



تحلیل عددی و تجربی نفوذ گلوله زرهی در اهداف فولادی فوق مستحکم

محمد نجفی^۱، سید هادی حسینی^۲ و جلال جودکی^{۳*}

^۱ کارشناس ارشد مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

^۲ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۳ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۱/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹

چکیده

در این مقاله به بررسی نفوذ گلوله کالیبر ۱۴/۵ میلی‌متری در ورق‌های فولادی فوق مستحکم هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰ با ضخامت ۳۰ میلی‌متر پرداخته می‌شود. با توجه به پیچیدگی پدیده برخورد، به منظور شبیه‌سازی فرآیند از مدل پلاستیسیته و شکست جانسون-کوک و معادله حالت مای-گرونایزن برای توصیف رفتار مواد استفاده شده است. برای تایید صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده، اندازه‌گیری تجربی روی ورق‌های فولادی انجام شد و مطابقت خوبی با نتایج اجزاء محدود مشاهده گردید. با توجه به شرایط تعیین شده در استاندارد، هارداکس ۵۰۰ با ضخامت ۳۰ میلی‌متر با ضریب اطمینان بالایی در برابر نفوذ کامل گلوله با سرعت اولیه ۹۱۱ m/s مقاومت می‌کند؛ در بدترین شرایط (زاویه برخورد ۹۰ درجه)، بیشترین عمق نفوذ ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. در مقابل در شرایط یکسان گلوله به طور کامل در هارداکس ۴۵۰ نفوذ خواهد کرد. نتایج شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود برای زوایای برخورد از ۳۰ تا ۹۰ درجه نشان داد با کاهش زاویه برخورد علاوه بر کاهش میزان نفوذ، نحوه بازگشت گلوله نیز در زاویه مشخصی تغییر خواهد کرد (برای هارداکس ۴۵۰ در زاویه ۴۰ درجه و برای هارداکس ۵۰۰، در زاویه ۶۰ درجه). با تکرار شبیه‌سازی‌ها در سرعت‌های مختلف حد بالستیک برای هارداکس ۵۰۰ برابر با ۵۰۰ m/s و ۱۲۰۰ و برای هارداکس ۴۵۰ حدود ۹۰۰ m/s بدست آمد.

کلمات کلیدی: نفوذ؛ شبیه‌سازی اجزای محدود؛ فولاد فوق مستحکم؛ حد بالستیک؛ هارداکس.

Penetration of Armored Piercing Projectile into Ultra-High Strength Steel Targets: Numerical and Experimental Investigation

M. Najafi¹, S.H. Hosseini², J. Joudaki^{3,*}

¹ Dep. of Aero. and Mech. Eng., Science and Research Branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran.

² Ph.D. Student, Mech. Eng. Sch., Iran Univ. of Sci. & Tech., Tehran, Iran.

³ Assis. Prof., Mech. Eng. Dep., Arak Univ. of Tech., Arak, Iran.

Abstract

In this article, penetration of an armored piercing projectile into ultra-high strength steel plates (Hardox450 and Hardox500) will be investigated by finite element (FE) analysis and experimental measurement. The ballistic impact is simulated by Abaqus FE software and the FE model is verified the results of experimental test. The mechanical behavior of the selected material is defined by Johnson-Cook plasticity model and Mie-Grunisen equation for damage model. The experimental tests are carried out on 30mm thickness plate. A 14.5mm armored piercing projectile is fired to the plate. The finite element results revealed that the projectile penetrates partially in Hardox500 steel while it can perforates Hardox450 steel. The penetration depth of the projectile when collisioning by 911 m/s speed and at perpendicular state are 13 and 30mm for Hardox500 and hardox450 steel respectively. The penetration depth will be increased by increase in the impact angle from 30° to 90°. In addition, the reflection state changes at a specific angle according to the type of material. The transition angle are 40° and 60° for Hardox450 and Hardox500 steel respectively. Finally, the ballistic limit is calculated and determined as 900m/s and 1200m/s for Hardox450 and Hardox500 steel respectively.

Keywords: Penetration; Finite Element Analysis; Ultra High Strength Steel; Ballistic Limit; Hardox.

۱- مقدمه

در طول سالیان اخیر با توسعه پرتابه‌های انرژی جنبشی و پرتابه‌های انفجاری نفوذ پرتابه‌ها درون بدنه تجهیزات حمل و نقل زرهی ساخته شده از فولادهای با استحکام متوسط به راحتی امکان پذیر شده است؛ از این رو مطالعه روی توسعه و ساخت موادی با استحکام و چقرمگی بسیار بالا در این صنعت، به عنوان یک راهبرد در این صنایع مطرح است [۱]. فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا از دسته فولادهایی هستند که در یک فرایند گرمایی-مکانیکی همزمان با عملیات حرارتی اندازه دانه‌های آنها نیز به طور محسوسی کاهش پیدا کرده است. از این رو استحکام این نوع فولادها در مقایسه با فولادهای معمولی، به مراتب بیشتر است. این نوع فولادها به دلیل قابلیت جذب انرژی و استحکام قابل ملاحظه به عنوان مواد اولیه برای کاربردهای نظامی در برابر برخورد پرتابه‌های با انرژی جنبشی بالا کاربرد دارند. مطالعه روی افزایش چقرمگی این فولادها همزمان با افزایش استحکام آنها سبب توسعه فولادهای کم آلیاژ فوق مستحکم شده است که همزمان با استحکام بسیار بالا، چقرمگی مطلوبی دارند. توسعه این فولادها کارایی سیستم‌های زرهی را به طور قابل ملاحظه‌ای ارتقاء داده است [۲].

پدیده برخورد با سرعت بالا و نفوذ، از جمله مسائل بسیار پیچیده در مکانیک مواد است که در طول چند دهه اخیر مورد مطالعه و بررسی محققان بسیاری قرار گرفته است [۳] و [۴]. در این پدیده تغییر شکل پلاستیک، شکست، ضربه و سایش در نرخ کرنش‌های بسیار بالا به طور همزمان اتفاق می‌افتد [۵]. از این رو بررسی و مدل‌سازی این پدیده با توجه به اثرات مذکور، امری ضروری است. تا اواسط دهه ۸۰ میلادی با توجه به پیچیدگی‌های بیان شده برای پدیده برخورد در سرعت‌های بسیار بالا، تحقیقات انجام شده بیشتر روی آزمایش‌های تجربی تکیه داشت [۶]؛ ولی با توسعه روش‌های عددی پس از سال ۱۹۹۴ مقالات متعددی در زمینه بررسی عددی و تجربی برخورد ارائه شد تا دقت تحلیل در این مسائل با ارائه روش‌های محاسباتی جدید و مدل‌های

