، زاویه برخورد در طی فرایند نفوذ افزایش می یابد. هنگامی که این زاویه به مقدار مشخصی برسد، نیروهای پاره کننده به اندازه کافی بزرگ شده و اشاعه ترک آغاز و پتالینگ شروع می شود. از مشاهدات تجربی زاویه بحرانی برای AL6061-T6 حدود ۲۵ درجه است. این فاز در مدل تحلیلی حاضر لحاظ نشده است زیرا زاویه برخورد مورد بررسی در این مدل بین صفر تا ۲۵ درجه می باشد.

۳- معادلات حرکت پرتابه

شکل (۷) نیروها و ممان های اعمالی به پرتابه را نشان می دهد. معادلات حرکت پرتابه از قانون دوم نیوتن به دست می آیند.



شکل ۷- نیروها و گشتاورهای وارد بر پرتابه [۱۴].



شکل ۶- جدایش پلاگ [۱۳].

پایان این مرحله هنگامی است که:

$$z_p = H + 2R \sin \theta \quad (36)$$

یا اینکه $V_s = 0$.

ب- صلب شدن پرتابه- جدایش پلاگ

معادلات حرکت در این مرحله عبارتند از:

$$M = \rho_p L A_0 V_p + \rho_t \mu_t A_0 x V_c \quad (37)$$

$$\rho_t \mu_t A_0 x \frac{\partial V_c}{\partial t} = -F - \rho_p A_0 \left(V_p \frac{\partial L}{\partial t} + \right. \quad (38)$$

$$\left. L \frac{\partial V_p}{\partial t} \right) - \rho_t \mu_t A_0 V_c \frac{\partial x}{\partial t}$$

پایان این مرحله هنگامی است که رابطه (۳۶) برقرار باشد.

۲-۳- توسعه سوراخ

آغاز این مرحله زمانی است که پلاگ به طور کامل از هدف خارج است. در کلیه مراحل توسعه سوراخ، به دلیل عدم تماس پرتابه و پلاگ نیروی وارد بر پیشانی پرتابه صفر می باشد. این مرحله نیز شامل دو بخش است.

۲-۳-۱- تخت شدن پرتابه- توسعه سوراخ

اگر $V_s < C_p$ این مرحله آغاز می شود. معادلات حرکت عبارتند از:

$$M = \rho_p L A_0 V_p + \rho_p A_0 (L_1 - L) V_c \quad (39)$$

$$\rho_p A_0 (L_1 - L) \frac{\partial V_c}{\partial t} = -F - \quad (40)$$

$$\rho_p A_0 \left(V_s \frac{\partial L}{\partial t} + L \frac{\partial V_p}{\partial t} \right)$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -C_p, \frac{\partial V_p}{\partial t} = -\frac{\sigma_p}{\rho_p L} \quad (41)$$

برآیند نیروها در راستای محورهای y و z عبارتست از

۴- نتایج و بحث

نتایج حاصل از مدل جدید به همراه مدل تحلیلی لی و گلداسمیت [۱۱] و دوازده تست تجربی انجام شده توسط آنها برای سرعت خروجی پرتابه و پلاگ در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است.

با مقایسه نتایج حاصل از مدل تحلیلی جدید و داده‌های تجربی و نیز نتایج مدل تحلیلی لی و گلداسمیت برای سرعت نهایی پرتابه و سرعت خروجی پلاگ هم‌خوانی خوبی مشاهده می‌شود. به طوری که در زاویه برخوردی نزدیک به ۱۰ درجه این هم‌خوانی بسیار عالی است و دقت نتایج حاصله از نتایج مدل تحلیلی لی و گلداسمیت بیشتر است.

جدول ۲- نتایج مدل جدید برای سرعت نهایی پرتابه.

