

شبیه سازی عددی و تحلیلی پرتابه های فرسایشی سرعت بالا در اهداف بتنی مسلح به الیاف فولادی

مهدی هدایتیان^۱، خداداد واحدی^{۲*}

۱- مری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسدآباد، ۲- دانشیار دانشگاه امام حسین

(تاریخ وصول: ۹۴/۸/۳۰، تاریخ پذیرش: ۹۵/۱/۲۸)

چکیده

در این مقاله به ارائه یک مدل تحلیلی فرآیند نفوذ پرتابه های فرسایشی در بتن تقویت شده به الیاف فولادی پرداخته شده است. نوآوری مدل تحلیلی ارائه شده در آن است که تأثیر طول به قطر الیاف فولادی و نسبت طول به قطر پرتابه و همچنین درصد حجمی الیاف استفاده شده در ماتریس بتن بر روی مقاومت ضربه ای بتن الیافی در سرعت های بالا مورد توجه قرار گرفته است. در شبیه سازی عددی از کد صریح و غیرخطی ال اس داینا با روش حل لاگرانژی و به صورت تقارن محوری استفاده شده است. پرتابه ها با سرعت بالای در حدود ۲۵۰۰ متر بر ثانیه با جرم تقریبی ۴۵ گرم و با سر نفوذگر نیم کروی، تخت و اجایو در بتن مسلح به الیاف فولادی با درصد های حجمی ۱، ۱/۵ و ۲ درصد نفوذ می کنند. در این مقاله برای پیش گویی دقیقی رفتار پرتابه فلزی و بتن الیافی در سرعت های بارگذاری خیلی بالا از مدل ماده الاستیک - پلاستیک هیدرودینامیک استفاده شده است. پس از مقایسه مدل تحلیلی نفوذ با فرآیند شبیه سازی و کار آزمایشگاهی، نتایج نشان می دهد که پرتابه های با سر نفوذگر اجایو که فاکتور تیزی سر پرتابه پایینی دارد با سرعت باقیمانده بیشتری از اهداف خارج می شود و کارایی آنها در نفوذ بهتر می باشد. به عبارت دیگر با افزایش نسبت طول به قطر پرتابه از ۰/۵ به ۰/۹، برای پرتابه هایی به ترتیب به شکل تخت، نیم کروی و اجایو، سرعت باقی مانده افزایش می یابد. همچنین با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی در ماتریس بتن میزان تخریب سطح رویی و زیرین بتن الیافی تا ۲۰ درصد کاهش می یابد. مدل تحلیلی ارائه شده در فرآیند تغییرات سرعت پرتابه در حین نفوذ داخل بتن مسلح به الیاف فولادی از دستاوردهای مهم این تحقیق محسوب می شود.

واژه های کلیدی: نفوذ سرعت بالا، پرتابه، بتن مسلح به الیاف فولادی، شبیه سازی عددی، LS-DYNA.

Numerical Simulation and Analytical of High Speed Erosive Projectiles into Steel Fiber Reinforced Concrete Targets

M. Hedayatian¹, KH. Vahedi^{2*}

1-Islamik Azad University Asadabad Branch, 2- Imam Hossein University

(Received: 11/21/2015, Accepted: 4/16/2016)

Abstract

In this paper, modeling of high speed projectiles with different nose shapes, penetrating into steel fiber reinforced concrete is investigated. This is a novel study because it considers the length to diameter ratio of steel fiber as well as the projectile length to diameter ratio and volume fraction of fiber used in concrete matrix on the impact resistance of steel fiber reinforced concrete fibers at high speeds. Numerical simulation is used using LS-DYNA explicite code with Lagrangian method and axial symmetry form. The projectiles have an approximate mass of 45 (gr) and their velocities are about 2500 (m/s) penetrating into steel fiber reinforced concrete panel with volume fraction of 1.0%, 1.5% and 2.0%. In this article the exact behavior of steel fiber reinforced concrete confronting metallic projectiles at high speed is predicted. Here, Elastic-Plastic Hydrodynamic material model is used for prediction of projectile behavior. The results of the simulations are compared with experimental work of other investigators and, the results show that ogive nose projectiles are more efficient than other projectiles. In other words, by increasing the projectile length to diameter ratio from 0.5 to 0.9, for flat, hemispherical and ogive projectiles their residual velocities are increased. Also, it is shown that by increasing the volume fraction of steel fibers in concrete matrix, damage of top surface damage is reduced 20% dramatically. The analytical model presented in this paper considers the speed variations of the projectile during the penetration process into steel fiber reinforced concrete is an important achievements this respect.

Keywords: High Speed Penetration, Projectiles, Steel Fiber Reinforced Concrete, Numerical Simulation, LS-DYNA.

۱- مقدمه

استفاده از بتن با مقاومت بالا به خاطر رفتار ترد و شکننده آن باعث محدودیت در کارهای عملی می‌شود. یکی از راه‌های مقابله با رفتار ترد بتن، استفاده از الیاف در ماتریس بتن می‌باشد که باعث شکل پذیری و افزایش خواص مکانیکی این ماده تحت بارگذاری‌های ضربه‌ای می‌شود [۱]. در طول چند دهه گذشته استفاده از بتن تقویت شده با الیاف فولادی به خاطر کارایی بالای آن از جمله عملکرد دینامیکی بسیار عالی آن در برابر انفجار و نفوذ پرتابه‌ها، مورد توجه مهندسين قرار گرفته است. توزیع تصادفی الیاف کوچک فلزی سبب بهبود خواص فیزیکی ماتریس بتن الیافی از جمله مقاومت در برابر شروع و همچنین مقاومت در برابر گسترش ترک شود [۲]. اضافه کردن الیاف به بتن باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت بتن در مقابل بارهای ضربه‌ای می‌شود. در این مورد، الیاف فولادی و به شکل قلاب دار، اثر بیشتری را از خود نشان داده است [۳]. همچنین مکانیزه رشد و توسعه ترک را به تأخیر می‌اندازد [۴]. در واقع با افزایش چقرمگی ماتریس بتن که با افزودن الیاف فلزی حاصل می‌شود می‌توان عمق نفوذ در اهداف را کاهش داد. از جمله کاربرد این نوع بتن را می‌توان در ساخت پوشش تونل‌ها، باند فرودگاه، آشیانه‌های پرواز و ساخت سازه راکتورها و غیره عنوان کرد [۵]. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که برای سرعت‌های بارگذاری شبه استاتیکی پایین (زیر ۱۰ متر بر ثانیه) توسط وزنه افتان، استفاده از ۱٪ تا ۲٪ حجمی الیاف فولادی، باعث افزایش مقاومت ضربه‌ای بتن‌های الیافی می‌شود [۶]. در تحقیق آزمایشگاهی دیگری که از پرتابه‌های اجابو با جرم ۱۸ گرم که با سرعت ۷۰۰ متر بر ثانیه در اهداف بتنی نفوذ می‌کنند، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ۲٪ حجمی الیاف فولادی می‌تواند رفتار ترد بتن را به حالت شکل‌پذیر در برابر نفوذ پرتابه تبدیل کند و پارامترهای آسیب ماتریس بتن الیافی مانند قطر ناحیه حفره را نسبت به بتن ساده کاهش دهد [۷]. اکثر تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده در زمینه نفوذ سرعت‌های کمتر از ۱۰۰۰ متر بر ثانیه و اغلب بر روی بتن‌های ساده و یا مسلح به میله‌های تقویت کننده می‌باشد [۸]. در اثر برخورد یک پرتابه به یک عضو بتنی پدیده‌های گوناگونی احتمال دارد که ایجاد شود که وقوع این پدیده‌ها به خواص بتن، خصوصیات هندسی و فیزیکی پرتابه و شکل پرتابه، ضخامت و هندسه‌ی عضو، سرعت برخورد و زاویه‌ی برخورد و ... بستگی دارد [۹]. دست آورد مهم این تحقیق ارائه مدل تحلیلی فرآیند نفوذ پرتابه داخل بتن تقویت شده به الیاف فولادی می‌باشد. تأثیر طول به قطر الیاف فولادی، تأثیر درصد حجمی الیاف استفاده شده در ماتریس بتن و همچنین تأثیر نسبت طول به قطر پرتابه در مدل تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. پرتابه‌ها با جرم و قطر یکسان و شکل‌های مختلف نیم کروی، تخت و اجابو که دارای نسبت طول به قطر متفاوت هستند، استفاده شده اند تا تأثیر آن بر روی مکانیزم گسیختگی بتن الیافی در مدل تحلیلی و عددی و مطابقت آن با نتایج تجربی مشخص شود.