رفتاری دقیق‌تر برای مواد مورد استفاده افزایش یابد [۳] و [۵-۸]. بدین ترتیب میزان تطبیق تحلیل‌های عددی با آزمایش‌های تجربی به تدریج افزایش یافت. تحقیقات انجام شده در این زمینه بیشتر به بررسی مقاومت بالستیک مواد مهندسی مانند، انواع فولادها [۷ و ۸]، آلومینیوم [۹ و ۱۰] و تیتانیوم [۱۱]، مواد سرامیکی [۱ و ۱۲]، کامپوزیت‌های پایه پلیمری و سرامیکی [۱۳-۱۵] و بتن تقویت شده با الیاف [۱۶] در ضخامت‌های مختلف و تعیین حد بالستیک این مواد پرداخته است. قطعات توخالی نیز دسته‌ای از قطعات هستند که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند و حد بالستیک در این دسته از قطعات، به شکل تحلیلی یا عددی بدست آمده است [۱۷]؛ همچنین با توسعه مدل‌های رفتاری جدید الاستوپلاستیک، شکست و معادلات حالت شوک برای این مواد، اثر این پارامترها در افزایش دقت تحلیل مورد بررسی قرار گرفته است [۱۸]. به علاوه چالش‌های متعددی برای تحلیل اجزای محدود مسئله برخورد وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به تغییر شکل شدید المان‌ها در منطقه برخورد هنگام استفاده از مدل لاگرانژی یا زمان بسیار بالای محاسبات در مدل اولی‌ری اشاره کرد که با مدل ترکیبی اولی-لاگرانژی و مش تطبیقی تا حدودی این مشکل برطرف شد؛ سپس با حذف المان‌هایی که میزان تنش یا تغییر شکل به معیار شکست در تحلیل رسیده است، مشکل اعوجاج المان‌ها نیز حل گردید [۲]. همچنین در مطالعات اخیر روش‌های جدید همچون استفاده از ذرات پیوسته در روش هیدرودینامیک ذرات هموار^۴ که اجازه حرکت ذرات را بدون محدودیت به ماده می‌دهند، برای مدل‌سازی برخورد استفاده شده است [۱۹]؛ ولی زمان بالای محاسبات و نیاز به پردازنده‌های قوی‌تر، از جمله مشکلات این روش است. از این رو استفاده از مدل اولی-لاگرانژی با قابلیت مش مجدد تطبیقی به همراه حذف المان‌های ناحیه شکست از منظر هزینه و دقت بهینه به نظر می‌رسد [۶].

در سال‌های اخیر فولادهای فوق مستحکم هارداکس به دلیل خواص مکانیکی بسیار عالی مانند، استحکام و چقرمگی مطلوب برای استفاده در صنایع نظامی مخصوصاً مصارف بالستیک به گزینه بسیار مناسبی تبدیل شده‌اند. این فولادها

^۱ Kinetic Energy (KE) projectile

^۲ Explosive Projectile

^۳ High Strength Low Alloy (HSLA)

^۴ Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)

دما را ارائه دهد که محققان مختلف، مدل‌های متفاوتی را جهت برقراری ارتباط میان این متغیرها ارائه کرده‌اند. یکی از پرکاربردترین مدل‌ها برای بیان ارتباط میان کرنش، دما و نرخ کرنش با تنش تسلیم مدل پلاستیسیته جانسون-کوک^۴ است. این رابطه یک مدل برای تخمین تنش تسلیم برای مدل پلاستیسیته مایزاشت که برای بیان رفتار مکانیکی اغلب فلزات در فرآیندهایی با نرخ کرنش بسیار بالا مانند، ماشینکاری و مسائل برخورد کاربرد دارد [۲]. این مدل قابلیت انطباق با مدل شکست جانسون-کوک و مدل شکست مرحله‌ای را دارد. رابطه ۱ مدل پلاستیسیته جانسون-کوک را نشان می‌دهد [۲۳].

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\bar{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 + \bar{\theta}^m) \quad (1)$$

در رابطه ۱، $\bar{\sigma}$ تنش تسلیم ماده، $\bar{\epsilon}^{pl}$ کرنش پلاستیک معادل، $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنش پلاستیک، $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع و A, B, C, n, m ثوابت ماده می‌باشند. به علاوه $\bar{\theta}$ به شکل رابطه ۲ تعریف می‌شود.

$$\bar{\theta} = \begin{cases} 0 & \text{for } \theta < \theta_{transition} \\ \frac{\theta - \theta_{transition}}{\theta_{melt} - \theta_{transition}} & \text{for } \theta_{transition} < \theta < \theta_{melt} \\ 1 & \text{for } \theta_{melt} < \theta \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه ۲، θ ، $\theta_{transition}$ و θ_{melt} به ترتیب دما، دمای ذوب و دمای گذار یا دمایی است که پایین تر از آن اثر دما روی تنش تسلیم قابل صرف‌نظر کردن است (دمای مذکور در مقیاس کلونین تعریف می‌گردد). بدین ترتیب $\bar{\sigma}$ به عنوان ورودی تابع تسلیم مایزاشت ϕ به شکل رابطه ۳ قابل محاسبه است [۲۲].

$$\phi = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} - \bar{\sigma} = 0 \quad (3)$$

در رابطه ۳، S_{ij} تانسور تنش انحرافی است. بدین ترتیب با استفاده از قانون جریان و اصل تعامد می‌توان رابطه بین جزء تنش و جزء کرنش پلاستیک را به شکل رابطه ۴ بیان کرد [۲۲]:

$$d\epsilon_{pq}^{pl} = \frac{1}{h} (dS_{ij} n_{ij}) n_{pq} \quad (4)$$

عموماً در صنایع مختلف به دلیل مقاومت به سایش بسیار بالا (مانند صنایع اتومبیل) و استحکام بسیار بالا همراه با داشتن چقرمگی مطلوب (صنایع نظامی) استفاده می‌شوند [۲۰]. از این رو بررسی مقاومت بالستیک این نوع فولادها با توجه به استفاده روزافزون آنها، امری ضروری تلقی می‌شود. بورویک و همکاران [۲۱] به بررسی مقاومت ۵ ماده مختلف شامل، ولداکس ۵۰۰، ولداکس ۷۰۰، هارداکس ۴۰۰، دومکس ۵۰۰ و آرماکس ۵۶^۳ در مقابل ضربه ناشی از گلوله سبک پرداختند و حد بالستیک این دسته از مواد را بدست آورده‌اند. با توجه به استفاده روزافزون از فولادهای هارداکس به عنوان مواد اولیه برای ساخت زره‌های مقاوم در برابر برخورد گلوله‌های با انرژی جنبشی بالا، بررسی مقاومت بالستیک این دسته از فولادها با استفاده از روش‌هایی با حداقل هزینه مانند تحلیل اجزای محدود، امری ضروری به نظر می‌رسد. با این حال، اطلاعاتی پیرامون بررسی عددی و تجربی مواد مذکور و رفتار این فولاد در بارگذاری انفجاری وجود ندارد. بدین منظور در این مقاله، به مدل‌سازی اجزای محدود برخورد گلوله با کالیبر ۱۴/۵ میلی‌متر به ورق‌های ضخیم هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰ پرداخته خواهد شد و با انجام آزمایش‌های عملی صحت نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، مورد تایید قرار گرفته است.

