



ارائه یک مدل اصلاحی و بررسی تحلیلی نفوذ پرتابه در اهداف نیمه بی‌نهایت سرامیک - فلز

مصطفی سیاح بادخور^۱، خداداد واحدی^{۲*} و علیرضا نداف اسکویی^۳^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)^۲ استاد، عضو هیات علمی دانشگاه جامع امام حسین (ع)^۳ دانشیار، عضو هیات علمی دانشگاه جامع امام حسین (ع)

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۲/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰

چکیده

امروزه در مکانیک ضربه، سرامیک به علت چگالی پایین و سختی بالا به‌طور وسیعی در ساخت هدف‌های ضدگلوله، مورد استفاده قرار گرفته و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله به ارائه یک مدل تحلیلی اصلاحی جدید و کامل در اهداف نیمه بی‌نهایت سرامیک - فلز، بر اساس مدل تحلیلی فلوز پرداخته شده است که یکی از مدل‌های مهم و اساسی در زمینه نفوذ هست. مدل تحلیلی جدید شامل، اصلاحاتی از جمله در نظر گرفتن تغییرات سرعت پرتابه در هر بازه زمانی، محاسبه مدت‌زمان تشکیل مخروط سرامیکی، تغییر نیم زاویه شکست مخروط سرامیکی، تغییر مقاومت فشاری سرامیک در طول فرآیند نفوذ، محاسبه کاهش جرم سرامیک بر اساس زمان تشکیل مخروط سرامیکی، کاهش طول پرتابه وابسته به تغییرات سرعت پرتابه و سرامیک در هر بازه زمانی و محاسبه کاهش جرم پشتیبان است. فلوجارتی از مراحل تعیین عمق نفوذ نیز با توجه به اصلاحات مدل تحلیلی جدید و رفع ابهامات مدل فلوز ارائه شده است. نتایج مربوط به مدل تحلیلی جدید با نتایج مدل‌های تحلیلی فلوز و وودوارد و آزمایش‌های تجربی مقایسه شده است. این نتایج ضمن بهبود پیش‌بینی‌های مدل فلوز در تعیین عمق نفوذ در سرعت‌های پایین، با داده‌های تجربی نیز، مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: نفوذ؛ اهداف نیمه بی‌نهایت؛ اهداف سرامیک؛ مدل تحلیلی جدید؛ مدل فلوز.

Presenting a Modified Theory and Analytical Investigation of Projectile Penetration into Ceramic - Metal Semi-Infinite Targets

Mostafa Sayah Badkhor¹, Khodadad Vahedi^{2,*}, Alireza Naddaf Oskouei³¹ Ph.D. Candidate, Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.² Prof., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.³ Assoc. Prof., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

Abstract

Nowadays, in impact mechanics, ceramic is especially important. It is used to produce bullet-proof targets due to its low density and high hardness. In this article, we presented a new and complete modified analytical model for semi-infinite ceramic-metal targets, based on the Fellows analytical model, which is one of the most important models in the field of penetration. The new analytical model includes modifications such as considering the variations in the projectile's velocity at each time interval, the calculation of the ceramic cone formation time, the change in the half-angle of the ceramic cone, the change in the compression strength of the ceramic during the penetration process, the calculation of the ceramic mass reduction based on the time of the formation of the ceramic cone, the decrease in the projectile's length depends on the variation in the projectile and ceramic velocity at each time interval and the calculation of the suppression mass reduction. In addition, flowchart of determining the depth of penetration process, regarding to the modifications of the new analytical model and the clarification of the Fellows model ambiguous, was presented. The results of the new analytical model have been compared with the results of the Fellows and Woodward analytical models and experimental data. These results improve the predictions of the Fellows model in determining the penetration depth at low velocities and also have good agreement with experimental data.

Keywords: Penetration; Semi-Infinite Targets; Ceramic Targets; New Analytical Model; Fellows Model.

۱- مقدمه

مکانیک ضربه با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه فناوری، در سال‌های اخیر بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است. با افزایش سرعت پردازش داده‌ها در کامپیوترها، پیشرفت‌ها در زمینه نفوذ نیز، سرعت بیشتری به خود گرفته است. پایه و اساس هر علمی در مهندسی به بررسی‌های تحلیلی مربوط است. با داشتن روابط تحلیلی مناسب، امکان داشتن شبیه‌سازی‌های دقیق‌تر و کامل‌تر، از فرآیند نفوذ پرتابه در اهداف خواهیم داشت.

در سال ۱۹۶۷، فلورنس^۱ و اهرنز^۲ [۱]، تقابل بین پرتابه زره‌های کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند. آنها کار خود را در دو حوزه تحلیلی و تجربی انجام دادند. تمرکز فلورنس و اهرنز روی مکانیسم تقابل بین پرتابه سخت (فولاد) و سطح هدف (سرامیک با لایه پشتیبان نرم) بود. آنها آنالیز تحلیلی خود را بر اساس تئوری الاستیسیته، جهت تخمین میدان تنش در سطح هدف در طی مراحل اولیه ضربه و تعیین تغییر شکل‌ها و ممان‌های خمشی در طی مراحل بعدی، انجام دادند. در سال ۱۹۶۷، تیت^۳ [۲]، نظریه‌ای برای کاهش سرعت میله‌های بلند بعد از ضربه ارائه داد. او از تئوری هیدرودینامیکی اصلاح شده استفاده کرد که در آن بعضی از اثرات مقاومت مواد برای پیش‌بینی کاهش سرعت میله‌های بلند در نظر گرفته شده است. در سال ۱۹۷۸ ویلکینز^۴ [۳]، بیان کرد که در اثر برخورد پرتابه به هدف مکانیسم‌های تغییر شکل مختلفی اتفاق می‌افتد. او این تغییر شکل‌ها را به‌وسیله شبیه‌سازی عددی و مقایسه با نتایج تجربی نشان داد. در همین سال، بکمن^۵ و گلداسمیث^۶ [۴]، در رابطه با بخش پایانی حرکت پرتابه و برخورد به هدف و مکانیک نفوذ در نقطه تقابل پرتابه و هدف نظریه‌ای ارائه کردند. آنها یک دسته‌بندی از اهداف به‌صورت نیمه بی‌نهایت، ضخیم، متوسط و نازک انجام دادند. بکمن و گلداسمیث، نفوذ کامل و کمانه کردن را بیان کردند. در سال ۱۹۸۸، روزنبرگ^۷ و یشورون^۸

[۵]، رابطه بین اثرات بالستیک و مقاومت فشاری اهداف سرامیکی را بررسی کردند. آنها در آزمایش‌های خود از یک صفحه پشتیبان ضخیم استفاده کردند که یک روش تجربی جدید برای محاسبه اثرات بالستیک سرامیک است. آنها نشان دادند که همراه با افزایش پارامتر مقاومت مؤثر که از تقسیم مقاومت فشاری دینامیکی و استاتیکی بر چگالی سرامیک به دست می‌آید، اثرات بالستیک سرامیک نیز افزایش می‌یابد. در سال ۱۹۹۰، وودوارد^۹ [۶]، توسعه ساده‌ای از مدل‌های مربوط به نفوذ کامل در اهداف زرهی کامپوزیتی سرامیک انجام داد. او فرآیندهای فیزیکی ضروری را مشخص و وابستگی مقاومت بالستیک روی خواص فیزیکی و پارامترهای ضربه را بیان کرد. وودوارد، مهم‌ترین ویژگی‌های شکست زره سرامیک کامپوزیت را با انباشت جرم ترکیب کرد تا به‌شتاب مواد مربوط شود، بدین ترتیب منجر به تولید مدل‌های ساده‌ای که اجازه محاسبات روی اهداف سرامیکی با پشتیبان‌های فلزی نازک را می‌دهد، شد. در سال ۱۹۹۱، دن ریجر^{۱۰} [۷]، در پایان‌نامه خود توسعه مستقلی از آنالیزهای راوید^{۱۱} و همکاران و وودوارد انجام داد. اساس کار او بر مبنای جرم انباشته بود. در سال ۱۹۹۷، زائرا^{۱۲} و گالوز^{۱۳} [۸]، یک مدل تحلیلی از ضربه بالستیک قائم و مایل روی زره‌های سبک سرامیک - فلز ارائه کردند. این مدل بر اساس معادله الکسیوسکی^{۱۴} و تیت برای نفوذ پرتابه به داخل سرامیک است؛ درحالی‌که حل مربوط به فلز پشتیبان بر اساس ایده مدل‌های وودوارد و دن ریجر است. مدل آنها، نفوذ در سرامیک را با دقت خوبی نشان می‌دهد. در سال ۱۹۹۸، چوکرون^{۱۵} و گالوز [۹]، یک مدل کاملاً تحلیلی و خیلی ساده یک‌بعدی از ضربه بالستیک به داخل اهداف زرهی سرامیک - کامپوزیت ارائه کردند. این مدل، هم به‌وسیله آزمایش‌های بالستیک و هم شبیه‌سازی عددی، مورد ارزیابی قرار گرفت و تطبیق خوبی را نشان داد. این مدل امکان محاسبه سرعت باقیمانده، جرم باقیمانده، سرعت پرتابه، تغییر شکل و کرنش فلز پشتیبان را