شرایط اولیه				سرعت نهایی پرتابه (m/s)		
v_0 (m/s)	θ_0 (deg)	β_0 (deg)	ω_0 (rad/s)	مدل تجربی [۱۱]	مدل تحلیلی [۱۱]	مدل جدید
۴۰۴	۱۷/۸	-۴/۸	۱۰۷۵	۲۵۳	۲۸۷	۲۸۴
۵۲۳	۱۰/۹	۶/۸	۶۵۹	۳۸۱	۳۷۲	۳۸۹
۴۷۶	۱۲/۳	-۳/۴	۳۸۷	۳۶۱	۳۷۸	۳۶۲
۵۰۵	۶/۶	۴/۶	۱۶۷۴	۳۹۵	۳۷۸	۳۸۵
۶۲۰	۸/۷	۴/۶	۲۲۶۴	۴۷۸	۴۶۳	۴۸۴
۶۳۰	۹/۲	۱/۱	۶۷۸	۵۳۰	۵۱۶	۵۳۴
۵۶۲	۱۰/۲	۳/۷	۱۵۹۱	۴۱۳	۴۱۶	۴۳۲
۴۳۸	۲۱/۶	۷/۸	۱۹۷۵	۲۱۸	۱۷۹	۲۷۱
۳۷۲	۰/۶	۶/۸	۷۸	۲۶۶	۲۸۱	۲۶۶
۶۳۵	۲/۳	۲/۹	۵۱۷	۵۵۱	۵۴۰	۵۴۵
۵۳۶	۱۸/۵	۷/۲	۱۰۹۵	۳۳۲	۳۲۴	۳۷۷
۴۰۲	.	.	.	۳۲۳	۳۲۰	۲۸۱

جدول ۳- نتایج مدل جدید برای سرعت نهایی پلاگ.

شرایط اولیه				سرعت نهایی پلاگ (m/s)		
v_0 (m/s)	θ_0 (deg)	β_0 (deg)	ω_0 (rad/s)	مدل تجربی [۱۱]	مدل تحلیلی [۱۱]	مدل جدید
۴۰۴	۱۷/۸	-۴/۸	۱۰۷۵	۳۴۶	۲۹۹	۳۱۶
۵۲۳	۱۰/۹	۶/۸	۶۵۹	۴۲۶	۴۰۶	۴۱۰
۴۷۶	۱۲/۳	-۳/۴	۳۸۷	۴۱۱	۳۸۷	۳۸۵
۵۰۵	۶/۶	۴/۶	۱۶۷۴	۴۱۰	۴۰۴	۴۰۸
۶۲۰	۸/۷	۴/۶	۲۲۶۴	۵۰۵	۵۰۱	۵۰۱
۶۳۰	۹/۲	۱/۱	۶۷۸	۵۵۶	۵۲۷	۵۴۸
۵۶۲	۱۰/۲	۳/۷	۱۵۹۱	۴۷۴	۴۴۷	۴۵۱
۴۳۸	۲۱/۶	۷/۸	۱۹۷۵		۲۳۳	۲۹۵
۳۷۲	۰/۶	۶/۸	۷۸	۳۰۲	۲۸۶	۳۰۰
۶۳۵	۲/۳	۲/۹	۵۱۷	۵۵۴	۵۴۳	۵۶۰
۵۳۶	۱۸/۵	۷/۲	۱۰۹۵		۴۰۱	۳۹۶
۴۰۲	.	.	.	۳۴۹	۳۲۰	۳۱۶

$$F_z = -(F_f + F_F) \cos \theta - F_l \sin \theta \quad (۴۵)$$

$$F_y = (F_f + F_F) \sin \theta - F_l \cos \theta \quad (۴۶)$$

از تعادل نیروها و گشتاور به دست می‌آید:

$$F_z = m_p \frac{d^2 z_c}{dt^2} \quad (۴۷)$$

$$F_y = m_p \frac{d^2 y_c}{dt^2} \quad (۴۸)$$

$$M = I_p \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (۴۹)$$

$$m_p = \pi R^2 L \rho_p \quad (۵۰)$$

$$I_p = m_p \left[\frac{R^2}{4} + \frac{L^2}{12} \right] \quad (۵۱)$$

به طوری که m_p جرم و I_p ممان اینرسی پرتابه می‌باشد. معادلات حرکت در هر مرحله بروش محاسبات عددی رانگ کوتاه مرتبه ۴ و با تهیه برنامه کامپیوتری حل می‌شوند. شرایط اولیه از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\theta(0) = \theta_0 \quad (۵۲)$$