۲- حل تحلیلی

در مسائل مربوط به نفوذ در بتن، مقدار نیروی متوسط مقاوم در برابر نفوذ پرتابه را می‌توان طبق رابطه زیر نوشت [۱۰]:

$$F = \frac{\sigma_t \pi d^2}{4} \quad (1)$$

و با شرط پایستگی انرژی، مقدار انرژی جنبشی پرتابه در حین نفوذ برابر است با:

$$E_k = \int_0^p F dz = \int_0^p \frac{\sigma_t \pi d^2}{4} dz = \frac{\sigma_t p \pi d^2}{4} \quad (2)$$

با مرتب‌سازی رابطه بالا می‌توان رابطه بی‌بعد عمق نفوذ را به صورت زیر نوشت:

$$P_d = \frac{P}{d} = \frac{4E_k}{\pi \sigma_t d^3} \quad (3)$$

که در رابطه (۳) مقدار انرژی جنبشی در لحظه نفوذ پرتابه مقدار $E_k = (1/2)M.V_i^2$ است. همچنین به علت سرعت بالای بارگذاری ضربه بر روی هدف، مقدار فشار مقاوم دینامیکی را می‌توان توسط تابعی تجربی از مقاومت فشاری بتن و سرعت بار ضربه‌ای به صورت زیر بیان کرد:

$$\sigma_t = 4.2f'_c + 135 + (0.014f'_c + 0.45).V_i \quad (4)$$

حد بحرانی انرژی حاصل از ضربه یک پرتابه برای ایجاد ترک مخروطی، ایجاد پدیده لایه شدن در سطح زیرین هدف و پدیده نفوذ کامل در نمونه بتنی تابعی از ضخامت هدف و قطر پرتابه می‌باشد که برای نسبت $H/d > 5$ عبارت است از:

$$\frac{E_c}{\sigma_t d^3} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{d} - 4.7 \right) \quad (5)$$

$$\frac{E_s}{\sigma_t d^3} \frac{N^*}{0.72} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{d} - 4.3 \right) \quad (6)$$

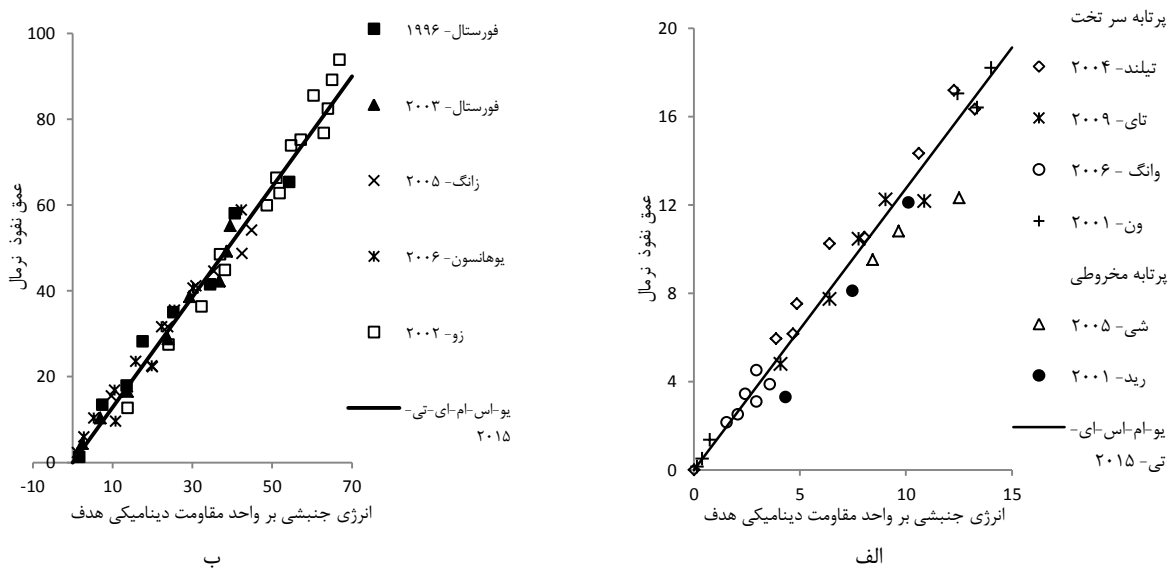
$$\frac{E_p}{\sigma_t d^3} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{d} - 3 \right) \quad (7)$$

در شکل (۱) مقایسه رابطه تحلیلی (۳) با مقادیر نرمال تجربی عمق نفوذ را برای پرتابه‌های سرتخت، مخروطی و اجابو می‌توان مشاهده کرد [۱۰].

در این تحقیق مدل تحلیلی نفوذ پرتابه در هدف بتنی ارائه شده است که نوآوری مقاله در پدیده نفوذ در اهداف مسلح به الیاف فولادی از نظر تأثیر طول به قطر الیاف فولادی و همچنین تأثیر درصد حجمی الیاف بکار برده شده در ماتریس بتن می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۲) آمده، بجای استفاده از آرماتورهای فولادی، می‌توان از توزیع تصادفی الیاف فولادی به منظور افزایش شکل‌پذیری و بالا بردن مقاومت ضربه‌ای در بتن استفاده کرد. در جدول (۱) مشخصات هندسی و مکانیکی الیاف فولادی نشان داده شده است.

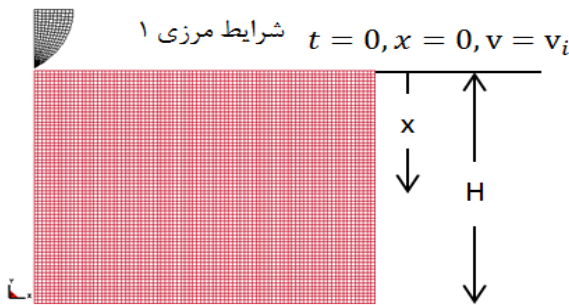
با فرض آن که کاهش شتاب پرتابه در داخل هدف به صورت خطی باشد، می‌توان تغییرات سرعت پرتابه در حین نفوذ را به صورت تابع سهمی به فرم زیر نوشت:

$$v = -ax^2 + b \quad (8)$$



شکل ۱- مقایسه رابطه تحلیلی (۳) با مقادیر نرمال تجربی برای: (الف) پرتابه‌های سرتخت و مخروطی، (ب) پرتابه‌های اجابو [۱۰].

$$\alpha = f\left(\beta, RI, \frac{l_p}{d_p}, \frac{\rho_p}{\rho_t}\right) \quad (10)$$



شرایط مرزی ۱ $t = 0, x = 0, v = v_i$

شرایط مرزی ۲ $t, x = H, v = v_r$

شکل ۳- شرایط مرزی حاکم بر مسئله نفوذ پرتابه در هدف بتنی.

در مراجع مختلف برای ثابت مادی برحسب شاخص تقویت الیاف فولادی روابط تجربی متعددی ذکر شده است. در این تحقیق از مرجع [۱۳] برای بیان تأثیر مقاومت الیاف فولادی در ماتریس بتن استفاده شده است:

$$\beta = 0.5811 + 0.8155 \cdot RI^{-0.7406} \quad (11)$$

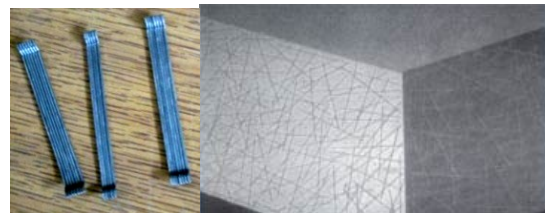
$$RI = \frac{v_f \cdot l_f}{d_f} \quad (12)$$

که در آن درصد حجمی الیاف فولادی و $\frac{l_f}{d_f}$ نسبت طول به قطر الیاف فولادی است. با مشخص بودن ثابت مادی هدف در رابطه (۱۱) و شاخص تقویت الیاف فولادی و درصد حجمی الیاف فولادی در ماتریس بتن در رابطه (۱۲) و همچنین نسبت طول به قطر پرتابه و نسبت چگالی پرتابه به هدف می‌توان ضریب تصحیح آلفا را با رابطه زیر بیان کرد:

$$\alpha = \beta \cdot \left(\frac{l_p}{d_p}\right) \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right) \quad (13)$$

جدول ۱- مشخصات هندسی و مکانیکی الیاف فولادی [۱۱].

چگالی (gr/cm ³)	مقاومت کششی (MPa)	قطر (mm)	طول (mm)	نسبت ظاهری الیاف	مدول یانگ (GPa)
۷/۸	۱۰۵۰	۰/۵	۳۰	۶۰	۲۱۰



شکل ۲- نحوه پخش الیاف فولادی در بتن و شکل ظاهری

الیاف [۱۲].