⁹ Woodward¹⁰ Den Reijer¹¹ Ravid¹² Zaera¹³ Galvez¹⁴ Alekseevskii¹⁵ Chocron¹ Florence² Ahrens³ Tate⁴ Wilkins⁵ Backman⁶ Goldsmith⁷ Rosenberg⁸ Yeshurun

ضربه پرداختند. ضمن انجام آزمایش‌های تجربی با شبیه‌سازی عددی هم تأثیر پارامترهای مختلف را بررسی کردند [۱۷ و ۱۸]. در سال ۲۰۱۶ لیاقت و همکارانش، به بررسی تحلیلی و تجربی ضربه سرعت بالا در اهداف ترکیبی سرامیک - نانو کامپوزیت پرداختند. آنها از تئوری انبساط حفره استفاده و زاویه تشکیل مخروط سرامیکی را نیز اصلاح کردند. مدل تحلیلی آنها به‌خوبی فرآیند نفوذ را پیش‌بینی کرده بود [۱۹]. در سال ۲۰۱۶ بابایی و همکارانش، به بررسی تغییر شکل ورق‌های مستطیلی تحت بار ضربه‌ای پرداختند. آنها یک تابع صریح برای داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از روش تجزیه مقادیر منفرد، بر اساس پارامترهای بی‌بعد و طراحی و مدل‌سازی چند هدفی سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک ارائه کردند [۲۰]. در سال ۲۰۱۷ بابایی و همکارانش، به بررسی تجربی و تحلیلی نفوذ پرتابه کروی صلب در صفحات با تغییر شکل‌های زیاد پرداختند [۲۱]. آنها در همان سال در کاری جداگانه نیز، به ارائه یک مدل بدون بعد برای مدل تحلیلی خود پرداختند و مدلی جدید برای نفوذ پرتابه در صفحات با تغییر شکل‌های زیاد ارائه کردند [۲۲]. در سال ۲۰۱۷ حاتمی و همکارانش، به ارائه یک مدل تحلیلی برای جذب انرژی در لوله‌های فلزی تحت بارگذاری ضربه‌ای پرداختند. مدل آنها نمودار نیرو - جابجایی را در طول بارگذاری دینامیکی به‌خوبی پیش‌بینی می‌کرد [۲۳]. در همین سال جهرمی و همکارش، به بررسی اثر افزایش تعداد لایه‌ها در لوله‌های فلز در میزان جذب انرژی در اثر بارگذاری ضربه پرداختند [۲۴]. در سال ۲۰۱۸، محمد نجفی و همکاران، به بررسی عددی و تجربی نفوذ گلوله زرهی در اهداف فولادی فوق مستحکم پرداختند. آنها بررسی خود را در زوایای مختلف برخورد انجام دادند [۲۵]. حاتمی و همکارانش در سال ۲۰۱۹، به بررسی نفوذ کامل اهداف آلومینیومی نازک تحت ضربه سرعت‌بالا توسط پرتابه‌های کروی آلومینیومی پرداختند. آنها قطرهای مختلف پرتابه، ضخامت‌های مختلف هدف و محدوده گسترده‌ای از سرعت‌ها را در نظر گرفتند و یک مدل بی‌بعد نیز ارائه کردند [۲۶].

در این مقاله به اصلاح مدل فلوز که مربوط به نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی نیمه بی‌نهایت سرامیک - فلز است، پرداخته شده است. این مدل بر اساس روش جرم خردشده با

می‌دهد. توسعه این مدل بر اساس مطالعه ضربه در نخ، پارچه و درنهایت کامپوزیت است. در سال ۱۹۹۹، فلوز^۱ و بارتن^۲ [۱۰]، مدلی را جهت پیش‌بینی نفوذ پرتابه به داخل زره‌های نیمه بی‌نهایت سرامیکی ارائه کردند. این مدل مطالعه خواص مواد و تغییر شکل زره در اثر نفوذ را سهولت می‌بخشد.

بیشتر مدل‌هایی که بعد از سال ۲۰۰۰ ارائه شدند، مربوط به تغییر فرض‌های مدل‌های تحلیلی قبلی و بهبود تخمین عمق نفوذ، روش‌های جدید آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی است. در سال ۲۰۰۱ هوهرل^۳ و همکارانش، به مقایسه تجربی نفوذ مایل و قائم در اهداف ترکیبی سرامیک - فلز پرداختند [۱۱]. در سال ۲۰۰۴ فاووز^۴ و همکارانش، به بررسی مدل‌های المان محدود نفوذ قائم و مایل در اهداف ترکیبی سرامیک - فلز پرداختند [۱۲]. در سال ۲۰۰۷ روزنبرگ و همکارانش، به بررسی پدیده کمناش در برخورد پرتابه در اهداف فولادی پرداختند و مدلی تحلیلی را به دست آوردند، سپس با شبیه‌سازی عددی نیز، زاویه کمناش را تعیین کردند [۱۳]. در سال ۲۰۰۸، شکریه و جوادپور، به بررسی نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی سرامیک - کولار پرداختند. آنها سرعت حد بالستیک و ضخامت بهینه هدف را تعیین کردند [۱۴]. در سال ۲۰۱۴، خدادادی و همکارانش، به بررسی تجربی و عددی نفوذ در پارچه‌های کولار پرداختند. آنها عواملی از قبیل، خواص ماده، هندسه پرتابه، شرایط مرزی، ابعاد پارچه، تعداد لایه‌های پارچه و اصطکاک را مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. در سال ۲۰۱۵، لیاقت و همکارانش، به اصلاح مدل تحلیلی وودوارد در اهداف سرامیک - فلز پرداختند. آنها اصلاحاتی از جمله تغییر نیم زاویه شکست مخروط سرامیکی، سایش، قارچی شدن و صلبیت پرتابه و تغییرات مقاومت فشاری سرامیک در طول فرایند نفوذ تحت عنوان خرابی را در نظر گرفتند [۱۶]. در سال ۲۰۱۵ از جمله کارهایی که در ارتباط با بار ضربه‌ای انجام شد، توسط حاتمی و همکارانش بود. آنها در دو مقاله جداگانه به بررسی میزان جذب انرژی در استوانه‌ها در اثر بار

¹ Fellows

² Barton

³ Hohler

⁴ Fawaz

$$\Delta M_P = (\dot{X}_P - \dot{X}_{CF}) \Delta t \rho_P A_0 \quad (۳)$$

$$\Delta M_C = (\dot{X}_{CF} - \dot{X}_C) \Delta t \rho_C A_0 \quad (۴)$$

$$F_C = \sigma_{CES} A_0 \quad (۵)$$

$$F_P = \sigma_{PES} A_0 \quad (۶)$$

$$\dot{X}_{CF} = \dot{X}_{CE} + \dot{X}_C \quad (۷)$$

این روابط نیروی تقابل بین بخش‌های مختلف هدف و سرامیک را بعد از برخورد، مطابق شکل ۱ بیان می‌کند. در واقع هرکدام از قسمت‌ها مثلاً سرامیک به سه بخش تقسیم می‌شود. بخش جلوی سرامیک، سرامیک و پشت سرامیک. هرکدام از این بخش با قسمت‌های بعدی و قبلی خود که در تماس هستند، نیروهای عمل و عکس‌العمل دارند. روابط ۱ تا ۷ مربوط به نیروهای متقابل برای پرتابه با سرامیک و سرامیک با خودش است. جرم کاهش یافته پرتابه و جرم کاهش یافته سرامیک نیز، در این روابط محاسبه می‌شود.