۲- معادلات رفتار مکانیکی و مدل‌سازی اجزاء

محدود

در هنگام اعمال بارگذاری دینامیکی مانند آنچه که در برخورد پرتابه با انرژی جنبشی بالا اتفاق می‌افتد، رفتار مواد تحت بارگذاری دینامیکی به طور قابل توجهی با شرایط شبه-استاتیکی متفاوت است [۲۲]. این تفاوت عمدتاً ناشی از اثرات اینرسی، نرخ کرنش و موج تنش است. برای در نظر گرفتن اثرات اینرسی، باید مسئله در حالت دینامیکی مورد تحلیل قرار گیرد؛ همچنین برای بیان رفتار مواد، معادله رفتاری باید رابطه‌ای بین نرخ کرنش، استحکام تسلیم، کرنش پلاستیک و

¹ Weldox 500E

² Domex Protect 500

³ ArmoX 560T

⁴ Johnson-Cook

⁵ Mises

در رابطه ۷، σ_m تنش متوسط و σ_{eq} تنش معادل میز است.

با توجه به مطالعات انجام شده روی برخورد در سرعت‌هایی بین ۵۰۰-۲۰۰۰ m/s ماده در لحظه برخورد تراکم‌پذیر بوده و می‌توان با استفاده از معادله حالت، رابطه‌ای بین چگالی و فشار برای آن ماده پیشنهاد کرد. یکی از این مدل‌ها، مدل خطی مای-گرونایزن^۲ است که به شکل رابطه ۸ بیان می‌شود [۲۳].

$$p = \frac{\rho_0 C_0^2 \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)}{\left(1 - s \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)\right)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)}{2}\right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \quad (8)$$

در رابطه ۸، ρ_0 چگالی اولیه، ρ چگالی، Γ_0 ثابت گرونایزن، C_0 سرعت صوت در ماده، s ثابت ماده و E_m انرژی واحد حجم است. بدین ترتیب می‌توان خطای به وجود آمده در محاسبات فشار را با استفاده از معادله حالت تا حد امکان کاهش داد.

برای مدل‌سازی برخورد گلوله با ورق ضخیم فولادی از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس^۳ استفاده شده است. در ابتدا گلوله کالیبر ۱۴/۵ و ورق ضخیم مورد استفاده در آزمون با توجه به استاندارد ۴۵۶۹ ناتو^۴ مدل‌سازی شد. شکل ۱ نمای مدل گلوله و ورق ضخیم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به تقارن و به منظور کاهش حجم محاسبات نیمی از مدل برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. در مدل‌سازی المان محدود زمانی که نیمی از مدل مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد، شرایط تقارن مساله ایجاب می‌نماید که گره‌هایی که در صفحه تقارن قرار دارند، دارای کرنش و جابه‌جایی صفر باشند و این به معنی اضافه نمودن یک قید به مساله مورد مطالعه است که باید یک درجه آزادی سیستم حذف شود تا حل معین باشد. پس زمانی که تنها نیمی از مدل شبیه‌سازی می‌شود، ساده‌سازی در مساله اتفاق نیفتاده است؛ زیرا تغییری در شیوه اعمال بار خارجی ایجاد نشده است.

در رابطه ۴، h مدول پلاستیک یا مدول مماسی و n_{ij} بردار واحد عمود بر سطح تسلیم است.

علاوه بر تعریف خواص پلاستیک ماده وابسته به دما، کرنش و نرخ کرنش، مدلی برای شکست و واماندگی در قطعه تحت بارگذاری دینامیکی نیز مورد نیاز است تا در صورت برآورده شدن آن شرایط، المان‌های مورد نظر با توجه به معیار شکست تغییر خواص دهند یا از مسئله حذف شوند. مدل شکست جانسون-کوک، یکی از مدل‌های رفتاری جهت مدل‌سازی شکست نرم در نرخ کرنش‌های بالا است. این مدل اصلاح شده مدل هانکوک و ماکنزی^۱ است که توسط جانسون و کوک توسعه پیدا کرده است [۲۲]. در این مدل کرنش شکست به صورت تابعی از نسبت تنش اصلی به تنش هیدرواستاتیک، دما، نرخ کرنش و مسیر کرنش بیان می‌شود. در این مدل فرض می‌شود هنگامی که ماده تحت کرنش‌های پلاستیک واقع شود و پارامتر شکست به مقدار بحرانی برسد، شکست ماده سریعاً و آنی اتفاق خواهد افتاد. با فرض اینکه D متغیر شکست باشد، مقدار آن بین صفر (بدون شکست) و ۱ (شکست کامل) متغیر خواهد بود. معیار شکست بر این اساس استوار است که اگر کرنش پلاستیک در نقاط انتگرال‌گیری المان به مقدار بحرانی ۱ برسد، در این صورت شکست اتفاق خواهد افتاد. متغیر شکست D مطابق رابطه ۵ تعریف می‌شود [۶].

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{p,f}} \quad (5)$$

در رابطه ۵، $\Delta \varepsilon_{pl}$ کرنش پلاستیک اعمال شده در هر بازه زمانی و $\varepsilon_{p,f}$ کرنش پلاستیک شکست است که مقدار آن از رابطه ۶ قابل محاسبه است [23].

$$\varepsilon_{p,f} = [d_1 + d_2 \exp(-d_3 \eta)] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\varepsilon^{pl}}{\varepsilon_0} \right) \right] \times (1 + d_5 \theta) \quad (6)$$

در رابطه ۶، d_1 تا d_5 ثوابت ماده و η مطابق رابطه ۷ تعریف می‌شود.

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \quad (7)$$

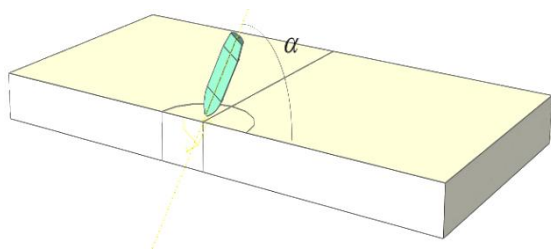
² Mie-Grünisen

³ Abaqus/Explicit

⁴ STANAG4569

¹ Hancock and Mackenzie

برخورد پرتابه با ورق در مقایسه با سایر نقاط بسیار کوچکتر است تا علاوه بر این که دقت حل مسئله افزایش پیدا کند، حجم محاسبات تغییر چندانی نداشته باشد. اندازه بهینه المان در منطقه برخورد با تکرار یک شبیه‌سازی برای یک حالت با متغیرهای ثابت و اندازه‌گیری عمق نفوذ گلوله تا زمان کاهش اثر اندازه المان بدست آمده است. به منظور اعمال شرایط مرزی اطراف ورق در جهت حرکت گلوله و جهت عمود بر ضلع مذکور مقید شده و گلوله با سرعت اولیه 911m/s بر اساس استاندارد ۴۵۶۹ ناتو با ورق برخورد می‌کند. تماس میان گلوله و ورق در ناحیه برخورد المان‌های گلوله و ورق، به عنوان سطح داخلی تعریف شده است تا بعد از حذف المان‌هایی که به مقدار بحرانی شکست رسیده‌اند، سطح تازه‌ای برای برقراری تماس ایجاد شود. شرایط تماس با استفاده از روش پنالتی با ضریب اصطکاک $0/05$ مدل شده است [۲۴].