با توجه به شرایط مرزی مسئله همانند شکل (۳)، در لحظه $t=0$ و $x=0$ مقدار سرعت برابر با $v=v_i$ و در زمان t که پرتابه با سرعت باقی‌مانده v_r در آستانه خروج از هدف می‌باشد $x=H$ و $v=v_r$ است. با قرار دادن شرایط مذکور در رابطه (۸)، مقادیر ضرایب a و b تعیین می‌شود و تغییرات کاهش سرعت پرتابه در ضخامت هدف:

$$v = (v_r - v_i) \cdot \left(\frac{x}{H}\right)^2 + v_i \quad (9)$$

برای مشخص کردن نقش الیاف فولادی و فاکتور تیزی پرتابه در حین فرآیند نفوذ، از ضریب تصحیح α در رابطه (۹) که تابعی از فاکتورهای بی‌بعد ثابت مادی (β)، شاخص تقویت الیاف فولادی (RI)، نسبت طول به قطر پرتابه ($\frac{l_p}{d_p}$) و نسبت چگالی پرتابه به چگالی هدف ($\frac{\rho_p}{\rho_t}$) است، استفاده شده است:

برخورد چگالی و حجم ثابت نیست. در نتیجه برای ارتباط بین تغییر حجم و چگالی با فشار اعمال شده از معادله حالت گرونایزن استفاده می‌شود [۱۴]. در نرم‌افزار ال‌اس-دایناسا امکان تحلیل در محیط‌های دینامیکی غیرخطی، روش‌های پیشرفته مش بندی مجدد جهت حداقل نمودن خطای عددی، امکان بررسی رفتار سازه در حالت غیرخطی با تغییر شکل‌های بزرگ در بارگذاری دینامیکی، انعطاف‌پذیری در انتخاب روش‌های لاگرانژی و اویلری و قابلیت تحلیل به روش المان‌های محدود و مجزا از جمله فن‌آوری‌های مدرنی هستند که این نرم‌افزار را برای مدل‌سازی ضربه‌ای مناسب می‌سازد. در این نرم‌افزار مدل ماده‌های زیادی برای بتن با کاربردهای مختلف ارائه شده است که شامل اثرهای نرخ کرنش و گسترش ترک می‌باشد. مدل ماده جانسون-هالمکوئیست، باهدف توسعه یک مدل ماده بتن تحت تأثیر بارهای ضربه‌ای که در آن مواد تحت کرنش‌های بزرگ، نرخ کرنش بالا و فشار بالا قرار دارند، توسط هالمکوئیست، جانسون و کوک ارائه شد [۱۵]. در این مدل استحکام معادل بتن به صورت تابعی از فشار، کرنش و آسیب تعریف می‌شود. مدل ماده تیپ ۸۴ بانام بتن وینفریش ۱، بر اساس توصیه نامه سی ای بی ۲، سه ثابت و چهار پارامتر را مدنظر قرار می‌دهد و اثرهای آهنگ کرنش را نیز در نظر می‌گیرد. مدل ماده تیپ ۱۶ بانام بتن شبه تانسور ۳ و مدل ماده تیپ ۷۲ این نرم‌افزار بانام مدل آسیب بتن ۴، سه پارامتر گسترش ترک، اثر آهنگ کرنش و معادله حالت ۵ را در نظر می‌گیرد. مدل ماده تیپ ۹۶ بانام مدل آسیب ترد ۶، فقط دو پارامتر گسترش ترک و آهنگ کرنش را در نظر می‌گیرد. همه مدل‌های اشاره شده با در نظر گرفتن معیارهای گسیختگی مختلف، قابلیت مدل‌سازی بارهای ضربه‌ای و انفجاری بتن را دارا می‌باشند [۱۶]. مدل‌های ماده ذکر شده در بالا از آن جهت که رفتار ترد بتن را پیش‌گویی می‌کنند، می‌توانند مفید واقع شوند. ولی از جمله ضعف این مدل‌ها این است که: اولاً رفتار نرم شوندگی غیرخطی بتن الیافی را پس از شروع تسلیم نمی‌توانند مدل کنند و ثانیاً این مدل مواد دارای پارامترهای زیادی هستند که به دست آوردن این پارامترها نیاز به انجام آزمایش‌های مختلف دارد و با آزمایش‌های مادی ساده (آزمون کشش و فشار تک‌محوری) به دست نمی‌آیند.

در نتیجه در این مقاله برای مدل‌سازی سرعت نفوذ بالای پرتابه و هدف، از مدل ماده الاستیک-پلاستیک هیدرو دینامیک، که مدل ماده شماره ۱۰ نرم‌افزار ال‌اس-دایناسا می‌باشد، استفاده شده است. خصوصیت این مدل ماده این است که اولاً رفتار نرم شوندگی غیرخطی بتن الیافی را با دادن مقادیر تنش مؤثر برحسب کرنش مؤثر پس از شروع تسلیم، به خوبی مدل می‌کند و ثانیاً تمامی پارامترهای مورد نیاز برای مشخص

حال معادله تحلیلی تغییرات سرعت اصلاح شده نسبت به سرعت اولیه پرتابه را برحسب سرعت باقیمانده و عمق نفوذ پرتابه داخل بتن مسلح به الیاف فولادی را می‌توان به صورت رابطه بی بعد زیر مشاهده کرد:

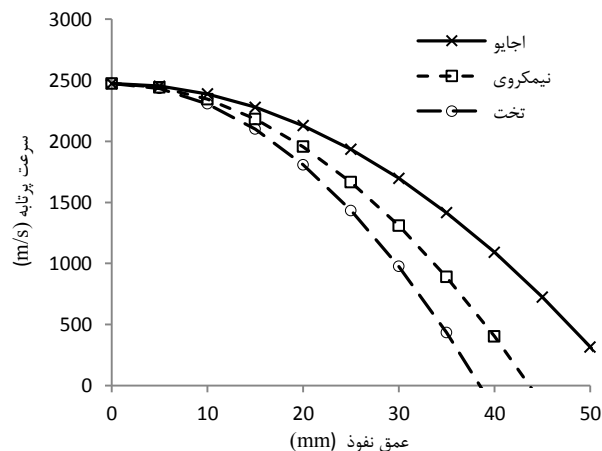
$$\frac{V}{V_i} = \alpha \cdot \left(\frac{V_r}{V_i} - 1 \right) \cdot \left(\frac{X}{H} \right)^2 + 1 \quad (14)$$

در جدول (۲) مقادیر هر یک از روابط (۱۱) الی (۱۳) را می‌توان برای بتن مسلح به ۱/۵٪ حجمی الیاف فولادی مشاهده کرد. همچنین نمودار تغییرات سرعت پرتابه با شکل‌های مختلف برحسب عمق نفوذ در اهداف بتنی که با استفاده از رابطه (۱۴) به دست آمده، در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول ۲- مقادیر ضرایب ثابت مادی، شاخص تقویت و ضریب تصحیح

آلفا برای ۱/۵٪ حجمی الیاف فولادی در ماتریس بتن.

شکل پرتابه	$\frac{l_p}{d_p}$	$\frac{l_f}{d_f}$	$\frac{\rho_p}{\rho_t}$	β	RI	α
اجایو	۰/۹	۶۰	۳/۴۹	۱/۷۷	۰/۹	۴/۴۲
نیمکروی	۰/۷	۶۰	۳/۴۹	۱/۴۶	۰/۹	۳/۴۲
تخت	۰/۵	۶۰	۳/۴۹	۱/۲۹	۰/۹	۲/۴۵



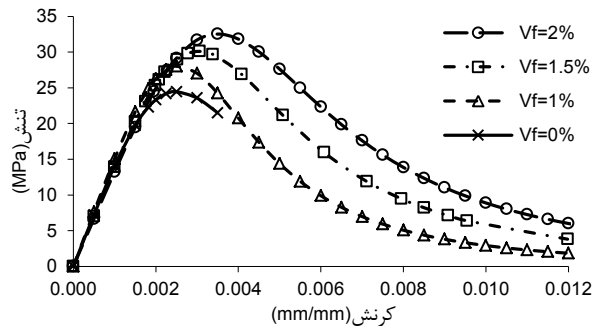
شکل ۴- نمودار تحلیلی تغییرات سرعت پرتابه برحسب عمق نفوذ در اهداف بتنی مسلح به الیاف فولادی با استفاده از رابطه (۱۴).

۳- شبیه سازی

در بیشتر مسائل ضربه در سرعت‌های بالا تانسور تنش یک ماده به دو بخش انحرافی و هیدرو استاتیکی تقسیم بندی می‌شود. بخش تانسور تنش انحرافی مربوط به مقاومت ماده در برابر تغییر شکل‌های برشی می‌باشد. بخش تانسور تنش هیدرو استاتیکی بیان‌کننده یک معادله حالت با توجه به سرعت بارگذاری می‌باشد زیرا در سرعت‌های بالای

- 1- Winfrith Concrete
- 2- CEB
- 3- Pseudo Tensor Concrete
- 4- Concrete Damage Model
- 5- Equation of State (EOS)
- 6- Brittle Damage Model

مشخص است که استفاده از الیاف در ماتریس بتن باعث افزایش مساحت ناحیه نرم شوندگی بتن الیافی در مقایسه با بتن ساده می‌شود. در رابطه فوق f_c و \mathcal{E}_c به ترتیب مقاومت فشاری و کرنش متناظر مقاومت فشاری بتن الیافی می‌باشد. مقدار β نیز به که عنوان پارامتر مادی نامیده می‌شود، از رابطه (۱۱) قابل محاسبه است. همچنین f_{cf} و \mathcal{E}_{cf} بیان کننده مقادیر تنش و کرنش فشاری منحنی شکل (۶) می‌باشد.



شکل ۶- دیاگرام تنش-کرنش از تست فشار تک‌محوری برای بتن ساده و بتن الیافی.