این نیروی تقابل به شرایط پرتابه بعد از برخورد بستگی دارد که در شکل ۲ این شرایط نشان داده شده است.

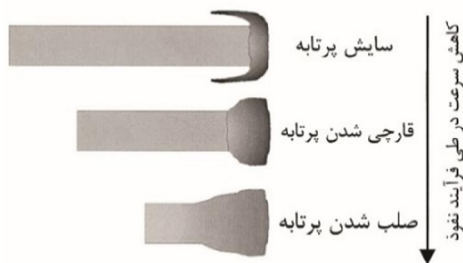
با در نظر گرفتن این شرایط و ترکیب معادلات، سرعت جلوی سرامیک تعیین خواهد شد. شتاب سرامیک و سرعت آن تحت تأثیر نیروهایی است که بر سرامیک اعمال می‌شود:

$$F_C - F_{C2} = M_C \ddot{X}_C \quad (۷)$$

$$F_{C2} = \sigma_{CES} A_1 \quad (۸)$$

$$\dot{X}_C = \dot{X}_{OC} \quad (۹)$$

معادلات مربوط به تقابل بین ماده پشتیبان و سرامیک، مشابه معادلات مربوط به تقابل پرتابه و سرامیک است.



شکل ۲- رفتار پرتابه در طول برخورد نسبت به کاهش سرعت

[۱۰]

در نظر گرفتن خواص مواد و تغییرات شکل هدف و پرتابه هنگام نفوذ ارائه شده است. با دستیابی به یک مدل تحلیلی کامل می‌توان از هزینه‌های زیاد انجام آزمایش‌های تجربی و زمان‌های طولانی شبیه‌سازی عددی جلوگیری کرد و نتایج مطلوبی به دست آورد.

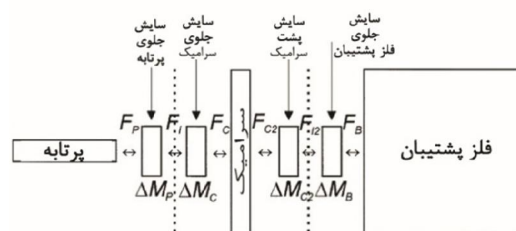
۲- مدل تحلیلی فلوز

مدل فلوز یکی از پیچیده‌ترین و مهم‌ترین مدل‌های تحلیلی مربوط به نفوذ پرتابه در اهداف نیمه بی‌نهایت سرامیک - فلز است. این مدل بیشترین جنبه‌ها و شرایط مربوط به نفوذ پرتابه در هدف را در نظر می‌گیرد. در این مدل با استفاده از خواص مواد و در نظر گرفتن تغییرات پرتابه و هدف در طی نفوذ، عمق نفوذ را پیش‌بینی می‌کند. در ادامه ضمن بیان برخی از روابط این مدل، فلوجارتی از مراحل حل و تعیین عمق نفوذ آمده است. فلوز برای تعیین عمق نفوذ دو مرحله در نظر گرفته است: نفوذ اولیه و نفوذ ثانویه. بخش اصلی نفوذ پرتابه در هدف، مربوط به مرحله نفوذ اولیه است. در شکل ۱، مدل تحلیلی مربوط به جرم‌های خردشده و نیروهای متقابل بین پرتابه، سطح پرتابه سائیده شده، سطح جلوی سرامیک سائیده شده، سرامیک، سطح پشتی سرامیک سائیده شده، سطح پشتیبان سائیده شده و پشتیبان نشان داده شده است [۱۰].

در مدل فلوز نیروی تقابل بین پرتابه و سرامیک از روابط (۷-۱) به دست می‌آید:

$$F_P = -M_P \ddot{X}_P \quad (۱)$$

$$F_I - F_C = \frac{\Delta M_C \ddot{X}_{CF}}{\Delta t} \quad (۲)$$



شکل ۱- نمایش نیروهای تقابل بین پرتابه، سرامیک و

پشتیبان [۱۰]

شده است و نمودار جدیدی بر اساس مدل اصلاح شده ارائه گردیده است.

۳- مدل تحلیلی جدید (اصلاحات انجام شده در مدل فلوز)

آنچه فلوز در مدل خود ارائه کرده، روابط کلی از هر قسمت نفوذ پرتابه در هدف است. به منظور بهبود مدل تحلیلی فلوز، اصلاحاتی انجام شده که در این بخش به بیان آنها پرداخته شده است. فرضیات این مدل عبارتند از:

$$F_{I2} - F_B = \frac{\Delta M_B \dot{X}_{BF}}{\Delta t} \quad (10)$$

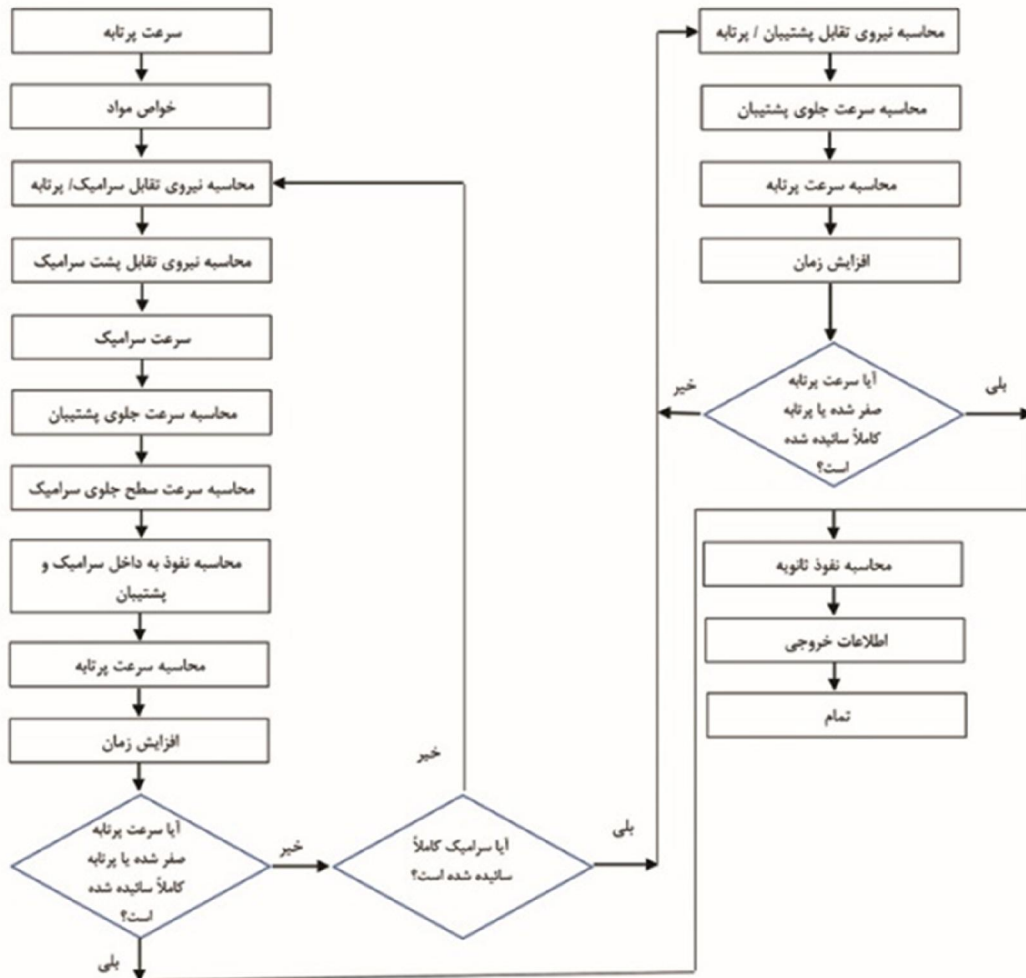
$$\Delta M_{C2} = (\dot{X}_C - \dot{X}_{BF}) \Delta t \rho_C A_1 \quad (11)$$

$$\Delta M_B = (\dot{X}_{BF} - \dot{X}_B) \Delta t \rho_B A_1 \quad (12)$$

$$\dot{X}_{BF} = \dot{X}_{BE} + \dot{X}_B \quad (13)$$

$$F_B = \sigma_{BES} A_1 \quad (14)$$

در شکل ۳ نمودار مربوط به مدل تحلیلی فلوز نشان داده شده است. به علت آنکه جزئیات در حل مدل فلوز بیان نشده است، به دست آوردن مقادیر به دست آمده توسط فلوز در مدل تحلیلی فرآیند بسیار پیچیده‌ای است. در ادامه به اصلاح مدل فلوز با توجه به جزئیات هر قسمت از مدل تحلیلی پرداخته