شکل ۱- نمای قطعات مدل‌سازی شده برای تحلیل برخورد

بدین ترتیب شبیه‌سازی‌ها روی ورق‌های مربعی به طول ۴۰ سانتی‌متر به ضخامت ۳۰ میلی‌متر با گلوله استاندارد کالیبر ۱۴/۵ میلی‌متری به جرم تقریبی ۶۰ گرم انجام شده است. برای تعریف خواص پلاستیک و شکست مواد ورق و گلوله به صورت وابسته به زمان، از مدل پلاستیسیته و شکست جانسون-کوک استفاده شده است. برای ورق دو ماده هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰ و برای گلوله فولادی، فولاد سخت‌کاری شده تا سختی ۵۸HRC در نظر گرفته شده است. جدول ۱ ضرایب رابطه را برای هر سه ماده استفاده شده در تحلیل نشان می‌دهد. جدول ۲ نیز، پارامترهای مدل شکست تعریف شده در نرم افزار را براساس مدل شکست جانسون-کوک نشان می‌دهد؛ همچنین برای مدل‌سازی شوک و رابطه چگالی با فشار از مدل مای-گرونایزن استفاده شده است که ثابت‌های آن برای هر سه ماده یکسان در نظر گرفته شده است. جدول ۳ ثابت‌های معادله خطی مای-گرونایزن را برای هر سه ماده مورد استفاده در تحلیل نشان می‌دهد. برای هر جنس از ورق، شبیه‌سازی‌ها در هفت زاویه در محدوده ۳۰ تا ۹۰ درجه با اختلاف ۱۰ درجه انجام شده است. المان‌بندی پرتابه با استفاده از ۲۷۳۶ المان مکعبی مرتبه اول کاهش یافته (C3D8R) و المان‌بندی ورق ضخیم با ۲۰۹۷۰ المان مکعبی مرتبه اول کاهش یافته (C3D8R) انجام شده است. نحوه المان‌بندی ورق و پرتابه در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اندازه المان‌ها در محل

جدول ۱- پارامترهای مدل پلاستیسیته جانسون-کوک برای مواد مورد استفاده در تحلیل

متغیر	هارداکس ۵۰۰ [۲]	هارداکس ۴۵۰ [۲۲]	گلوله [۱۹]
A	۱۲۰۰ MPa	۹۸۰ MPa	۲۱۰۰ MPa
B	۱۵۸۰ MPa	۲۰۰۰ MPa	۱۷۵۰ MPa
E	۲۱۰ GPa	۲۱۰ GPa	۲۱۰ GPa
n	۰/۱۷۵	۰/۸۳	۰/۶۵
C	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۴
ϵ_0	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
$\theta_{\text{transition}}$	۳۰۰ K	۳۰۰ K	۳۰۰ K
θ_{melt}	۱۸۳۵ K	۱۸۳۵ K	۱۸۳۵ K
m	۱	۱/۴	۱

جدول ۲- پارامترهای مدل شکست جانسون-کوک برای مواد مورد استفاده در تحلیل

متغیر	هارداکس ۵۰۰ [۲]	هارداکس ۴۵۰ [۲۲]	گلوله [۱۹]
d_1	۰/۱	۰/۰۵	-۰/۸
d_2	۰/۴	۰/۸	۲/۱
d_3	-۱/۳	-۰/۴۴	-۰/۵
d_4	۰/۰۵	-۰/۰۴۶	۰/۰۰۲
d_5	۰	۰	۰/۶۱
E_0	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۱

جدول ۳- ثابت های معادله مای-گرونایزن برای مواد استفاده شده در تحلیل [۵]

پارامتر	$C_0(m/s)$	Γ_0	S
مقدار	۴۵۷۰	۱/۶۷	۱/۷۳

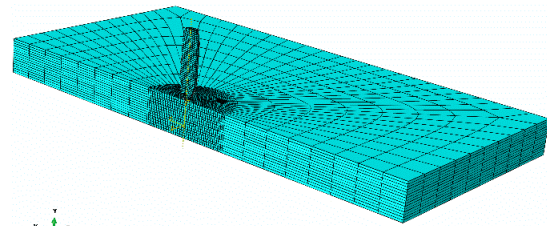
متری گلوله و ورق، به منظور محاسبه سرعت کاهش یافته به دلیل مقاومت هوا، از رابطه ۹ استفاده شده است [۲۵].

$$V_s = V_i \exp\left(\frac{-X \rho_{air} C_d \pi D^2}{8m}\right) \quad (9)$$

در رابطه ۹، V_s سرعت کاهش یافته، V_i سرعت اولیه، X فاصله، C_d ضریب مقاومت هوا، ρ_{air} چگالی هوا، D قطر گلوله و m جرم گلوله می باشند. با در نظر گرفتن V_i برابر $911 m/s$ ، X برابر $80 m$ و C_d برابر 0.4 ، ρ_{air} برابر $1225 kg/m^3$ و m برابر $63 gr$ مقدار V_i برابر $871 m/s$ خواهد بود.

۴- نتایج و بحث

شکل ۳ تصاویر برخورد در آزمایش های تجربی انجام شده روی فولاد هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰ همراه با نمای جانبی برش خورده هر دو ورق را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۳- الف و ۳- ب مشاهده می شود، سطح نفوذ گلوله در هارداکس ۴۵۰ در حدود ۳۰ میلی متر بوده، ولی نفوذ کامل صورت نگرفته است. این بدین معنی است که علی رغم نفوذ گلوله به اندازه ضخامت ورق، گلوله در انتهای مسیر فقط سبب تغییر شکل پلاستیک و ایجاد برآمدگی بدون ایجاد سوراخ در طرف دیگر ورق شده است. این نتیجه برای هر دو برخورد روی هارداکس ۴۵۰ به طور مطلوبی تکرار شده است. به علاوه میزان نفوذ در ورق هارداکس ۵۰۰، به مراتب کمتر از هارداکس ۴۵۰ است. همان طور که در شکل ۳- ج و ۳- د مشاهده می شود، میزان نفوذ پرتابه درون ورق هارداکس ۵۰۰، حدود ۱۳ میلی متر است که این مقدار نفوذ برای هر دو برخورد تقریباً یکسان است. با توجه به شکل ۳، علی رغم نفوذ پرتابه ها در ورق های هارداکس، هیچ گونه شکستی در آنها