همچنین به علت فشار بالای حاصل در منطقه برخورد و برای ارتباط بین تغییر حجم و چگالی با فشار اعمال شده از معادله حالت مای-گرونایزن^[۱۷]، برای مواد منبسط شده تحت تأثیر ضربه وارده که در رابطه (۱۶) نشان داده شده است، استفاده می‌شود.

$$p = \rho_0 C_0^2 \mu + \gamma_0 E_{in} \quad (16)$$

$$\mu = \frac{V_0}{V} - 1 \quad (17)$$

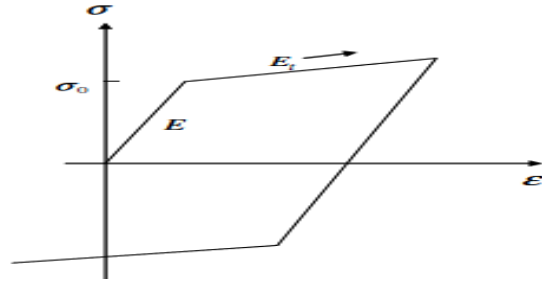
$$C_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-2\nu)}} \quad (18)$$

در حالتی که شدت بارگذاری بالا باشد از رابطه فشار شوک هوگونویوت^۲ برحسب حجم مخصوص ماده استفاده می‌شود. رابطه غیرخطی بین سرعت موج شوک U_s ، برحسب سرعت ذرات U_p ، عبارت است از:

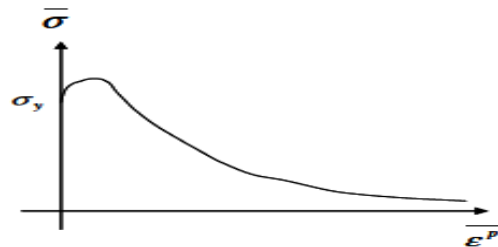
$$U_s = C_0 + S_1 U_p + S_2 \left(\frac{U_p}{U_s}\right) U_p + S_3 \left(\frac{U_p}{U_s}\right)^2 U_p \quad (19)$$

که در آن μ نسبت حجمی، E_{in} انرژی داخلی، C_0 سرعت حجمی صوت، K مدول حجمی، γ_0 ثابت گرونایزن است و S_1, S_2, S_3 ضرایب شیب منحنی $U_s - U_p$ است. در این تحقیق از رابطه خطی معادله (۱۹) استفاده شده است. در جداول (۳) و (۴)، می‌توان پارامترهای مربوط به خصوصیات مادی [۱۱] و معادله حالت در ناحیه الاستیک برای پرتابه و اهداف بتنی، را مشاهده کرد. لازم به توضیح است که ضرایب معادله حالت توسط تست‌های تجربی ضربه پرتابه فلزی [۱۸] و هدف بتنی [۱۹] به دست آمده است.

کردن خصوصیات این مدل ماده با آزمون ساده فشار تک‌محوری به دست می‌آید. این مدل ماده همانند شکل (۵-الف) در حالت ساده به صورت یک منحنی دوخطی الاستیک - پلاستیک، تنش برحسب کرنش برای بیشتر فلزات می‌باشد. همچنین این مدل ماده را می‌توان برای پیش‌گویی رفتار نرم شوندگی غیرخطی اهداف بتنی مسلح به الیاف فولادی، با دادن ۱۶ نقطه تنش مؤثر، برحسب کرنش پلاستیک مؤثر، همانند شکل (۵-ب) استفاده کرد. برای تعیین خصوصیات بتن الیافی که به عنوان پارامترهای ورودی باید به نرم افزار داد، از آزمون فشار تک‌محوری و آزمون کشش غیرمستقیم استفاده می‌شود.



الف



ب

شکل ۵- (الف) منحنی تنش - کرنش دوخطی الاستیک - پلاستیک، (ب) منحنی نرم شوندگی تنش مؤثر برحسب کرنش پلاستیک مؤثر.

در تحقیقات اخیر روابط تجربی متعددی برای نمودار تنش - کرنش بتن مسلح به الیاف فولادی تحت بارگذاری فشاری توسط محققین ارائه شده است. یکی از این تحقیقات در سال ۱۹۹۹ میلادی توسط آقای ناتاراج [۱۳] می‌باشد. این رابطه که با استفاده تست فشار تک‌محوری بر روی نمونه‌های بتنی استوانه‌ای به ابعاد 100×200 میلی‌متر که مسلح به الیاف فولادی برای درصد‌های مختلف حجمی الیاف ارائه شده است به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{f_{cf}}{f_c} = \frac{\beta \left(\frac{\mathcal{E}_{cf}}{\mathcal{E}_c}\right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\mathcal{E}_{cf}}{\mathcal{E}_c}\right)\beta} \quad (15)$$

با به کار بردن رابطه فوق می‌توان نمودار کامل تنش - کرنش را از تست فشار تک‌محوری برای بتن ساده و بتن الیافی برای درصد‌های مختلف حجمی الیاف فولادی همانند شکل (۶) رسم کرد.

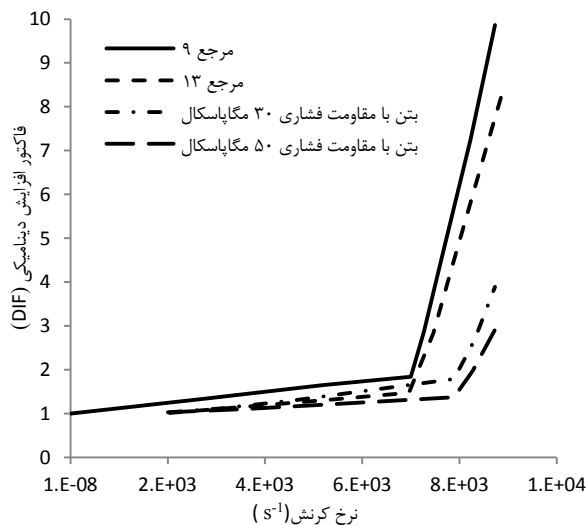
جدول ۳- پارامترهای خواص مادی پرتابه فولادی و نمونه‌های بتنی [۱۱]

پارامتر	نماد (واحد)	پرتابه	بتن تقویت‌شده به الیاف فولادی		
			%۱	%۱/۵	%۲
چگالی	ρ (kg/m ³)	۷۸۷۰	۲۴۷۰	۲۳۵۰	۲۳۶۰
مدول برشی	G (GPa)	۷۷/۵	۵۵/۳۰	۵۹/۲۴	۶۳/۱۵
تنش تسلیم	σ_y (MPa)	۵۰۰	۲۷/۴۳	۲۵/۲۹	۲۴/۶۳
مقاومت فشاری	f'_c (MPa)	-	۳۲/۵۲	۳۰/۱	۲۸/۰۳
مدول الاستیسیته	E (GPa)	۲۰۷	۱۳/۱۶	۱۴/۱۰	۱۴/۹۰
ضریب پواسون	ν	۰/۳	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۸
مقاومت کششی استاتیکی	f_t (MPa)	-	۵/۰۲	۴/۰۱	۳/۶۰
مدول سخت شوندگی	E_h (GPa)	۴/۲	-	-	-

جدول ۴- ضرایب معادله حالت پرتابه فولادی [۱۸] و نمونه‌های بتنی [۱۹]

پارامتر	نماد (واحد)	پرتابه	بتن تقویت‌شده به الیاف فولادی		
			%۱	%۱/۵	%۲
سرعت حجمی صوت	C_0 (m/s)	۴۵۷۰	۱۶۹۲/۵	۱۷۹۶/۰	۱۸۱۳/۶
ضریب اول هوگونیت	S_1	۱/۴۹	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰
ثابت گرونایزن	γ_0	۲/۱۷	-	-	-

ثانیه به هدف بتنی اصابت می‌کنند. هر یک از پرتابه‌ها به صورت تقارن محوری^۳ با ۱۹۲ المان و با سایز ۰/۹۳۵ میلی‌متر شبکه بندی شده‌اند. قابل ذکر است که برای ثابت ماندن جرم و قطر تمام پرتابه‌ها در شبیه‌سازی، نسبت بی‌بعد طول به قطر برای پرتابه‌های تخت، نیم‌کروی و اجایو به ترتیب ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ می‌باشد.



شکل ۷- نمودار تغییرات فاکتور افزایش دینامیکی برحسب اثرات نرخ کرنش در سازه‌های بتنی [۹]

در تحقیق حاضر به خاطر آن که سرعت بارگذاری فوق‌العاده بالاست، باید اثرات نرخ کرنش مدنظر قرار گیرد. زیرا نرخ کرنش بر روی مقاومت ماده به خصوص مقاومت کششی اثرگذار است. نرخ کرنش در سازه‌های بتنی به جرم و سرعت ضربه پرتابه بستگی دارد [۲۰]. اثرات نرخ کرنش در سازه‌های بتنی را می‌توان با استفاده از فاکتور افزایش دینامیکی^۱، که عبارت است از نسبت مقاومت کششی دینامیکی به مقاومت کششی استاتیکی بیان کرد. طبق تحقیقات انجام گرفته توسط محققین همانند شکل (۷) می‌توان برای نرخ کرنش‌های کمتر از $10^2 s^{-1}$ مقدار فاکتور افزایش دینامیکی را عدد ۱/۵ در نظر گرفت [۶-۹]. بنابراین با داشتن مقدار فاکتور افزایش دینامیکی و مقاومت کششی استاتیکی که از تست کشش غیرمستقیم به دست می‌آید، می‌توان مقاومت کششی دینامیکی نمونه‌های بتنی را به دست آورد و از آن به عنوان معیار گسیختگی کششی نمونه‌های بتنی استفاده کرد.