شکل ۳- نمودار مدل تحلیلی فلوز [۱۰]

۳-۲- اصلاح نیم زاویه تشکیل مخروط سرامیکی

بعد از برخورد پرتابه به سرامیک، مخروط سرامیکی تشکیل می‌شود. این مخروط تا زمان سایش کامل آن به همراه پرتابه به داخل فلز پشتیبان نفوذ می‌کند؛ بنابراین اصلاح نیم زاویه تشکیل این مخروط در مقدار عمق نفوذ از زمان تشکیل آن تا فرسایش کامل آن مؤثر است. در مدل فلوز زاویه تشکیل مخروط سرامیکی ثابت در نظر گرفته شده است. این زاویه برحسب رادیان برای پرتابه با سرعت کمتر از ۱۰۰۰ متر بر ثانیه از رابطه (۲۰) به دست می‌آید:

$$\varphi = \left(\frac{\dot{X}_P - 220}{780} \right) \frac{34\pi}{180} + \frac{34\pi}{180} \quad (20)$$

فلوز بیان می‌کند که تغییرات φ به صورت خطی بین ۳۴ تا ۶۸ درجه برای سرعت‌های ۲۲۰ تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه تغییر می‌کند و برای سرعت‌های بالاتر از ۱۰۰۰ متر بر ثانیه برابر ۶۸ درجه است.



شکل ۴- تغییر نیم زاویه شکست مخروطی در سرعت‌های مختلف

زاویه تشکیل مخروط سرامیکی با سرعت برخورد پرتابه، ضخامت سرامیک و زمان تشکیل مخروط سرامیکی، تغییر می‌کند. تشکیل مخروط سرامیکی در فرآیند نفوذ، بسیار مؤثر است؛ بنابراین تعیین نیم زاویه تشکیل این مخروط و سطح مقطع انتهایی آن در مقدار عمق نهایی نفوذ تأثیرگذار است.

۳-۲-۱- تغییر نیم زاویه مخروط سرامیکی با سرعت

برخورد پرتابه

مقدار نیم زاویه مخروط سرامیکی با سرعت برخورد پرتابه رابطه دارد و در سرعت‌های برخورد مختلف مقدار این زاویه تغییر می‌کند. فلورانس در مدل خود مقدار این زاویه را ثابت و برابر ۶۳ درجه و فلوز نیز برابر ۶۸ درجه در نظر گرفته

۱- فرآیند نفوذ به صورت پایدار فرض شده است و از لحظه برخورد شروع می‌شود. یک مرحله انتقالی در شروع فرآیند وجود دارد که این مرحله برای پرتابه‌های با نوک تخت کوتاه است. در طی این مرحله انتقالی که قبل از شروع سایش پایدار پرتابه است، پرتابه به داخل هدف نفوذ خواهد داشت.

۲- نیروی برخورد روی فلز پشتیبان به وسیله مخروط سرامیکی وارد می‌شود. با در نظر گرفتن تغییرات زاویه تشکیل مخروط سرامیکی با سرعت برخورد، مقدار نیروی وارده بر فلز پشتیبان نیز تغییر خواهد کرد. در سرعت‌های بالا با توجه به سایش سریع سرامیک، این زاویه نیز تأثیری در مقدار نیروی وارده بر فلز پشتیبان و عمق نفوذ نخواهد داشت.

۳- رفتار مکانیکی پرتابه و هدف به صورت رفتار واقعی آنها در نظر گرفته شده است و برای پرتابه سه حالت، سایش، قارچی شدن و صلب در نظر گرفته شده است که در هر مرحله از مسیر نفوذ در حالت مشخصی قرار خواهد داشت.

۳-۱-۱- اصلاح سرعت پرتابه در زمان Δt بعد از برخورد

سرعت پرتابه در تمام مراحل نفوذ تأثیرگذار است و اصلاح این سرعت در هر بازه زمانی از مراحل نفوذ، در محاسبه سایر پارامترها نیز مؤثر است. از لحظه برخورد پرتابه به هدف، بازه‌های زمانی تعریف شده، مشخص می‌شوند (Δt). در هر کدام از این بازه‌ها، تغییرات سرعت پرتابه به کمک روابط زیر مشخص و در تعیین سایر پارامترها و مقدار عمق نفوذ همان بازه زمانی نیز، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]:

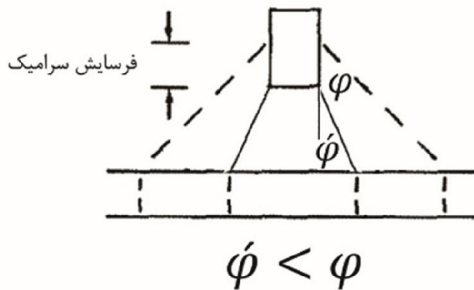
$$\frac{1}{2} \rho_t U^2 + R_t = \frac{1}{2} \rho_p (V - U)^2 + Y_p \quad (15)$$

$$U = \frac{1}{1 - \mu^2} \left[V - \mu \sqrt{(V^2 + A)} \right] \quad (16)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_p}}, \quad A = 2 \frac{(R_t - Y_p)(1 - \mu^2)}{\rho_t} \quad (17)$$

$$Y_p = -\rho_p l \frac{dv}{dt} \quad (18)$$

$$(\dot{X}_P - \dot{X}_{OP}) \rho_p L_P = - \left(\sigma_C + \frac{1}{2} \rho_C \dot{X}_{OP}^2 \right) \Delta t \quad (19)$$



شکل ۵- تأثیر کاهش نیم زاویه مخروط شکست با کاهش ضخامت سرامیک

۳-۳- اصلاح مقاومت سرامیک در مقابل نفوذ پرتابه
مقاومت سرامیک به‌عنوان یک پارامتر مهم از لحظه برخورد پرتابه تا سایش کامل آن در محاسبه عمق نفوذ مؤثر است. مقدار این مقاومت در طول فرآیند نفوذ با توجه به خاصیت ترد بودن سرامیک، نیز متغیر است. در مدل فلوز مقدار مقاومت سرامیک در فرآیند نفوذ ثابت در نظر گرفته شده است. در لحظه برخورد پرتابه به هدف، مقدار این مقاومت بیشترین مقدار خود، یعنی مقاومت سرامیک سالم است. باگذشت زمان و پیشروی پرتابه در هدف این مقدار کاهش خواهد یافت. در هر صورت مقاومت سرامیک خردشده کمتر از مقاومت سرامیک سالم است. بعد از تشکیل اولین مخروط سرامیکی، مقاومت سرامیک از رابطه (۲۳) به دست می‌آید [۱۸]:

$$Y_C = Y_{CO} \left(\frac{u - w}{u_{phase1}} \right) \quad (23)$$

این مقاومت تا انتهای فرآیند نفوذ در سرامیک به‌جای مقاومت سرامیک سالم استفاده می‌گردد.

۳-۴- اصلاح جرم سرامیک
جرم سرامیک در محاسبه سرعت‌های مربوط به سرامیک و نیروی وارده از طرف آن به فلز پشتیبان و همچنین مقدار سایش سرامیک مؤثر است. در هر مرحله از فرآیند نفوذ این جرم باید محاسبه گردد. در مدل فلوز منظور از جرم سرامیک، جرم محدود شده به مخروط سرامیکی است. این جرم در هر بازه زمانی با محاسبه جرم کاهش‌یافته سرامیک از جرم اولیه سرامیک به دست می‌آید [۱۰]:

$$\Delta M_C = (\dot{X}_{CF} - \dot{X}_C) \Delta t \rho_C A_0 \quad (24)$$

بودند. در واقع مقدار این زاویه با افزایش سرعت برخورد کاهش می‌یابد. در شکل ۴ تغییرات این زاویه با سرعت نشان داده شده است. در اصلاح مقدار این نیم زاویه مخروط سرامیکی از رابطه خطی (۲۱)، مقدار ϕ برحسب درجه به دست می‌آید:

$$\phi = \frac{5}{400} [-\dot{X}_P + 1000] + 63 \quad (21)$$

در این رابطه مقدار نیم زاویه مخروط سرامیکی بین ۶۸ تا ۶۳ درجه به‌صورت خطی تغییر می‌کند. علامت منفی در رابطه بالا برای کاهش مقدار نیم زاویه مخروط سرامیکی در سرعت‌های بیش‌تر است. بدین‌صورت که برای پرتابه با سرعت ۱۰۰۰ متر بر ثانیه مقدار نیم زاویه مخروط سرامیکی را برابر ۶۳ درجه و با سرعت ۶۰۰ متر بر ثانیه برابر ۶۸ درجه می‌توان محاسبه کرد. در سرعت‌های بالای ۱۰۰۰ متر بر ثانیه، مقدار این زاویه برابر ۶۳ درجه و در سرعت‌های کمتر از ۶۰۰ متر بر ثانیه برابر ۶۸ درجه است.