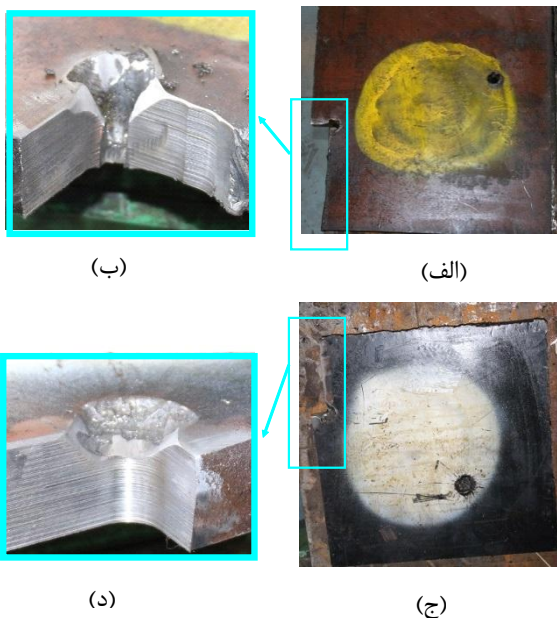


شکل ۲- نحوه المان بندی پرتابه و ورق برای تحلیل برخورد

۳- آزمایش های تجربی

آزمایش های تجربی برای تایید صحت نتایج روی ورق هایی از جنس هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰ انجام شده است. بدین منظور، گلوله کالیبر ۱۴/۵ میلی متری از فاصله ۸۰ متری با سرعت دهانه تقریبی $911 m/s$ به سمت ورق شلیک شده است. ورق های مربعی به طول ۴۰ سانتی متر و ضخامت ۳۰ میلی متر در نگهدارنده به گونه ای مقید شده است که لبه های ورق در راستای برخورد گلوله و جهت های عمود بر آن جابه جایی نداشته باشد؛ همچنین از یک فیکسچر استفاده شده است که ورق را به گونه ای ثابت می کند که جهت برخورد گلوله با سطح زمین موازی باشد. برای هر یک از ورق ها، دو مرتبه آزمایش انجام شده است و تکرار پذیری برخوردها، مورد بررسی قرار گرفت و تایید شده است. با توجه به فاصله ۸۰

می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، تغییرات انرژی جنبشی قبل از برخورد و پس از آن برای فولاد هارداکس ۵۰۰، بیشتر از میزان انرژی جنبشی جذب شده توسط فولاد هارداکس ۴۵۰ است. همچنین با توجه به اینکه پرتابه‌ای که با هارداکس ۵۰۰ برخورد کرده با سرعت بیشتری بازگشته است، لذا میزان انرژی جنبشی نهایی جذب شده توسط فولاد هارداکس ۴۵۰، بیشتر از فولاد هارداکس ۵۰۰ است. به عبارت دیگر، میزان انرژی جنبشی ورق‌ها بعد از برخورد گلوله و نفوذ آن با هم متفاوت بوده و مقدار آن برای فولاد هارداکس ۴۵۰ بیشتر است. اگر مقدار کار پلاستیک برابر با اختلاف انرژی جنبشی اولیه و ثانویه باشد، مقدار کار پلاستیک انجام شده در برخورد پرتابه با هارداکس ۴۵۰، بیشتر از هارداکس ۵۰۰ است. همچنین با توجه به شکل ۳ با وجود عمق نفوذ زیاد پرتابه در فولاد هارداکس ۴۵۰، میزان تخریب به وجود آمده در آن بیشتر از مقدار مشابه آن در برخورد گلوله با ورق هارداکس ۵۰۰ است؛ همچنین بخش اعظم انرژی برخورد پرتابه به هارداکس ۵۰۰، سبب تخریب پرتابه شده و تاثیر تخریبی کمتری بر ورق خواهد گذاشت.



شکل ۳- نتایج حاصل از اندازه گیری تجربی (الف و ب) هارداکس ۴۵۰ و (ج و د) هارداکس ۵۰۰

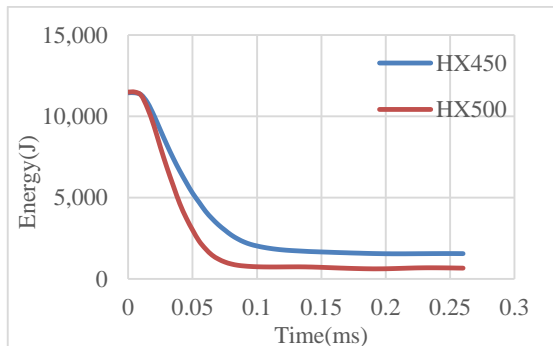
وجود ندارد و این نشان دهنده چقرمگی مطلوب این نوع ورق‌ها با وجود استحکام بسیار بالای آن‌ها است. شکل ۴ نحوه نفوذ پرتابه با زاویه ۹۰ درجه را در بازه‌های زمانی یکسان با سرعت برخورد 871m/s در دو ورق از جنس‌های هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰ مقایسه می‌کند. نفوذ پرتابه در ورق هارداکس ۴۵۰، به مراتب سریع تر اتفاق افتاده و عمق نفوذ پرتابه در هارداکس ۵۰۰، به مراتب کمتر از هارداکس ۴۵۰ است، به طوری که عمق نفوذ گلوله در هارداکس ۵۰۰، ۱۵ میلی‌متر و در هارداکس ۴۵۰، نفوذ گلوله به صورت کامل (۳۰ میلی‌متر) اتفاق افتاده است. در هر دو ورق، پرتابه بعد از نفوذ به عقب برگشته و عبوری صورت نپذیرفته است.

با توجه به استاندارد ۴۵۶۹ ناتو و سطح حفاظت ۴ که این مقاله بر مبنای آن پایه‌ریزی شده است، ورق هارداکس ۵۰۰ با ضخامت ۳۰ میلی‌متر توانایی مقابله با حملات سطح ۴ استاندارد ناتو را داشته، ولی در مقابل ورق ساخته شده از هارداکس ۴۵۰ توانایی این مقابله را نخواهد داشت. شکل ۵ تغییرات سرعت مطلق پرتابه را در حین برخورد با ورق‌های هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰ نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، سرعت پرتابه‌ای که به هارداکس ۵۰۰ برخورد کرده در زمان 0.1ms به صفر رسیده و با سرعت تقریبی 40m/s بازگشته است. در صورتی که سرعت پرتابه در برخورد با هارداکس ۴۵۰ به سمت صفر میل می‌کند. علت این تفاوت رفتار را می‌توان به اختلاف ضرایب معادلات پلاستیسیته و روابط شکست جانسون-کوک مورد استفاده در تحلیل مربوط دانست. با توجه به اختلاف استحکام تسلیم و نهایی دو ماده، ماده‌ای که استحکام بیشتری از خود نشان می‌دهد، کرنش‌های پلاستیک کمتری نیز از تجربه خواهد داد و با توجه به اینکه معیار شکست بر مبنای تجمع کرنش پلاستیک است، لذا هارداکس ۴۵۰ زودتر و بیشتر از هارداکس ۵۰۰ دچار تخریب خواهد شد. با توجه اختلاف سرعت برگشت پرتابه در هر دو حالت می‌توان دریافت که هارداکس ۵۰۰ بخشی از انرژی جنبشی پرتابه را به خودش بازگردانده است، ولی در مورد هارداکس ۴۵۰ این طور نیست.