$$V_z(0) = V_0 \cos \beta_0 \quad (۵۳)$$

$$V_y(0) = V_0 \sin \beta_0 \quad (۵۴)$$

$$\omega(0) = \omega_0 \quad (۵۵)$$

$$z_p(0) = 0 \quad (۵۶)$$

$$z_c(0) = -\frac{L}{2} \cos \theta_0 - R \sin \theta_0 \quad (۵۷)$$

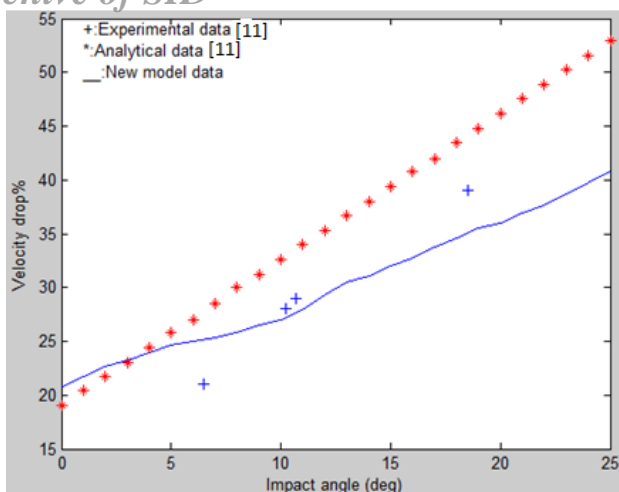
$$y_c(0) = 0 \quad (۵۸)$$

$$V_p(0) = v_0 \quad (۵۹)$$

$$L(0) = L_0 \quad (۶۰)$$

$$x(0) = 0 \quad (۶۱)$$

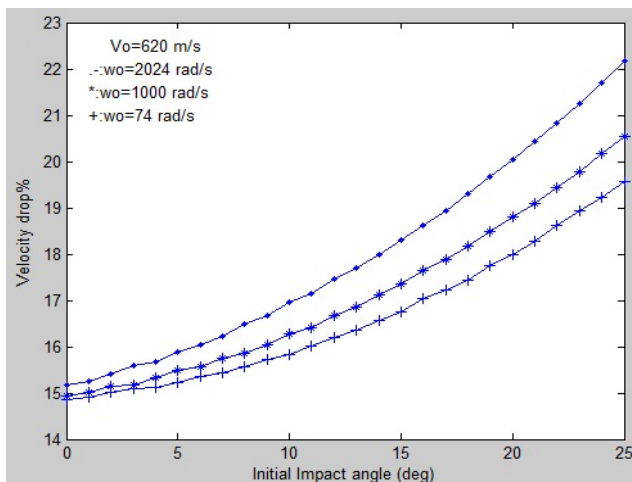
در مراحل بعدی ورودی هر مرحله خروجی مرحله قبل است.



شکل ۹- تغییرات افت سرعت برحسب زاویه برخورد در سرعت اولیه ۵۰۵ m/s

۴-۲- بررسی اثر سرعت زاویه‌ای پرتابه در میزان افت سرعت پرتابه پس از خروج از هدف

شکل (۱۰) میزان افت سرعت را برحسب زاویه برخورد در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف و سرعت اولیه ۶۲۰ m/s نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تغییرات سرعت زاویه‌ای اثر قابل ملاحظه‌ای بر افت سرعت ندارد. می‌توان گفت تنها تأثیر سرعت زاویه‌ای در تغییر زاویه برخورد در طی فرایند نفوذ است.



شکل ۱۰- میزان افت سرعت برحسب زاویه برخورد در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف و سرعت اولیه ۶۲۰ m/s

۵- نتیجه‌گیری

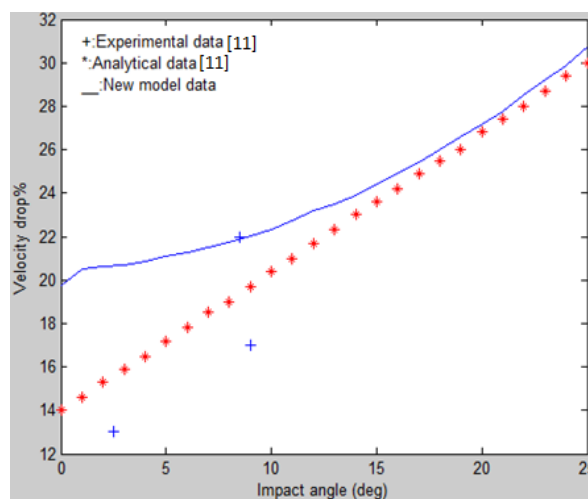
در مقاله حاضر پدیده نفوذ پرتابه دارای چرخش غیر محوری با استفاده از مدل تحلیلی لی و گلداسمیت [۱۱] مورد مطالعه قرار گرفته است. در مدل جدید با لحاظ کردن اثر نیروی اصطکاک و تغییر فرم‌پذیری پرتابه