۳-۲-۲- تغییر نیم زاویه مخروط سرامیکی بر اساس

فرسایش سرامیک و زمان تشکیل مخروط سرامیکی
با پیشروی پرتابه در سرامیک و فرسایش آن، نیم زاویه تشکیل مخروط سرامیکی تغییر خواهد کرد. با توجه به اینکه تغییرات نیم زاویه مخروط سرامیکی برای سرعت‌های بالای ۱۰۰۰ متر بر ثانیه برابر ۶۳ درجه، برای سرعت‌های کمتر از ۶۰۰ متر بر ثانیه ۶۸ درجه و برای سایر سرعت‌ها به‌صورت خطی بین ۶۳ تا ۶۸ درجه تغییر می‌کند، بنابراین در صورت فرسایش سرامیک بعد از زمان کامل شدن تشکیل مخروط سرامیکی مقدار این نیم زاویه تغییر خواهد کرد. با توجه به گذشت زمان و پیشروی پرتابه، سرعت آن کمتر خواهد شد، بنابراین این نیم زاویه از مقدار اولیه خود بیشتر خواهد شد؛ اما کاهش ضخامت سرامیک، منجر به کاهش بیشتر این نیم زاویه خواهد شد که نتیجه نهایی کاهش نیم زاویه تشکیل مخروط سرامیکی است (شکل ۵). در صورت فرسایش کامل سرامیک مقدار این نیم زاویه در مدل فلوز برابر ۳۴ درجه است؛ بنابراین از رابطه (۲۲) در صورت تکمیل شدن زمان تشکیل مخروط سرامیکی و فرسایش سرامیک استفاده می‌شود:

$$\phi_{new} = \frac{\phi - 34}{t_C} (t_C - x) + 34 \quad (22)$$

$$\frac{dL}{dt} = -(\dot{X}_P - \dot{X}_{CF}) \quad (29)$$

در مدل اصلاحی، برای در نظر گرفتن تغییرات سرعت پرتابه و سرعت جلوی سرامیک از یک معادله خطی برای محاسبه مقادیر این سرعت‌ها استفاده شده است:

$$\dot{X}_P = \frac{\dot{X}_{P2} - \dot{X}_{P1}}{t_2 - t_1}(t - t_1) + \dot{X}_{P1} \quad (30)$$

$$\dot{X}_{CF} = \frac{\dot{X}_{CF2} - \dot{X}_{CF1}}{t_2 - t_1}(t - t_1) + \dot{X}_{CF1} \quad (31)$$

با جایگذاری روابط (۳۰) و (۳۱) در معادله (۲۹) و انتگرال‌گیری از آن در بازه ابتدا و انتهای Δt مقدار طول نهایی پرتابه بعد از سایش مشخص می‌گردد.

۳-۶- اصلاح کاهش جرم پشتیبان

در آخرین بخش از هر مرحله نفوذ در بازه‌های زمانی مشخص باید مقدار سایش فلز پشتیبان محاسبه گردد. تا زمانی که هنوز سرامیک به‌طور کامل سایش نیافته باشد، این مقدار کوچک است. در مواردی که پشتیبان دچار سایش می‌شود، فلوز از معادله (۱۲) مقدار کاهش جرم پشتیبان را محاسبه می‌کند. هنگام سایش پشتیبان مقادیر سرعت پشتیبان و سرعت قسمت جلوی آن متغیر است؛ بنابراین برای افزایش دقت محاسبه کاهش جرم پشتیبان در مدل اصلاحی مقادیر این سرعت‌ها توسط یک رابطه خطی به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\dot{X}_B = \frac{\dot{X}_{B2} - \dot{X}_{B1}}{t_2 - t_1}(t - t_1) + \dot{X}_{B1} \quad (32)$$

$$\dot{X}_{BF} = \frac{\dot{X}_{BF2} - \dot{X}_{BF1}}{t_2 - t_1}(t - t_1) + \dot{X}_{BF1} \quad (33)$$

این روابط با در نظر گرفتن تغییرات سرعت نسبت زمان که برابر است با شتاب، برای فلز پشتیبان و جلوی فلز پشتیبان به‌دست‌آمده است؛ بنابراین برای محاسبه مقدار کاهش جرم فلز پشتیبان ابتدا به کمک روابط (۳۲) و (۳۳) مقادیر سرعت‌های فلز پشتیبان و جلوی فلز پشتیبان محاسبه می‌شود. سپس با جایگذاری این مقادیر در معادله (۱۲) و انتگرال‌گیری در بازه زمانی موردنظر، مقدار کاهش جرم فلز پشتیبان محاسبه می‌گردد.

$$M_C = M_{CO} - \Delta M_C \quad (25)$$

در این کاهش جرم، مقدار نیم زاویه تشکیل مخروط سرامیکی و فرسایش سرامیک در نظر گرفته نشده است؛ بنابراین به‌منظور اصلاح این رابطه، ابتدا مدت زمان تشکیل مخروط سرامیکی از رابطه (۲۶) مشخص می‌شود [۷]:

$$t_{conoid} = 6 \frac{t_C}{c} \quad (26)$$

در صورتی که بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده، بزرگ‌تر از زمان تشکیل مخروط سرامیکی باشند، مقدار جرم سرامیک با محاسبه حجم مخروط ناقص به‌صورت زیر به دست می‌آید:

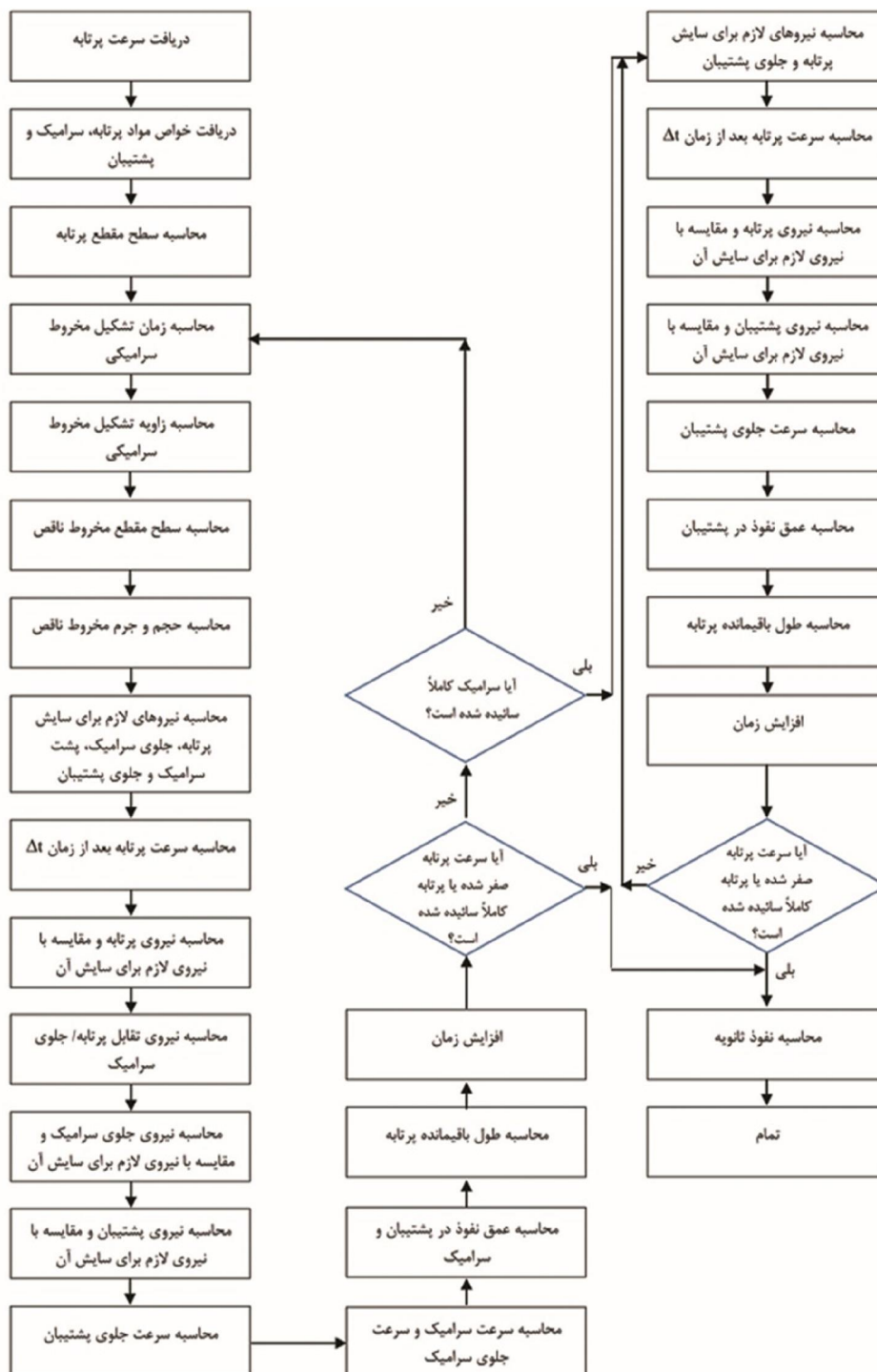
$$V_C = \frac{1}{3} \pi t_C (R^2 + r^2 + Rr) \quad (27)$$