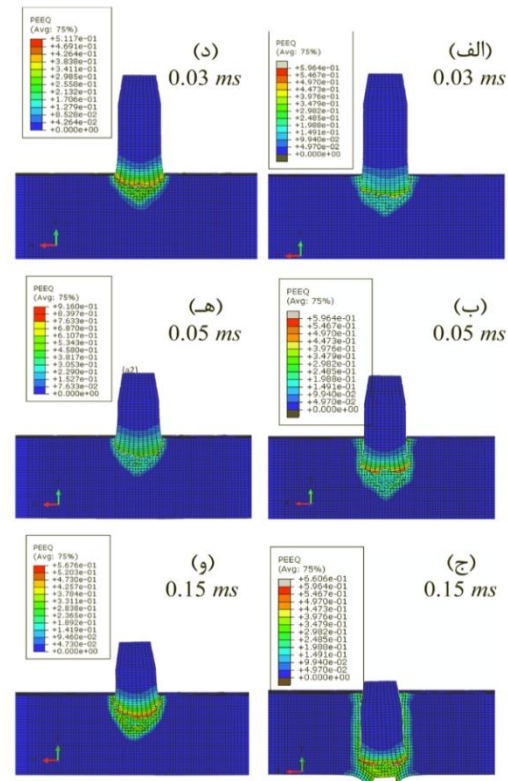
شکل ۶ تغییرات انرژی جنبشی پرتابه و ورق را برای برخورد با ورق‌های هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰ نشان

عمق نفوذ کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که با کاهش زاویه برخورد، میزان نفوذ گلوله از نفوذ کامل در حالت عمود به مقدار نفوذ ۸ میلی‌متر در زاویه ۳۰ درجه کاهش می‌یابد؛ همچنین نحوه برگشت پرتابه در چهار حالت (a-d) با برخوردهای بعدی (e-f) متفاوت است. به طوری که در چهار زاویه اول، گلوله بعد از برگشت در مسیر اولیه برخورد قرار می‌گیرد، ولی در زوایای ۳۰ و ۴۰ درجه مسیر برگشت پرتابه تقریباً با انتقال ۹۰ درجه‌ای همراه است. در این حالت باید توجه داشت که با کاهش زاویه برخورد، مولفه عمودی سرعت کاهش می‌یابد و انرژی جنبشی متناظر با سرعت عمودی نیز، با توان دوم کاهش می‌یابد. با کمتر شدن زاویه برخورد از ۴۰ درجه برای فولاد هارداکس ۴۵۰، میزان انرژی به اندازه‌ای کاهش می‌یابد که پرتابه دیگر توانایی نفوذ موثر در قطعه را ندارد و مشابه برخورد الاستیک تحت زاویه مشخص پرتابه به عقب باز می‌گردد.

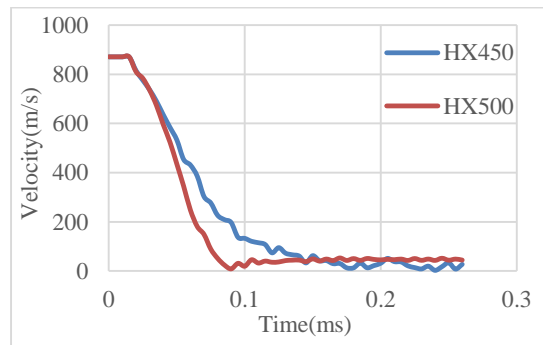
اگر زوایای که در آن برگشت گلوله در مسیر رفت خود قرار نمی‌گیرد، به عنوان زاویه انتقال در نظر گرفته شود، برای هارداکس ۴۵۰ این انتقال در زاویه ۴۰ درجه اتفاق می‌افتد. حال آنکه به دلیل چقرمگی بالاتر، در هارداکس ۵۰۰، زاویه انتقال بزرگتر است. شکل ۸ تاثیر زاویه برخورد بر عمق نفوذ و برگشت گلوله در ورق هارداکس ۵۰۰ را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، روند تغییر در میزان عمق نفوذ با تغییر زاویه برای فولاد هارداکس ۵۰۰، مشابه فولاد هارداکس ۴۵۰ است، با این تفاوت که زاویه انتقال برای فولاد هارداکس ۵۰۰، بیشتر از فولاد هارداکس ۴۵۰ است و مقدار زاویه انتقال برای برخورد پرتابه با فولاد هارداکس ۵۰۰، برابر با ۶۰ درجه است.



شکل ۶- مقایسه تغییرات انرژی جنبشی در برخورد پرتابه با هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰

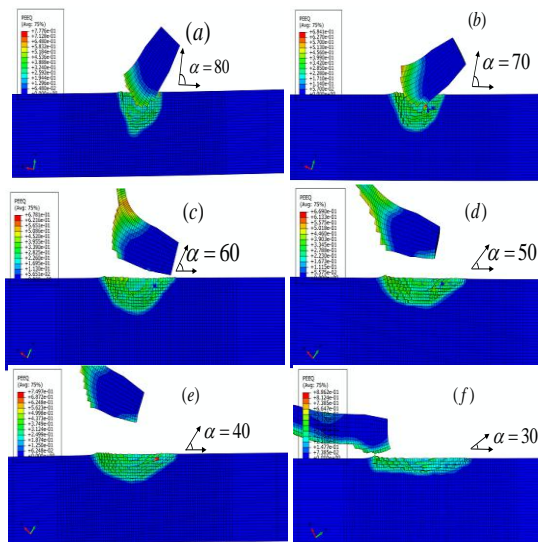


شکل ۴- مقایسه نحوه نفوذ پرتابه در ورق‌های هارداکس ۴۵۰ (الف تا ج) و هارداکس ۵۰۰ (د تا و)

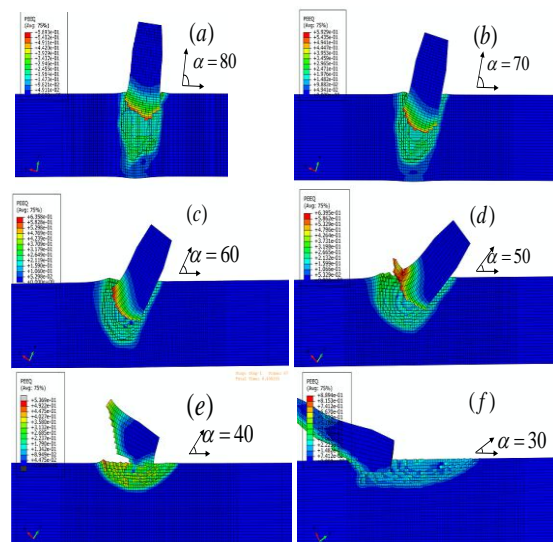


شکل ۵- تغییرات سرعت در برخورد پرتابه با ورق هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰

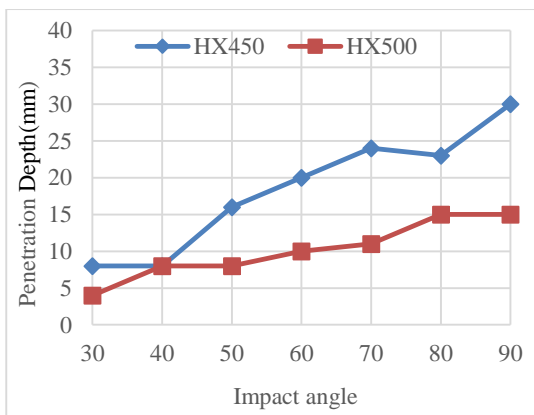
نکته مهم دیگر در بررسی مقاومت بالستیک ورق‌ها بررسی تاثیر زاویه برخورد پرتابه با مانع است. شکل ۷ تاثیر تغییرات زاویه برخورد روی عمق نفوذ، نحوه بازگشت و شکل حفره ایجاد شده برای فولاد هارداکس ۴۵۰ را نشان می‌دهد. با کاهش زاویه برخورد از حالت عمود تا ۳۰ درجه، میزان



شکل ۸- تاثیر تغییر زاویه برخورد بر عمق نفوذ پرتابه در فولاد هارداکس ۵۰۰



شکل ۷- تاثیر تغییر زاویه برخورد بر عمق نفوذ پرتابه در فولاد هارداکس ۴۵۰



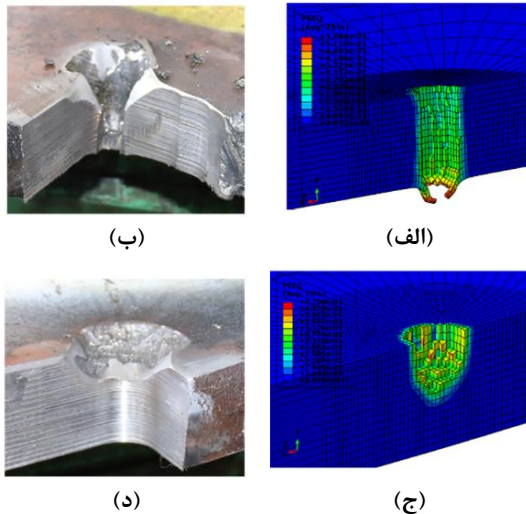
شکل ۹- مقایسه تغییرات عمق نفوذ پرتابه بر حسب زاویه برای هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰ در سرعت برخورد کاهش یافته ۸۷۱ m/s

هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، برای فولاد هارداکس ۵۰۰ تا حدود سرعت ۲۰۰ m/s پرتابه هیچ نفوذی درون ورق نخواهد داشت ولی با افزایش سرعت پرتابه، میزان نفوذ افزایش یافته به گونه‌ای که در سرعت ۹۱۱ m/s، میزان نفوذ به حدود ۱۸ میلی‌متر خواهد رسید و با توجه به شرایط پذیرش برای استاندارد ۴۵۶۹ ناتو برای سطح حفاظت ۴ که عدم نفوذ کامل گلوله را در این سرعت خواستار شده است،

شکل ۹ رابطه زاویه برخورد پرتابه با میزان نفوذ آن برای هر دو ورق هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰ در سرعت ۸۷۱ m/s را نشان می‌دهد که سرعت کاهش یافته در اثر مقاومت هوا، مطابق رابطه ۹ است. با مقایسه هر دو نمودار می‌توان دریافت که تغییرات عمق نفوذ به ازای تغییر زاویه برای فولاد هارداکس ۵۰۰، به مراتب کمتر از فولاد هارداکس ۴۵۰ است؛ به طوری که اختلاف میزان نفوذ در کمترین و بیشترین زاویه برای فولاد هارداکس ۴۵۰، ۲۲ میلی‌متر و برای فولاد هارداکس ۵۰۰، ۱۰ میلی‌متر است. در زاویه برخورد یکسان ۴۰ درجه، عمق نفوذ گلوله در دو نوع هدف مختلف، تقریباً یکسان است، با توجه به اینکه زاویه انتقال برای فولاد هارداکس ۴۵۰ براساس نتایج شکل ۷ برابر با ۴۰ درجه است، در این زاویه میزان نفوذ واقعی باید بیشتر از ۸ میلی‌متر باشد، ولی به دلیل کاهش انرژی پرتابه و عدم توانایی نفوذ مناسب، میزان نفوذ کمتر از مقدار مورد انتظار است.

با توجه به اینکه مقاومت بالستیک ورق هارداکس ۵۰۰ به نسبت ورق هارداکس ۴۵۰ بیشتر است و به منظور محاسبه حد بالستیک هر دو ورق فولادی، شبیه‌سازی اجزاء محدود برای سرعت های برخورد مختلف از ۲۰۰ m/s تا ۱۲۰۰ m/s و زاویه برخورد عمودی انجام پذیرفت. اثر سرعت پرتابه بر روی میزان نفوذ برای هر دو نوع فولاد

دو حالت آزمایش‌های تجربی و مدل‌سازی عددی، گلوله پس از برخورد به سمت عقب برگشته است که سرعت بازگشت برای گلوله‌ای که به ورق هارداکس ۵۰۰ برخورد کرده، بیشتر می‌باشد. این روند مشابه پیش‌بینی شبیه‌سازی اجزای محدود نشان داده شده در شکل ۵ است.



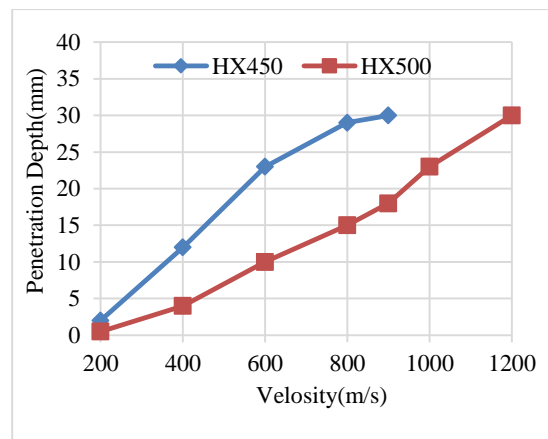
شکل ۱۱- مقایسه عمق نفوذ گلوله در نتایج تحلیل اجزای محدود و نتایج آزمایش‌های عملی (الف و ب) فولاد هارداکس ۴۵۰ و (ج و د) فولاد هارداکس ۵۰۰

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به شبیه‌سازی اجزای محدود برخورد گلوله کالیبر ۱۴/۵ میلی‌متری با ورق‌های فولاد فوق مستحکم فولاد هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰ با ضخامت ۳۰ میلی‌متر با رعایت الزامات استاندارد ۴۵۶۹ ناتو پرداخته شد. با توجه به پیچیدگی پدیده برخورد و به منظور شبیه‌سازی دقیق فرآیند، از مدل پلاستیسیته و شکست جانسون-کوک و معادله حالت مای-گرونایزن برای مدل‌سازی دقیق رفتار مواد استفاده گردید. مهمترین نتایج حاصل از این مقاله به شرح زیر است.

- انطباق نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایش‌های تجربی، استفاده از روش اجزای محدود را برای پیش‌بینی میزان نفوذ پرتابه در ورق‌های هارداکس ۵۰۰ و هارداکس ۴۵۰ را تایید می‌کند.
- با توجه به شرایط تعیین شده در استاندارد، فولاد هارداکس ۵۰۰ با ضخامت ۳۰ میلی‌متر با ضریب

این ماده در ضخامت مورد نظر پذیرش شرایط استاندارد واقع شده است. با افزایش سرعت تا ۱۲۰۰ m/s گلوله به حد بالستیک ورق رسیده و پرتابه به صورت کامل درون ورق نفوذ خواهد کرد؛ به گونه‌ای که سوراخی در آن ایجاد شده، ولی گلوله از آن عبور نکرده است. تحلیل‌های انجام شده روی فولاد هارداکس ۴۵۰ نشان می‌دهد که حد بالستیک این ماده زودتر ظاهر خواهد شد. به گونه‌ای که در حدود سرعت ۹۰۰ m/s گلوله به طور کامل در ورق نفوذ خواهد کرد، ولی از آن عبور نمی‌کند.



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات میزان عمق نفوذ گلوله درون ورق‌های هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰ به صورت تابعی از سرعت برخورد

شکل ۱۱ عمق نفوذ پرتابه را در ورق‌های هارداکس ۴۵۰ و هارداکس ۵۰۰ برای مدل‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انطباق خوبی میان نتایج حاصله وجود دارد، به گونه‌ای که میزان عمق نفوذ برای فولاد هارداکس ۵۰۰ در آزمایش تجربی، ۱۳ میلی‌متر و با استفاده از مدل المان محدود، ۱۵ میلی‌متر است. همچنین برای فولاد هارداکس ۴۵۰ در هر دو حالت نفوذ کامل پیش‌بینی شده است. به علاوه تغییر شکل انتهایی هنگام خروج گلوله برای فولاد هارداکس ۴۵۰ در شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی مشهود است. به طور کلی در هر دو مقایسه میزان نفوذ پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی اجزای محدود، اندکی بیشتر از آزمایش عملی است. یکی از دلایل این اختلاف، تفاوت در ضریب اصطکاک در اندازه‌گیری تجربی و شبیه‌سازی عددی است [۵]. در هر

[8] Gopalakrishnan S, Senthil V (2011) Failure analysis of ballistic material. *Int Conf Adv Mater Eng (ICAME 2011)* 15: 95-100.

[9] Hub J, Kneys P (2013) 3D simulation analysis of aircraft protection material impacting by 7.62 mm ammunition. *Univ Rev* 7(3): 15-19.

[10] Roudbeneh FH, Liaghat GH, Sabouri H, Hadavinia H (2016) Investigation of interaction between aluminum facing and honeycomb structure in quasi-static and impact loading. *Modares Mech Eng* 16(7): 23-31. (in Persian)

[11] Diederer AM, Broos JPF, Van Trigt SN (2001) Ballistic protection against armour piercing projectiles using titanium base armour. *Cost Eff Appl Titan Alloy Mil Platforms* 99: 7-11.

[12] Shanazari H, Liaghat GH, Feli S, Hadavinia H (2017) Analytical and experimental study of high-velocity impact on ceramic / nanocomposite targets. *Modares Mech Eng* 51(27): 3743-3756.

[13] Jalili I, Nouri ZH, Aabady AZ, Akbari KV (2013) Strengthening the composite protective shield of lightweight ship against ballistic impacts: analytical and experimental. *Lat Am J Solids Struct* 10(6): 1211-1223.

[14] Preece DS, Berg VS (2004) Bullet impact on steel and Kevlar / steel armor - computer modeling and experimental data. *ASME Press Vessel Pip Conf - Symp Struct Under Extrem Loading* 25-29.

[15] Masoudi A, Liaghat GH, Pol MH (2014) Effects of nanoclay on the ballistic behavior of GLARE - experimental and numerical investigation. *Modares Mech Eng* 14(7): 43-51. (in Persian)

[16] Komasi M, Goodarzi M, Chalabi J (2017) Numerical simulation of ultra high performance fibre reinforced concrete panels subjected to underwater blast loading. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 7(3): 149-163. (in Persian)

[17] Niknejad A, Zareei A (2016) Ballistic limit velocity of empty rectangular metal columns under a blunt projectile penetration. *J Def Model Sim* 13: 119-131.

[18] Gailly BA, Espinosa HD (2002) Modelling of failure mode transition in ballistic penetration with a continuum model describing microcracking and flow of pulverized media. *Int J Numer Methods Eng* 54(3): 365-398.

[19] Deniz T (2013) Ballistic penetration of hardened steel plates. M.Sc. Thesis, Middle East Technical University.

[20] Hub J, Komenda J (2009) Ballistic resistance of steel plate hardox upon impact of non-penetrating projectiles. *Adv Mil Technol* 4(2): 79-91.

[21] Børvik T, Dey S, Clausen AH (2009) Perforation resistance of five different high-strength steel plates

اطمینان بالایی در برابر نفوذ کامل گلوله مقاومت می-کند؛ به طوری که در بدترین شرایط یعنی زاویه برخورد ۹۰، بیشترین عمق نفوذ به ۱۵ میلی‌متر می‌رسد.

- در شرایط یکسان گلوله ۱۴/۵ میلی‌متری به طور کامل در فولاد هارداکس ۴۵۰ نفوذ کرده و با وجود عدم عبور از آن طبق استاندارد این ضخامت برای این ورق مورد پذیرش نیست.
- با کاهش زاویه برخورد از حالت عمود تا ۳۰ درجه، میزان نفوذ گلوله در عمق برای هر دو جنس کاهش می‌یابد، ولی میزان این تغییرات برای هارداکس ۴۵۰ بیشتر است.
- زاویه انتقال برای فولاد هارداکس ۴۵۰، برابر با ۴۰ درجه و برای فولاد هارداکس ۵۰۰ برابر با ۶۰ درجه است.
- حد بالستیک ورق ساخته شده از فولاد هارداکس ۵۰۰ با ضخامت ۳۰ میلی‌متر، حدود ۱۲۰۰ m/s و برای فولاد هارداکس ۴۵۰، حدود ۹۰۰ m/s است.

۵- مراجع

[1] Sánchez Gálvez V, Sánchez Paradela L (2009) Analysis of failure of add-on armour for vehicle protection against ballistic impact. *Eng Fail Anal* 16(6): 1837-1845.

[2] Kiliç N, Ekici B (2013) Ballistic resistance of high hardness armor steels against 7.62 mm armor piercing ammunition. *Mater Des* 44: 35-48.

[3] Liaghat GH, Malekzadeh A (1999) A modification to the mathematical model of perforation by Dikshit and Sundararajan. *Int J Impact Eng* 22(5): 543-550.

[4] Seifoori S, Liaghat GH (2011) A semianalytical and numerical study of penetration and perforation of an ogive-nose projectile into concrete targets under normal impact. *Proc. Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci* 225(8): 1782-1797.

[5] Kiliç N, Bedir S, Erdik A, Ekici B, Taşdemirci A, Güden M (2014) Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62mm armor piercing projectile. *Mater Des* 63: 427-438.

[6] Ambrosini JF (2015) Simulation of ballistic impacts in steel plates. Polytechnic University of Catalonia - UPC, M.Sc. Thesis.

[7] Bidi A, Liaghat GH, Rahimi GH, Hadavinia H (2018) Experimental and numerical analysis of impact on curved nanocomposite panels. *Mech Adv Mater Struc* 2(4).

- [24] Sun WH, Ju GL, Yang BQ (2014) Numerical simulations of the perforation in metal plates with different conical-nosed projectiles. *Appl Mech Mater* 518: 47-52.
- [25] Nato (2011) Procedures for evaluating the protection level of armoured vehicles volume 1: kinetic energy and artillery threat.
- subjected to small-arms projectiles *Int J Impact Eng* 36: 948-964.
- [22] Banerjee A, Dhar S, Acharyya S, Datta D, Nayak N (2015) Determination of Johnson-Cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel. *Mater Sci Eng A* 640: 200-209.
- [23] CAE User manual (2013) Abaqus 6.13, Analysis User Guide.