به‌طور کلی مشاهده می‌شود که در سرعت‌های اولیه بزرگ (بین ۵۰۰ تا ۶۵۰ m/s) و زاویه برخوردهای حدود ۱۰ درجه دقت نتایج بیشتر است. صحت این مطلب را ونکسیو در مقاله خود [۹] این‌گونه تأیید می‌کند که مدل ارائه شده برای تغییر شکل پرتابه توسط وی در سرعت‌های پایین یعنی در محدوده سرعت حد بالستیک نتایج دقیقی به‌دست نمی‌دهد.

همچنین از داده‌های جداول (۲) و (۳) مشاهده می‌گردد که در زوایای برخورد بزرگ (بین ۱۷ تا ۲۱ درجه) نتایج حاصل شده دقت قابل قبولی ندارند، این مسئله ناشی از این است که در زوایای برخورد بالا مود شکست به‌جای توسعه سوراخ به پتالینگ تمایل دارد. با توجه به اینکه مود شکست مورد استفاده در این تحلیل توسعه سوراخ می‌باشد، این اختلاف در نتایج رخ داده است.

۴-۱- بررسی اثر زاویه برخورد و سرعت اولیه در میزان افت سرعت پرتابه پس از خروج از هدف

نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های (۸) و (۹) میزان تغییرات افت سرعت برحسب زاویه برخورد را برای سرعت‌های اولیه ۶۲۰ m/s و ۵۰۵ m/s نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه برخورد میزان افت سرعت افزایش پیدا می‌کند. علت این امر افزایش طول پلاگ تشکیل شده در جلوی پرتابه است که به انرژی بیشتری برای جدایش نیازمند است. همچنین کاهش سرعت اولیه به افزایش میزان افت سرعت کمک می‌کند.



شکل ۸- تغییرات افت سرعت برحسب زاویه برخورد در سرعت اولیه ۶۲۰ m/s

زیرا کاهش سرعت اولیه منجر به کاهش انرژی جنبشی پرتابه شده و در نهایت سرعت خروجی پرتابه نیز کاهش می‌یابد. بنابراین میزان افت سرعت که از رابطه $(V_o - V_f)/V_o$ به‌دست می‌آید، افزایش پیدا می‌کند.

مختصه مرکز جرم پرتابه در جهت Y	y_c
مختصه مرکز جرم پرتابه در جهت Z	z_c
عمق نفوذ پرتابه	z_p
چگالی پرتابه	ρ_p
چگالی پلاگ	ρ_t
تنش تسلیم پرتابه در حالت تنش محوری	σ_p
تنش تسلیم هدف در شرایط کرنش محوری	σ_t
تنش تسلیم دینامیکی تک محوره	σ_{yc}
تنش برشی دینامیکی	τ_s
سرعت زاویه‌ای پرتابه	ω
ضرب اصطکاک	μ
نسبت سطح تغییر شکل یافته پرتابه به سطح مقطع اولیه	μ_t
شار خالص اندازه حرکت از طریق سطح کنترل	ϕ

با استفاده از مدل ونکسیو [۹] پاره‌ای از فرضیات حاکم بر مدل لی و گلداسمیت اصلاح شده است. با بررسی و مقایسه نتایج حاصل از مدل تحلیلی جدید از جداول (۲) و (۳) با نتایج تجربی موجود مشاهده می‌گردد که این مدل پیش‌بینی قابل قبولی از سرعت پلاگ خروجی و سرعت نهایی پرتابه و نیز ارتباط میزان افت سرعت با زاویه برخورد و سرعت اولیه پرتابه به دست می‌دهد. همچنین مدل جدید در ارائه سرعت نهایی پرتابه هم‌خوانی مطلوبی با مدل تحلیلی لی و گلداسمیت دارد و در پاره‌ای از مقادیر دقت آن از مدل تحلیلی لی و گلداسمیت [۱۱] بیشتر است. مدل ارائه شده در این مقاله در سرعت‌های اولیه بالا دقت قابل قبولی دارد، اما در سرعت‌های نزدیک به سرعت حد بالستیک دقت نتایج کمتر است. همچنین در زاویه برخوردهای نزدیک به ۱۰ درجه صحت نتایج بیشتر است. نکته جالب اینکه تغییرات سرعت زاویه‌ای پرتابه حتی در محدوده بین ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ رادیان بر ثانیه تغییر قابل توجهی در سرعت نهایی آن ایجاد نمی‌کند.