در این تحقیق برای مدل‌سازی هندسی و ایجاد شبکه مش بندی از پیش پردازشگر اف ای ام بی^{۲۸} استفاده شده است. پرتابه و نمونه بتنی به صورت دوبعدی و تقارن محوری با یک نقطه انتگرال‌گیری مدل‌سازی شده‌اند. همچنین حل مساله به روش لاگرانژی صورت گرفته است. پرتابه‌های فلزی همانند شکل (۸) که دارای سر نفوذ گر به شکل‌های تخت، نیم‌کروی و اجایو هستند، دارای جرم تقریبی ۴۵ گرم و شعاع سر ۱۲/۳ میلی‌متر می‌باشند و با سرعت تقریبی ۲۴۷۴ متر بر

استفاده کرد. که این مقدار برای پرتابه و نمونه‌های بتنی به ترتیب ۰/۹ و ۰/۴ می‌باشد. برای نمونه‌های بتنی از معیار گسیختگی به وسیله امواج کششی، که همان مقاومت کششی دینامیکی بتنی است، همانند جدول (۶) استفاده شده است.

جدول ۵- مقادیر پارامترهای مختلف برای تعریف فاکتور تیزی سر پرتابه

پرتابه	قطر (mm)	طول (mm)	نسبت طول به قطر	کالیبر سر پرتابه	ضریب تیزی
اجایو	۲۴/۶	۲۱/۳	۰/۹	۱/۰	۰/۳
نیم-کروی	۲۴/۶	۱۶/۳	۰/۷	۰/۵	۰/۵
تخت	۲۴/۶	۱۲/۲	۰/۵	۰/۵	۰/۵

جدول ۶- معیار فرسایش برای المان‌های پرتابه و نمونه‌های بتنی

معیار فرسایش	پرتابه	نمونه‌های بتنی		
		۱٪	۱۱/۵٪	۲٪
بیشینه تنش کششی (MPa)	-	۵/۴۰	۶/۰۱۵	۷/۵۳
کرنش شکست	۰/۹	۰/۴		

۴- نتایج و بحث

در شکل (۱۰) تاریخچه زمانی سرعت پرتابه‌ها با شکل‌های مختلف در هنگام نفوذ در اهداف بتنی با درصدهای حجمی مختلف نمایش داده شده است. واضح است که پرتابه‌ها تقریباً با شتاب ثابتی در اهداف نفوذ می‌کنند و پس از عبور پرتابه از هدف، سرعت پرتابه به صورت یک خط مستقیم ثابت می‌ماند (سرعت باقی‌مانده).

در شکل (۱۱) مقایسه‌ای بین حل عددی و نتایج تجربی [۱۱] بر روی سرعت باقی‌مانده پرتابه با شکل نیم کروی در اثر نفوذ در اهداف بتنی با درصدهای حجمی مختلف الیاف فولادی انجام گرفته است. حداکثر اختلاف بین حل عددی و نتایج آزمایشگاهی برابر با ۸٪ است. هر دوی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی، مقاومت در برابر نفوذ پرتابه در اهداف بتنی بیشتر می‌شود و سرعت پرتابه در خروج از هدف کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل (۹)، نمونه بتنی به صورت تقارن محوری با شعاع ۲۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و با تعداد المان‌های ۲۰۰×۸۰ و مجموعاً ۱۶۰۰۰ المان با سایز ۱/۲۵ میلی‌متر برای رسیدن به دقت جواب مناسب، شبکه‌بندی شده‌اند.

یکی از معیارهای مهم در تقسیم‌بندی پرتابه‌ها، ضریب تیزی سر پرتابه^۱ می‌باشد که فرمول‌های تجربی مختلفی برای تیزی سر پرتابه‌ها ارائه شده است. در روابط (۲۰) و (۲۱) این ضریب برای پرتابه‌های اجایو، نیم‌کروی و تخت ذکر شده است [۹]:

$$N_{ogive}^* = \frac{1}{3\phi} - \frac{1}{24\phi^2} \quad (20)$$

$$N_{hemi}^* \& N_{flat}^* = 1 - \frac{1}{8\phi^2} \quad (21)$$



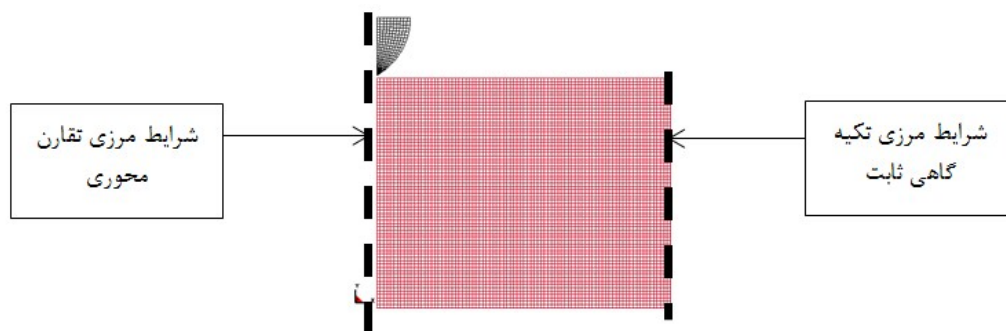
شکل ۸- پرتابه‌های فلزی به صورت تقارن محوری با سر نفوذ گر به

ترتیب از راست به چپ به شکل: اجایو، نیم کروی و تخت.

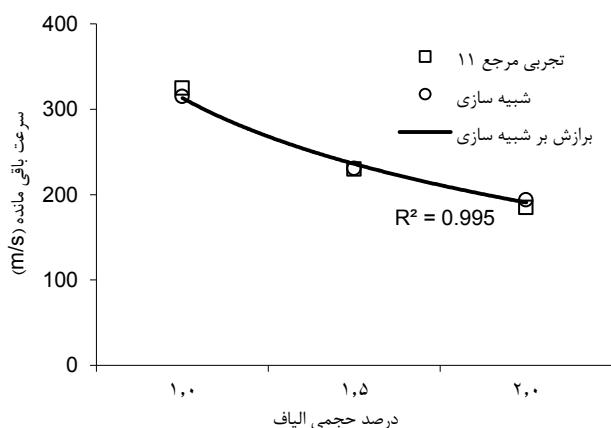
در جدول (۵) می‌توان مقادیر پارامترهای مختلف برای تعریف فاکتور تیزی سر پرتابه را مشاهده کرد. با توجه به جدول مشخص است که هرچه فاکتور تیزی سر پرتابه کمتر باشد، سر پرتابه تیزتر است. که این موضوع در نتایج حاصل از شبه‌سازی بررسی شده است.

برای آن‌که بتوان اثر الیاف را در رفتار ضربه‌ای بتن مدل کرد، تنها راه‌حل استفاده از گزینه خرابی المان‌ها^۲ به عنوان معیار شکست مادی ماتریس بتن می‌باشد [۱۱]. با استفاده از نتایج تجربی از معیارهای بیشینه کرنش برشی^۳ در شکست برای پرتابه و هدف بتنی و از معیار بیشینه تنش کششی^۴ در شکست برای هدف بتنی به منظور نحوه گسیختگی هدف در اثر لایه‌لایه شدن^۵ در سطوح زیری هدف و خرد شدن هدف در سطح بالایی نمونه در نرم‌افزار استفاده شده است. هنگامی که کرنش مؤثر پلاستیک یا تنش کششی در المان‌ها به مقادیر بحرانی خود برسند، المان موردنظر پاک می‌شود. برای مشخص کردن نقش واقعی الیاف در بیرون کشیده شدن از ماتریس بتن می‌توان از معیار کرنش پلاستیک در شکست به عنوان معیار خرابی المان‌ها

- 1- Nose Shape Factor
- 2- Erosion
- 3- Shear Strain Failure
- 4- Tensile Cut-Off Failure
- 5- Scabbing



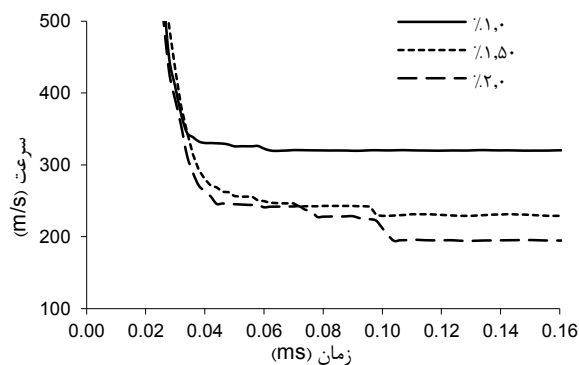
شکل ۹- شبکه مش بندی دوبعدی تقارن محوری پرتابه و هدف.



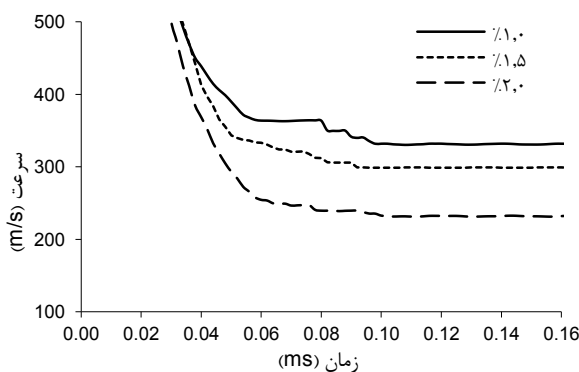
شکل ۱۱- مقایسه سرعت باقی مانده پرتابه با شکل نیم کروی در اثر نفوذ در اهداف بتنی با درصد های حجمی مختلف الیاف فولادی.

با استفاده از نتایج شبیه سازی از تلفیق نمودارهای جایجایی بر حسب زمان و سرعت بر حسب زمان و در نهایت حذف پارامتر زمان، می توان همانند شکل (۱۲)، نمودار تغییرات سرعت پرتابه بر حسب عمق نفوذ در اهداف بتنی با درصد حجمی الیاف مختلف برای پرتابه هایی با شکل های مختلف مشاهده نمود. مشخص است که نمودار تغییرات سرعت پرتابه بر حسب عمق نفوذ در هدف به صورت یک منحنی درجه دوم هست. این موضوع فرض خطی بودن کاهش شتاب پرتابه در داخل هدف را که اساس کار تحلیلی تحقیق است را به خوبی نشان می دهد. همچنین مشخص است که در سرعت های نفوذ یکسان، راندمان نفوذ پرتابه با شکل دماغه اجایو که ضریب تیزی آن $0/3$ می باشد، بیشتر از پرتابه های نیمکروی و تخت است.

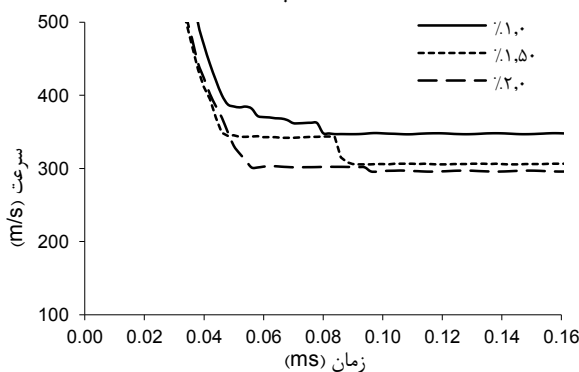
در شکل های (۱۳) و (۱۴) کانتورهای کرنش مؤثر پلاستیک و تنش مؤثر در حین نفوذ پرتابه با سر نیم کروی در هدف و مکانیزم شکل گیری ترک و گسیختگی نمونه بتنی با به کار بردن $1/5\%$ حجمی الیاف، در زمان های ۲۶، ۵۲، ۸۸ و ۲۳۰ میکروثانیه قابل مشاهده است. اولین پدیده های خرد شدن نمونه بتنی (ناحیه شکل گیری حفره)، از سطح رویی نمونه در زمان ۲۶ میکروثانیه اتفاق می افتد. هنگامی که موج تنش فشاری در زمان ۵۲ میکروثانیه به سطح زیرین نمونه می رسد، به صورت امواج کششی منعکس



الف

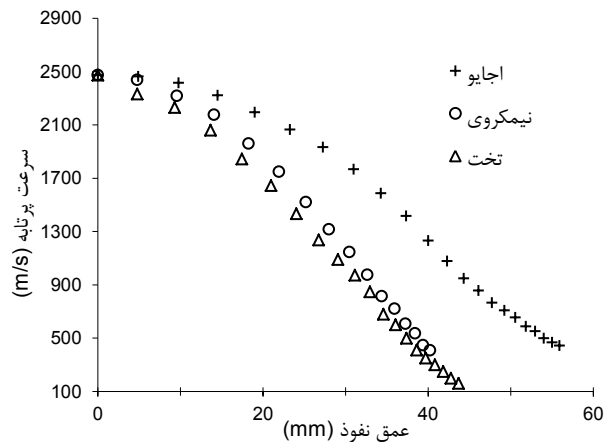


ب

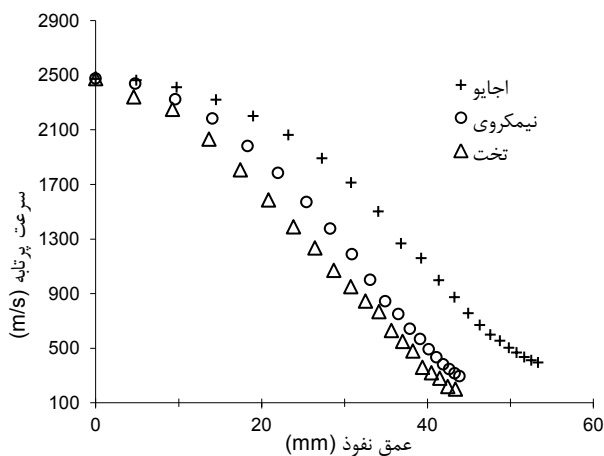


ج

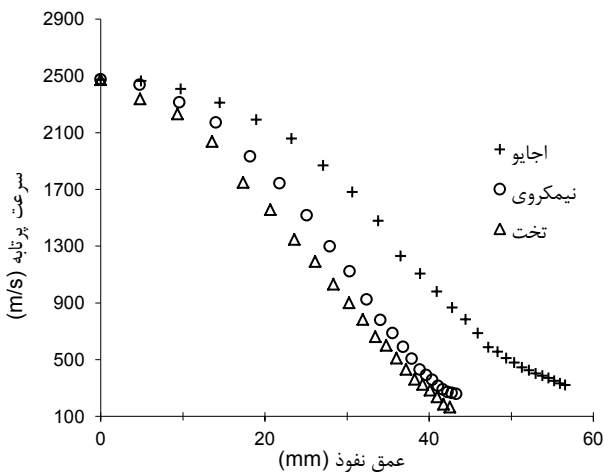
شکل ۱۰- تاریخچه زمانی سرعت پرتابه با سر نفوذگر: الف) نیم کروی، ب) تخت، ج) اجایو، در اهداف بتنی با درصد های حجمی مختلف الیاف فولادی.



الف



ب



ج

شکل ۱۲- نمودار تغییرات سرعت پرتابه برحسب عمق نفوذ در اهداف بتنی با درصد حجمی الیاف: الف) ۱٪، ب) ۱/۵٪، ج) ۲٪.

می‌شود و در این لحظه پدیده پوسته پوسته شدن از سطح زیرین نمونه اتفاق می‌افتد. در زمان ۸۸ میکروثانیه هیچ گونه مقاومتی در برابر نفوذ پرتابه وجود ندارد و پرتابه با سرعت باقی مانده ۲۳۱ متر بر ثانیه از هدف عبور می‌نماید. در زمان ۲۳۰ میکروثانیه شکل نهایی گسیختگی برای پرتابه و نمونه بتنی قابل مشاهده است.

در شکل (۱۵) سرعت باقی مانده هر پرتابه با شکل های مختلف، در اثر نفوذ در اهداف بتنی با درصد های حجمی مختلف را می‌توان ملاحظه کرد. مشخص است که پرتابه اجایو که ضریب تیزی سر آن از پرتابه های دیگر کمتر است، کارایی بیشتری در حین نفوذ کامل داخل هدف دارد و پرتابه های نیمکروی و سر تخت تقریباً رفتار مشابهی در حین پدیده نفوذ دارند. همچنین با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی به طور متوسط تا ۴۰٪ سرعت باقی مانده کاهش می‌یابد.

در شکل (۱۶) قطر ناحیه پوسته پوسته شده (سطح زیرین) و قطر ناحیه ایجاد حفره (سطح بالایی)، اهداف بتنی با درصد های حجمی مختلف در اثر نفوذ پرتابه با شکل های مختلف در اهداف بتنی را می‌توان ملاحظه کرد. مشخص است که به علت رفتار ترد هدف، تخریب سطح زیرین ناحیه بتنی به دلیل ایجاد موج انعکاسی تنش کششی بیشتر از تخریب سطح بالایی هدف بتنی می‌باشد و با استفاده از الیاف فولادی که باعث شکل پذیری نمونه‌ها می‌شود، به طور متوسط تا ۲۰٪ سطح تخریب اهداف بتنی کاهش می‌یابد و الیاف فولادی توانسته‌اند به عنوان تقویت کننده، نقش خود را در جذب انرژی حاصل از ضربه وارده تا حد خوبی ایفا کنند.

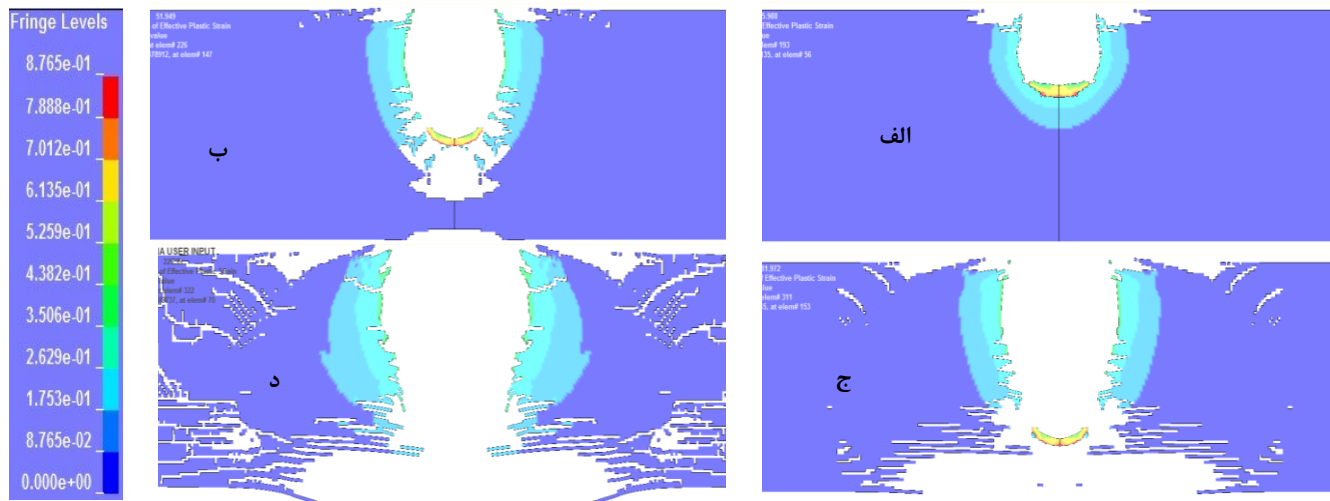
همچنین از روابط آزمایشگاهی یو-ام-ای-اس-تی^۱ [۱۰] که برای اهداف بتنی ساده ارائه شده، با توجه به شکل (۱۷) می‌توان مقدار بی بعد عمق نفوذ^۲ را برای پرتابه اجایو بر حسب نسبت بی بعد انرژی جنبشی بر واحد مقاومت دینامیکی^۳ هدف که از روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه می‌باشد، را ارزیابی کرد. مشخص است که نتایج حاصل از شبه سازی با نتایج عملی دقت خوبی دارد و در صورت نبود داده های تجربی برای بتن های الیافی، می‌توان از این روابط به عنوان یک تقریب نسبتاً خوب در زمینه محاسبه عمق نفوذ استفاده کرد.

در شکل (۱۸) مقایسه بین حل تحلیلی از رابطه (۱۴) و نتایج حاصل از شبه سازی در زمینه تغییرات سرعت پرتابه با شکل های مختلف بر حسب عمق نفوذ، در اهداف بتنی مسلح به ۱/۵٪ حجمی الیاف فولادی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که حل تحلیلی ارائه شده در این مقاله، تطابق خوبی با نتایج حاصل از شبه سازی دارد. باید توجه داشت که در شبه سازی عددی فرآیند حذف المان ها با رسیدن به حد بحرانی خود اتفاق می‌افتد که این امر باعث ایجاد خطا بین حل تحلیلی و حل عددی می‌گردد.

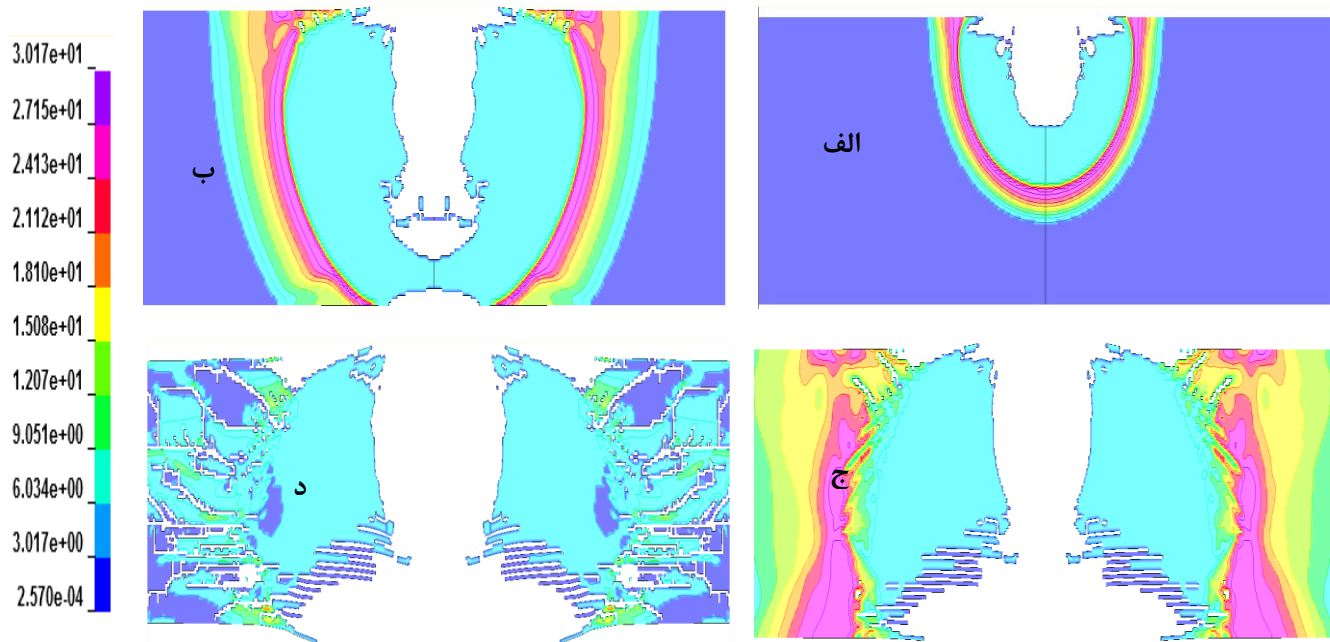
1- UMIST

2- Normalized Depths of Penetration

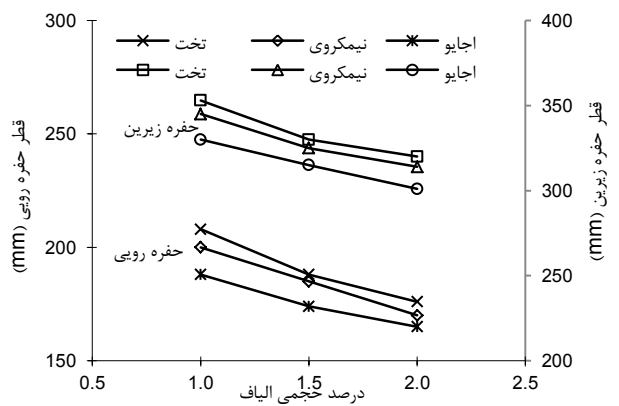
3- Kinetic Energy Per Unit of Dynamic Strength



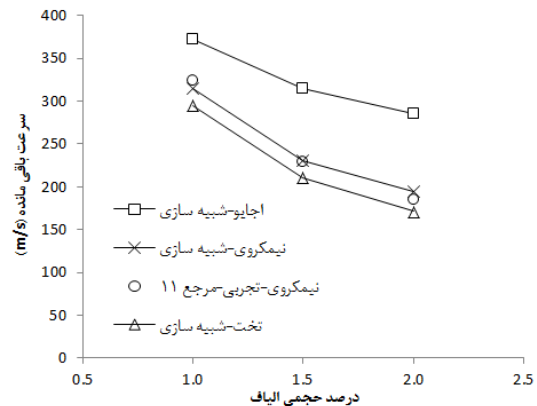
شکل ۱۳- کانتور کرنش مؤثر پلاستیک در نمونه بتنی با ۱/۵٪ حجمی الیاف، در زمان: الف) ۲۶، ب) ۵۲، ج) ۸۸، د) ۲۳۰ میکروثانیه.



شکل ۱۴- کانتور تنش مؤثر در نمونه بتنی با ۱/۵٪ حجمی الیاف، در زمان: الف) ۲۶، ب) ۵۲، ج) ۸۸، د) ۲۳۰ میکروثانیه.



شکل ۱۶- قطر ناحیه پوسته شده در سطح زیرین و قطر ناحیه ایجاد حفره در سطح بالایی اهداف بتنی.

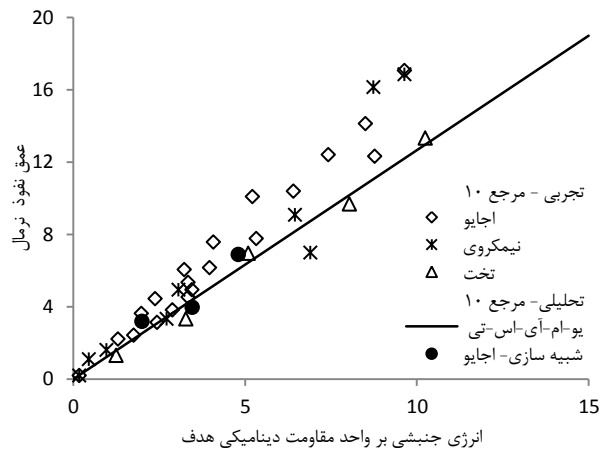


شکل ۱۵- نمودار سرعت باقی مانده پرتابه با شکل های مختلف در اثر نفوذ در اهداف بتنی با درصد های حجمی مختلف.

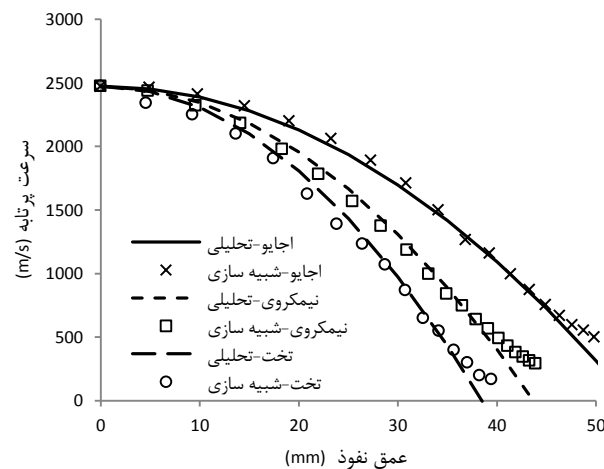
اجایو در نفوذ کامل در بتن می باشد. در واقع با کاهش فاکتور تیزی سر پرتابه ها از ۰/۵ به ۰/۳ و یا افزایش نسبت طول به قطر پرتابه از ۰/۵ به ۰/۹، برای پرتابه به شکل های تخت، نیم کروی و اجایو، سرعت باقی مانده افزایش می یابد. به عبار دیگر در سرعت های نفوذ یکسان، راندمان نفوذ پرتابه با شکل دماغه اجایو، بیشتر از پرتابه های نیم کروی و تخت است. به عنوان مثال با توجه به شکل (۱۸) در عمق نفوذ ۳۰ میلی متر مقدار سرعت باقی مانده پرتابه ها به شکل تخت، نیم کروی و اجایو به ترتیب برابر ۸۷۰، ۱۱۹۰ و ۱۷۰۰ متر بر ثانیه می باشد. مشخص است که با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی از ۱ تا ۲ درصد در ماتریس بتن، میزان جذب انرژی داخلی در اهداف به طور نسبی افزایش می یابد و قطر ناحیه پوسته شده در سطح زیرین و قطر حفره ایجاد شده در سطح فوقانی هدف به طور متوسط تا ۲۰ درصد کاهش می یابد و الیاف فولادی توانسته اند به عنوان تقویت کننده، نقش خود را در جذب انرژی حاصل از ضربه وارده تا حد خوبی ایفا کنند. همچنین با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی به طور متوسط تا ۴۰٪ سرعت باقی مانده کاهش می یابد.

۶- فهرست علائم

d	قطر پرتابه، mm
E	مدول الاستیسیته، N/m ²
E _c	حد بحرانی انرژی حاصل از ضربه برای ایجاد ترک مخروطی، J
E _p	حد بحرانی انرژی حاصل از ضربه برای پدیده نفوذ کامل، J
E _k	انرژی جنبشی پرتابه، J
E _s	حد بحرانی انرژی حاصل از ضربه برای ایجاد پدیده لایه شدن، J
F	نیروی متوسط مقاوم، N
P	عمق نفوذ، mm
P _d	نسبت بی بعد عمق نفوذ
V _i	سرعت اولیه پرتابه، m/s
f _c	مقاومت فشاری بتن، MPa
L	طول پرتابه، mm
M	جرم پرتابه، kg
N*	فاکتور تیزی سر پرتابه
علائم یونانی	
ρ	چگالی، kg/m ³
φ	کالیبر سر پرتابه
σ _t	مقاومت دینامیکی، MPa
زیرنویس ها	
ogive	اجایو
hemi	نیم کروی
flat	تخت



شکل ۱۷- مقایسه شبیه سازی با کار تجربی مقدار بی بعد عمق نفوذ بر حسب نسبت بی بعد انرژی جنبشی بر واحد مقاومت دینامیکی هدف.



شکل ۱۸- مقایسه حل عددی و تحلیلی تغییرات سرعت پرتابه در حین نفوذ.

۵- نتیجه گیری

نوآوری این تحقیق در ارائه مدل ساده تحلیلی نفوذ پرتابه در اهداف بتنی مسلح به الیاف فولادی است که می تواند ضرایب تاثیر درصد حجمی الیاف فولادی و نسبت ظاهری الیاف و نسبت ظاهری شکل پرتابه را بر روی عمق نفوذ بتن الیافی نشان دهد. استفاده از روش حل عددی و صحنه سنجی آن با حل تحلیلی رویکردی است که می تواند از نظر کاهش هزینه های آزمایشگاهی تا حد زیادی مفید واقع شود. با توجه به نمودارهای استخراج شده از حل تحلیلی و حل عددی می توان، تغییرات سرعت پرتابه بر حسب عمق نفوذ در اهداف بتنی را به صورت منحنی سهمی شکل همانند رابطه (۱۴) در نظر گرفت. بیشترین و کمترین درصد کاهش سرعت پرتابه به ترتیب مربوط به پرتابه با سر نیم کروی و سر اجایو می باشد. که به معنی کارایی بیشتر پرتابه با سر

مراجع

- [11] Teng, T. L.; Chu, Y. A.; Chang, F. A.; Shen, B. C.; Cheng, D. S. "Development and Validation of Numerical Model of Steel Fiber Reinforced Concrete for High-Velocity Impact"; *Comp. Mater. Sci.* 2008, 42, 90-99.
- [12] Alavi Nia, A.; Hedayatian, M.; Nili, M.; Afrough Sabet, V. "An Experimental and Numerical Study on How Steel and Polypropylene Fibers Affect the Impact Resistance in Fiber-Reinforced Concrete"; *Int. J. Impact Eng.* 2012, 46, 62-73.
- [13] Nataraja, M.C.; Dhang, N.; Gupta, A. P. "Stress-Strain Curves for Steel-Fiber Reinforced Concrete under Compression"; *Cement Concr. Compos.* 1999, 21, 383-390.
- [14] Quan, X.; Birnbaum, N. K.; Cowler, M. S.; Gerber, B. I.; Clegge, R. A.; Hayhurst, C. J. "Numerical Simulation of Structural Deformation Under Shock and Impact Loads Using a Coupled Multi-Solver Approach"; In *Proc. of the 5th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures*, 2003.
- [15] Johnson, G. R.; Cook, W. H. "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures"; *Eng. Fract. Mech.* 1985, 21, 31-48.
- [16] Hallquist, J. O. "LS-DYNA Theory Manual"; Livermore Software Technology Corporation, California, 2006.
- [17] Steinberg, D. J. "Equation of State and Strength Properties of Selected Materials"; Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA, 1991.
- [18] Marsh, S. P. "LASL Shock Hugoniot Data"; University of California, 1980.
- [19] Gebbeken, N.; Greulich, S.; Pietzsch, A. "Hugoniot Properties for Concrete Determined by Full-Scale Detonation Experiments and Flyer-Plate-Impact Tests"; *Int. J. Impact Eng.* 2006, 32, 2017-2031.
- [20] Leppanen, C. "Concrete Subject to Fragment Impacts"; Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2004.
- [1] Gao, J.; Sun, W.; Morino, K. "Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced High-Strength Lightweight Concrete"; *Cem. Concr. Compos.* 1997, 19, 307-313.
- [2] Jianhua, W.; Jun, L.; Haiping, Y. "The Study on Steel Fiber Reinforced Concrete Under Dynamic Compression By Damage Mechanics Method"; *Chem. Pharm. Bull.* 2014, 6, 1759-1767.
- [3] Miamoto, A.; Nakamura, H. "Visualization of Impact Failure Behavior for RC Slab"; In *Proc. of the 3rd International Conference on Concrete Under Severe Condition*, UBC, 2001, 129-138.
- [4] Farnam, Y. "Experimental and Simulation Study of the Impact of High Strength Fibrous Concrete Panels"; Ph.D. Thesis, Tehran University, Tehran, 2010.
- [5] Tokgoz, S.; Dundar, C.; Tanrikulu, A. K. "Experimental Behavior of Steel Fiber High Strength Reinforced Concrete and Composite Columns"; *J CONSTR STEEL RES*, 2012, 74, 98-107.
- [6] Zhang, X. X.; Abd Elazim, A. M.; Ruiz, G.; Yu, R. C. "Fracture Behavior of Steel Fibre-Reinforced Concrete at a Wide Range of Loading Rates"; *Int. J. Impact Eng.* 2014, 71, 89-96.
- [7] Sovják, R.; Vavřiník, T.; Máca, P.; Zatloukal, J.; Konvalinka, P. "Experimental Investigation of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete Slabs Subjected to Deformable Projectile Impact"; In *Proc. of the 6th International Conference on Concrete and Concrete Structures*, 2013, 65, 120-125.
- [8] Nyström, U.; Gylltoft, K. "Comparative Numerical Studies of Projectile Impacts on Plain and Steel-Fibre"; *Int. J. Impact Eng.* 2011, 38, 95-105.
- [9] Li, Q. M.; Reid, S. R.; Wen, H. M.; Telford, A. R. "Local Impact Effects of Hard Missiles on Concrete Targets"; *Int. J. Impact Eng.* 2005, 32, 224-284.
- [10] Wen, H. M.; Xian, Y. X. "A Unified Approach for Concrete Impact"; *Int. J. Impact Eng.* 2015, 77, 84-96.