$$M_C = \rho_C \times V_C \quad (28)$$

بنابراین برای محاسبه جرم مخروط سرامیکی ابتدا زمان تشکیل مخروط سرامیکی از رابطه (۲۶) محاسبه می‌گردد و با بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده برای تحلیل، مقایسه می‌شوند. در صورتی که بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده کوچک‌تر از زمان تشکیل مخروط سرامیکی باشند، از رابطه‌های (۲۴) و (۲۵) برای محاسبه جرم سرامیک جدید استفاده می‌شوند. با تکمیل شدن زمان تشکیل مخروط سرامیکی، باید حجم مخروط سرامیک جدید محاسبه گردد و دیگر نیازی به کم کردن جرم سرامیک کاهش‌یافته از آن نیست؛ بنابراین با استفاده از رابطه‌های (۲۷) و (۲۸)، جرم مخروط سرامیکی محاسبه می‌شود.

۳-۵- اصلاح سایش پرتابه

سه حالت برای پرتابه بر اساس سرعت برخورد و مقاومت آن در نظر گرفته شده است. حالت ابتدایی سایش پرتابه، بعد قارچی شدن و در ادامه حرکت پرتابه صلب است. در هر مرحله از فرآیند نفوذ باید حالت پرتابه مشخص شود. در اثر برخورد پرتابه به سرامیک بخشی از پرتابه دچار سایش می‌شود. در مدل فلوز مقدار سایش به‌وسیله کاهش جرم پرتابه، توسط معادله (۳) محاسبه می‌شود. در این رابطه تغییرات سرعت پرتابه و سرعت جلوی سرامیک در بازه زمانی Δt در نظر گرفته نشده است. به‌منظور اصلاح این رابطه از معادله (۲۹)، مقدار طول پرتابه بعد از سایش محاسبه می‌شود:



شکل ۶- نمودار محاسبه عمق نفوذ با مدل تحلیلی جدید

۴- نمودار محاسبه عمق نفوذ برای مدل تحلیلی

جدید

با توجه به اصلاحات انجام شده در مدل تحلیلی فلوز، ترتیب محاسبه مقادیر پارامترها نیز تغییر کرده است و تعدادی مراحل جدید جهت محاسبه دقیق عمق نفوذ اضافه شده است. این نمودار جدید در شکل ۶ نشان داده شده است. برای محاسبه عمق نفوذ در اهداف ترکیبی نیمه بی‌نهایت سرامیک - فلز به کمک مدل اصلاحی جدید و نمودار شکل ۶ باید پارامترهایی از قبیل، مقاومت مواد، ابعاد هدف و پرتابه، جرم پرتابه، چگالی پرتابه و هدف، سرعت موج پلاستیک (با توجه به سخت بودن محاسبه سرعت موج پلاستیک می‌توان طبق مرجع [۷] از ۰/۱ سرعت موج الاستیک استفاده کرد) را داشت.

۵- مقایسه نتایج و بحث

در این بخش به مقایسه مدل جدید با مدل فلوز و نتایج تجربی پرداخته شده است. نتایج تجربی مربوط به آزمایش - های بلس^۱ و همکاران [۲۷] است. مشخصات پرتابه و هدف مورد استفاده در آزمایش‌ها، در شکل ۷ نشان داده شده است. پرتابه از جنس تانتالیوم^۲ و هدف از جنس آلومینا ۸۵٪ با پشتیبان آلومینیومی از جنس T6 - 6061 است. به‌منظور مقایسه نتایج خروجی و با توجه به ضخامت هدف که نیمه بی‌نهایت است، عمق نفوذ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در جدول ۱ مقایسه بین نتایج در پنج سرعت مختلف انجام شده است.

در شکل ۸ نمودار مربوط به مقایسه پیش‌بینی عمق نفوذ در مدل‌های فلوز، مدل وودوارد و مدل تحلیلی جدید با نتایج تجربی آمده است. در این نمودار میله‌ای درصد خطای مربوط به هر کدام از مدل‌ها با نتایج تجربی در سرعت مربوطه روی آن نشان داده شده است. ضخامت سرامیک ۹/۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

به‌منظور بررسی بهتر، دقت مدل تحلیلی جدید و مدل فلوز، در شکل ۹ مقایسه بین این دو مدل صورت گرفته است.

شرایط هدف مشابه آزمایش بلس و همکارانش است. ضخامت سرامیک ثابت و برابر ۹/۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در ۲۲ سرعت مختلف این دو مدل باهم مقایسه شده است. پیش‌بینی عمق نفوذ در سرعت‌های بالا در مدل تحلیلی جدید با مدل فلوز خیلی نزدیک است؛ اما در سرعت‌های پایین باهم متفاوت هستند.

مدل اصلاحی جدید، نفوذ پرتابه در فلز پشتیبان را از لحظه برخورد دنبال می‌کند و برای آن عمق نفوذ در نظر می‌گیرد. در لحظه برخورد و بعد از تشکیل مخروط سرامیکی، پرتابه همراه با مخروط تشکیل شده به داخل فلز پشتیبان نفوذ می‌کنند، درحالی‌که هنوز سرامیک به‌طور کامل فرسایش نیافته است. مدل تحلیلی اصلاحی جدید در سرعت‌های بالاتر از ۱۳۵۰ متر بر ثانیه مقدار عمق نفوذ در اهداف نیمه بی‌نهایت را تقریباً مشابه مدل فلوز و با درصد بهبود کمتری نسبت به آن، نزدیک به نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کند؛ اما پیش‌بینی دقیق‌تر عمق نفوذ در سرعت‌های کمتر از ۱۳۵۰ متر بر ثانیه که مدل فلوز در پیش‌بینی آن دقت پایینی دارد، توسط مدل تحلیلی اصلاحی جدید انجام شده است. این افزایش دقت با اصلاحات انجام شده، به‌دست‌آمده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به ارائه یک مدل تحلیلی اصلاحی جدید بر اساس مدل فلوز پرداخته شده است. پیش‌بینی مقدار عمق نفوذ برای اهداف نیمه بی‌نهایت با مدل‌های تحلیلی و تجربی، مورد مقایسه قرار گرفته است. از این مقایسه نتایج زیر به‌دست‌آمده است:

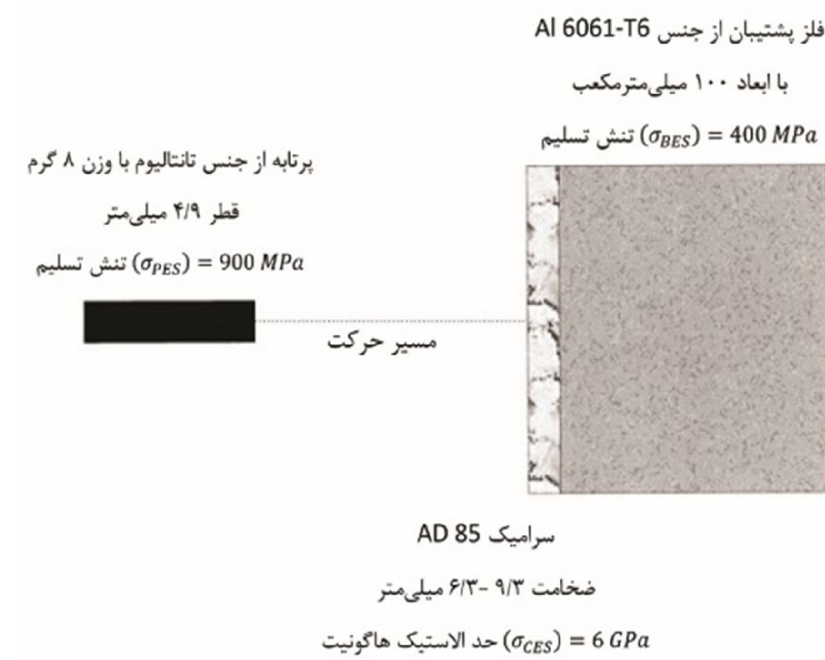
۱- مدل اصلاحی مقادیر عمق نفوذ را در سرعت‌های بالا

و پایین در مقایسه با نتایج تجربی با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌کند و نقص اساسی مدل فلوز را که مربوط به پیش‌بینی عمق نفوذ در سرعت‌های پایین است، به‌خوبی پوشش داده است.

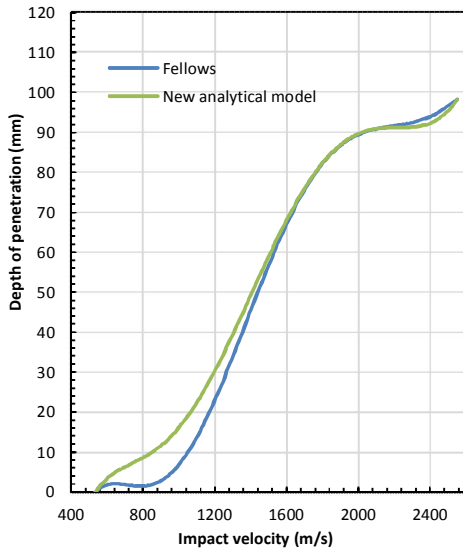
۲- در سرعت‌های بالاتر از ۱۳۵۰ متر بر ثانیه می‌توان از مدل فلوز و در سرعت‌های کمتر، از مدل تحلیلی اصلاحی جدید استفاده کرد. در صورت نیاز به دقت بالاتر در پیش‌بینی عمق نفوذ می‌توان در تمام سرعت‌ها از مدل تحلیلی اصلاحی جدید استفاده کرد.

¹ Bless

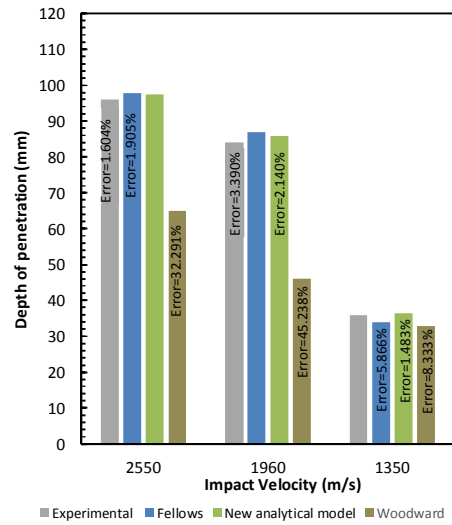
² Tantalum



شکل ۷- نمایی از آزمایش تجربی بلس و شرایط آن [۱۰]



شکل ۹- مقایسه عمق نفوذ بین مدل تحلیلی جدید و مدل فلوز



شکل ۸- مقایسه عمق نفوذ بین مدل های تحلیلی و نتایج تجربی

جدول ۱- مقایسه عمق نفوذ در مدل جدید با مدل فلوز [۱۰]، مدل وودوارد [۶] و نتایج تجربی آزمایش‌های بلس و همکارانش [۲۷]

شماره	نوع پرتابه	سرعت پرتابه (متر بر ثانیه)	اندازه‌گیری تجربی نفوذ در پشتیبان (میلی‌متر)	ضخامت سرامیک (میلی‌متر)	پیش‌بینی مدل فلوز از عمق نفوذ در پشتیبان (میلی‌متر)	پیش‌بینی مدل وودوارد از عمق نفوذ در پشتیبان (میلی‌متر)	پیش‌بینی مدل جدید از عمق نفوذ در پشتیبان (میلی‌متر)
۱	۸ گرم تانتالیوم میله بلند	۲۵۵۰	۹۶	۹/۳	۹۷/۸۲۹	۶۵	۹۷/۵۴۰
۲	۸ گرم تانتالیوم میله بلند	۱۹۶۰	۸۴	۹/۳	۸۶/۸۴۸	۴۶	۸۵/۷۹۸
۳	۸ گرم تانتالیوم میله بلند	۱۲۵۰	۳۶	۹/۳	۳۳/۸۸۸	۳۳	۳۶/۵۳۴
۴	۷/۶ گرم تانتالیوم میله بلند نوک‌تیز	۷۰۰	۵/۳	۹/۱۹	۰	۰	۶/۵۶۵
۵	۸ گرم تانتالیوم میله بلند	۶۱۰	۴/۸	۶/۳	۰	۰	۵/۱۴۵

زمان از خطای پیش‌آمده مربوط به جرم مخروط سرامیکی جلوگیری شده است.
۶- نیم زاویه تشکیل مخروط سرامیکی با افزایش سرعت برخورد پرتابه کاهش پیدا می‌کند. این تغییرات زاویه در مدل تحلیلی اصلاحی در نظر گرفته شده است. با توجه به تأثیر زاویه تشکیل مخروط سرامیکی در جرم مخروط سرامیکی و سطح مقطع مخروط ناقص در تماس با پشتیبان، خطای زیادی، حذف گردیده است.

۷- مقاومت سرامیک با توجه به ترد بودن آن و بعد از ضربه، کاهش می‌یابد. در مدل تحلیلی اصلاحی، بعد از برخورد مقاومت سرامیک خردشده، جایگزین مقاومت سرامیک سالم شده است.

۸- طول پرتابه بعد از هر بازه زمانی با توجه به شرایط برخورد در آن بازه، کاهش پیدا می‌کند. در مدل اصلاحی، تغییرات سرعت پرتابه و سرامیک در هر بازه زمانی در نظر گرفته شده و با استفاده از یک مدل خطی به محاسبه طول باقیمانده پرتابه پرداخته است. تأثیر این تغییر، در افزایش دقت

۳- اگرچه در مدل تحلیلی فلوز، تغییرات پرتابه، سرامیک و پشتیبان به‌صورت کامل در نظر گرفته شده است؛ اما، ابهاماتی در مسیر تعیین مقدار عمق نفوذ وجود دارد که نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این موارد در مدل اصلاحی در کنار اصلاحات انجام شده در فلوجارت بیان شده در شکل ۶ برطرف شده است.

۴- فلوز در هر بازه زمانی از یک سرعت پرتابه مشخص استفاده کرده است. با کوچک نمودن بازه‌های زمانی، تغییرات سرعت پرتابه، کم خواهد شد؛ اما، همین مقدار کم نیز در تعیین عمق نفوذ نهایی تأثیرگذار است، بنابراین در مدل اصلاحی جدید، تغییرات سرعت پرتابه، در هر بازه زمانی در نظر گرفته شده و در حل و تعیین عمق نفوذ در همان مرحله نیز استفاده می‌گردد.

۵- زمان تشکیل مخروط سرامیکی برای تعیین بازه‌های زمانی حل و هم‌چنین محاسبه جرم مخروط سرامیکی لازم است. در مدل فلوز این زمان به‌صورت جداگانه محاسبه و در نظر گرفته نشده است. در مدل تحلیلی اصلاحی با محاسبه این

جرم پشتیبان، kg	M_B	نتایج خروجی مدل اصلاحی و نزدیکی آن به نتایج تجربی زیاد بوده است.
چگالی پرتابه، kg/m ³	ρ_P	۹- به منظور افزایش دقت مدل تحلیلی باید بازه‌های
چگالی سرامیک، kg/m ³	ρ_C	زمانی مربوط به تحلیل، خیلی کوچک انتخاب شوند. این کوچک انتخاب کردن، مقدار خطاهای
مقاومت فرسایشی پرتابه، Pa	σ_{PES}	مربوط به مدل‌های خطی در نظر گرفته شده در هر
مقاومت فرسایشی سرامیک، Pa	σ_{CES}	بخش را کاهش می‌دهد.
مقاومت فرسایشی پشتیبان، Pa	σ_{BES}	
مقاومت پرتابه، Pa	Y_P	۸- علائم، نشانه‌ها و ارقام
مقاومت هدف، Pa	R_t	A_0 سطح مقطع پرتابه، m ²
مقاومت سرامیک خردشده، Pa	Y_C	A_1 سطح مقطع قسمت پشت مخروط سرامیکی در تماس با پشتیبان، m ²
مقاومت سرامیک سالم، Pa	Y_{CO}	t_C ضخامت سرامیک، m
نیم زاویه مخروط سرامیکی، درجه	φ	x فرسایش سرامیک، m
نیم زاویه مخروط سرامیکی جدید، درجه	φ_{new}	Δt بازه زمانی، s
حجم مخروط سرامیک، m ³	V_C	t_{conoid} زمان تشکیل مخروط سرامیکی، s
قطر بزرگ مخروط ناقص سرامیکی، m	R	F_P نیروی وارد پرتابه، N
قطر کوچک مخروط ناقص سرامیکی، m	r	F_I نیروی تداخلی بین پرتابه و سرامیک، N
سرعت پرتابه، m/s	\dot{X}_P	F_C نیروی وارد بر جلوی سرامیک، N
سرعت سرامیک، m/s	\dot{X}_C	F_{C2} نیروی وارد بر پشت سرامیک، N
سرعت پشتیبان، m/s	\dot{X}_B	F_{I2} نیروی تداخلی بین سرامیک و پشتیبان، N
سرعت جلوی سرامیک، m/s	\dot{X}_{CF}	F_B نیروی وارد بر پشتیبان، N
سرعت سایش سرامیک، m/s	\dot{X}_{CE}	M_P جرم پرتابه، kg
سرعت قبلی سرامیک، m/s	\dot{X}_{OC}	ΔM_P کاهش جرم پرتابه، kg
سرعت جلوی پشتیبان، m/s	\dot{X}_{BF}	M_C جرم مخروط سرامیکی، kg
سرعت سایش پشتیبان، m/s	\dot{X}_{BE}	ΔM_C کاهش جرم قسمت جلویی مخروط سرامیکی، kg
سرعت پرتابه در لحظه t ₁ ، m/s	\dot{X}_{P1}	ΔM_{C2} کاهش جرم قسمت پشتی مخروط سرامیکی، kg
سرعت پرتابه در لحظه t ₂ ، m/s	\dot{X}_{P2}	M_{CO} جرم قبلی مخروط سرامیکی، kg

- [9] Benloulo IC, Sanchez-Galvez V (1998) A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite armors. *Int J Impact Eng* 21: 461-471.
- [10] Fellows N, Barton P (1999) "Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite armour. *Int J Impact Eng* 22: 793-811.
- [11] Hohler V, Weber K, Tham R, James B, Barker A, Pickup I (2001) Comparative analysis of oblique impact on ceramic composite systems. *Int J Impact Eng* 26: 333-344.
- [12] Fawaz Z, Zheng W, Behdinan K (2004) Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours. *Compos Struct* 63: 387-395.
- [13] Rosenberg Z, Shuach YA, Dekel E (2007) More on the ricochet of eroding long rods-Validating the analytical model with 3D simulations. *Int J Impact Eng* 34: 942-957.
- [14] Shokrieh M, Javadpour G (2008) Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor. *Compos Struct* 82: 269-276.
- [15] khodadadi a, liaghat g, akbari ma, and tahmasebiabdar m (2014) Numerical and experimental analysis of penetration into Kevlar fabrics and investigation of the effective factors on the ballistic performance. *Modares Mechanical Engineering* 13: 124-133. (In Persian)
- [16] Liaghat G, Shanazari H, Tahmasebi M, Aboutorabi A, and Hadavinia H (2013) A modified analytical model for analysis of perforation of projectile into ceramic composite targets. *J Compos Mater* 3: 17-22.
- [17] Nouri MD, Hatami H, Jahromi AG (2015) Experimental and numerical investigation of expanded metal tube absorber under axial impact loading. *Struct Eng Mech* 54 (6): 1245-1266.
- [18] Hatami H, Nouri MD (2015) Experimental and numerical investigation of lattice-walled cylindrical shell under low axial impact velocities. *Lat Am J Solids Stru* 12 (10): 1950-1971.
- [19] Shanazari H, Lighat GH, Feli S (2016) Analysis of penetration process in hybrid ceramic /nanocomposite targets. *Modares Mechanical Engineering* 16: 137-146. (In Persian)
- [20] Babaei H, Jamali A, Mostofi TM, Talesh SH (2016) Experimental study and mathematical modeling of deformation of rectangular plates under impact load. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 6 (1): 143-152. (In Persian)
- [21] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2017) Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck
- m/s، t_1 در لحظه \dot{X}_{CF1} سرعت جلوی سرامیک در لحظه t_1 ، m/s
- m/s، t_2 در لحظه \dot{X}_{CF2} سرعت جلوی سرامیک در لحظه t_2 ، m/s
- m/s، t_1 در لحظه \dot{X}_{B1} سرعت پشتیبان در لحظه t_1 ، m/s
- m/s، t_2 در لحظه \dot{X}_{B2} سرعت پشتیبان در لحظه t_2 ، m/s
- m/s، t_1 در لحظه \dot{X}_{BF1} سرعت جلوی پشتیبان در لحظه t_1 ، m/s
- m/s، t_2 در لحظه \dot{X}_{BF2} سرعت جلوی پشتیبان در لحظه t_2 ، m/s
- m/s، نفوذ، U
- m/s، پرتابه، V
- m/s، سرعت حرکت موج الاستیک در سرامیک، c
- m/s، سرعت صفحه پشتیبان، w
- سرعت نفوذ در پایان مرحله شکست سرامیک، u_{phase1} m/s
- شتاب پرتابه، \ddot{X}_p m/s²

۹- مراجع

- [1] Florence AL, Ahrens T (1967) Interaction of projectiles and composite armor. Stanford Res Inst Menlo Park.
- [2] Tate A (1967) A theory for the deceleration of long rods after impact. *J Mech Phys Solids* 15: 387-399.
- [3] Wilkins ML (1978) Mechanics of penetration and perforation. *Int J Eng Sci* 16: 793-807.
- [4] Backman ME, Goldsmith W (1978) The mechanics of penetration of projectiles into targets. *Int J Eng Sci* 16(1): 1-100.
- [5] Rosenberg Z, Yeshurun Y (1988) The relation between ballistic efficiency and compressive strength of ceramic tiles. *Int J Impact Eng* 7: 357-362.
- [6] Woodward RL (1990) A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat. *Int J Impact Eng* 9: 455-474.
- [7] Reijer PC (1991) Impact on ceramic faced armour PhD thesis, Technical University Delft, Delft, The Netherlands.
- [8] Zaera R, Sánchez-Gálvez V (1998) Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours. *Int J Impact Eng* 21: 133-148.

- metal tubes under axial impact. *Thin Walled Struct* 116: 1-11.
- [25] Najafi M, Hosseini SH, Joudaki J (2018) Penetration of Armored Piercing Projectile into Ultra-High Strength Steel Targets: Numerical and Experimental Investigation. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 8 (2): 81-92. (In Persian)
- [26] Hatami H, Hosseini M, Yasuri AK (2019) Perforation of Thin Aluminum Targets Under Hypervelocity Impact of Aluminum Spherical Projectiles. *Mater Eval* 77 (3): 411-422.
- [27] Bless SJ, Rosenberg Z, Yoon B (1987) Hypervelocity penetration of ceramics. *Int J Impact Eng* 5: 165-171.
- normally by rigid spherical projectile. *Thin Walled Struct* 107: 257-265.
- [22] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S (2017) On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin Walled Struct* 112: 118-24.
- [23] Hatami H, Shokri Rad M, Ghodsbin Jahromi A (2017) theoretical analysis of the energy absorption response of expanded metal tubes under impact loads. *Int J Impact Eng* 109: 224-239.
- [24] Ghodsbin Jahromi A, Hatami H (2017) Energy absorption performance on multilayer expanded