۶- فهرست علائم

مراجع

- [1] Recht, F. R.; Ipson, T. W. "Ballistic Perforation Dynamics"; J. Appl. Mech. 1963, 30, 384-390.
- [2] Liss, J.; Goldsmith, W.; Kelly, J. M. "A Phenomenological Penetration Model of Plates"; Int. J. Impact. Eng. 1983, 1, 321-341.
- [3] Liaghat, G. H. "Analysis of the Mechanics of Perforation by Projectile"; J. Eng. IRI. 1991, 4, 127-135.
- [4] Liaghat, G. H. "Comparison of Perforation Theories and Some Experimental Results"; J. Eng. IRI. 1992, 5, 119-127.
- [5] Liaghat, G. H.; Malekzadeh, A. "A Comment on the Penetration Theory by Dikshit and Sundararajan"; Int. J. Impact Eng. 1995, 16, 169-175.
- [6] Liaghat, G. H.; Malekzadeh, A. "A Modification to the Mathematical Model of Penetration by Dikshit and Sundararajan"; Int. J. Impact Eng. 1999, 22, 543-550.
- [7] Khodarahmi, H.; Fallahi, A.; Liaghat, G. H. "Incremental Deformation and Penetration Analysis of Deformable Projectile into Semi-Infinite Target"; Int. J. Solids. Struct. 2006, 43, 569-582.
- [8] Awerbuch, J.; Bodner, S. R. "An Investigation of Oblique Perforation of Metallic Plates by Projectiles"; Exp. Mech. 1977, 17, 147-153.
- [9] Wenxue, Y.; Lanting, Z. "Plate Perforation by Deformable Projectiles - A Plastic Wave Theory"; Int. J. Impact Eng. 1983, 4, 393-412.
- [10] Goldsmith, W.; Finnegan, S. A. "Normal and Oblique Impact of Cylindro-Conical and Cylindrical Projectiles on Metallic Plates"; Int. J. Impact Eng. 1986, 4, 83-105.
- [11] Li, K.; Goldsmith, W. "A Phenomenological Model for Perforation of Moderately Thick Plates by Tumbling Projectiles"; Int. J. Solids & Struct. 1996, 33, 3561-3575.
- [12] Liaghat, G. H.; Moslemi Naeini, H.; Felli, S. "The Mechanics of Normal and Oblique Penetration of Conical Projectile into Multi Layer Metallic Target"; Iran. J. Science & Thech. 2004.

A	سطح مقطع مشترک پرتابه و پلاگ
A_0	سطح مقطع اولیه پرتابه
C_p	سرعت موج تنش پلاستیک محوری در پرتابه
C_t	سرعت موج تنش پلاستیک محوری در پلاگ
D_0	قطر اولیه پرتابه
F	کل نیروهای سطحی و حجمی اعمالی بر حجم کنترل
F_f	نیروی اعمالی بر پیشانی پرتابه
F_l	نیروی وارد بر سطح جانبی پرتابه
H	ضخامت هدف
I_p	ممان اینرسی پرتابه
L	طول بدون تغییر شکل پرتابه
L_1	طول پرتابه در انتهای مرحله فرسایش آن
M	اندازه حرکت خطی در داخل حجم کنترل
M_f	ممنتوم وارد بر پیشانی پرتابه
M_l	ممنتوم وارد بر سطح جانبی پرتابه
P	فشار اعمالی بر سطح مشترک پرتابه و هدف
R	شعاع پرتابه
T	ضخامت پلاگ صلب
v_0	سرعت اولیه پرتابه
v	سرعت پرتابه
v_c	سرعت سطح مشترک پرتابه و هدف
v_p	سرعت قسمت بدون تغییر شکل پرتابه
v_s	سرعت نسبی پرتابه
X	ضخامت پلاگ تغییرشکل پذیر

[۱۴] ملکیان، سعید، "مدلسازی تئوری و عددی برخورد و نفوذ پرتابه های با چرخش غیر محوری در اهداف فلزی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی کرمانشاه، ۱۳۸۶.

[۱۳] فعلی، سعید، "تحلیل فرایند نفوذ پرتابه های تغییر شکل پذیر در اهداف فلزی با استفاده از انتشار امواج تنش پلاستیک"، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳.