

## مدل سازی تحلیلی و عددی پرتابه های فرسایشی در اهداف تقویت شده بتنی به الیاف فولادی

مهدی هدایتیان<sup>۱</sup>، خداداد واحدی<sup>۲\*</sup>

\* نویسنده مسئول: khvahedi@ihu.ac.ir

### واژه‌های کلیدی

پرتابه های فرسایشی، نفوذ، بتن تقویت شده، الیاف فولادی، مقاومت ضربه ای

تاریخ ارسال: ۹۴/۰۷/۱۸

تاریخ بازنگری: ۹۴/۱۰/۰۴

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۰۸

### چکیده

در این مقاله به ارائه یک مدل تحلیلی فرآیند نفوذ پرتابه های فرسایشی در بتن تقویت شده به الیاف فولادی<sup>۳</sup> پرداخته شده است. نوآوری مدل تحلیلی ارائه شده در آن است که تاثیر 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 غیر خطی ال اس داین<sup>۴</sup> با روش حل لاگراتژی 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 نفوذ گرنیم کروی، تخت و اجابو 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 دقیق رفتار پرتابه فلزی و بتن الیافی در سرعت های بارگذاری خیلی بالا از مدل ماده الاستیک - پلاستیک هیدرودینامیک<sup>۵</sup> و برای ارتباط بین کرنش حجمی، تنش هیدرواستاتیکی و مدول بالک در سرعت های بالا از معادله حالت مای گرونایزن استفاده شده است. پس از صحت سنجی مدل تحلیلی نفوذ با فرآیند شبیه سازی و کار آزمایشگاهی، نتایج نشان می دهد که پرتابه های با سر نفوذ گرنیم که فاکتور تیزی سر پرتابه پائینی 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 اجابو، سرعت باقی مانده افزایش می یابد. همچنین با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی در ماتریس بتن میزان تخریب سطح ناحیه رویی و زیرین بتن الیافی کاهش می یابد. مدل تحلیلی ارائه شده در فرآیند تغییرات سرعت پرتابه در حین نفوذ داخل بتن تقویت شده به الیاف فولادی از دستاوردهای مهم این تحقیق محسوب می شود.

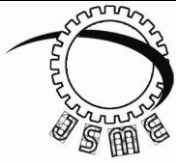
۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین، تهران

3- Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)

4- LS-DYNA

5-Elastic-Plastic Hydrodynamic



Journal of  
Solid Mechanics  
in Engineering

## Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



### Analytical and numerical modeling of erosive projectiles into steel fiber reinforced concrete target

Mahdi Hedayatian<sup>1</sup>, Khodadad Vahedi<sup>2\*</sup>

\* Corresponding Author: khvahedi@ihu.ac.ir

#### 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 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 explicit 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. Also, the Mie-Gruneisen state of equation is employed for the relationship between the volumetric strain, hydrostatic stress and modulus of bulk at high velocity. 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 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.

#### Key words:

Erosive Projectiles,  
Penetration, Reinforced  
Concrete, Steel Fiber, Impact  
Resistance

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

## ۱- مقدمه

برخورد یک پرتابه به یک عضو بتنی پدیده های گوناگونی احتمال دارد که ایجاد شود که وقوع این پدیده ها به خواص بتن، خصوصیات هندسی و فیزیکی پرتابه و شکل پرتابه، ضخامت و هندسه‌ی عضو، سرعت برخورد و زاویه‌ی برخورد و ... بستگی دارد [۱۳-۱۴]. دست آورد مهم این تحقیق ارائه مدل تحلیلی فرآیند نفوذ پرتابه داخل بتن تقویت شده به الیاف فولادی می‌باشد. تاثیر طول به قطر الیاف فولادی، تاثیر درصد حجمی الیاف استفاده شده در ماتریس بتن و همچنین تاثیر نسبت طول به قطر پرتابه در مدل تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. پرتابه ها با جرم و قطر یکسان و شکل های مختلف نیم کره، تخت و اجایو استفاده شده اند تا تاثیر آن بر روی مکانیزم گسیختگی بتن الیافی در مدل تحلیلی و عددی و مطابقت آن با نتایج تجربی مشخص شود.

## ۲- مدل تحلیلی نفوذ در بتن

در مسائل مربوط به نفوذ در بتن ساده، مقدار نیروی متوسط مقاوم در برابر نفوذ پرتابه را می توان طبق رابطه زیر نوشت [۱۵]:

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

و با شرط پایستگی انرژی، انرژی جنبشی پرتابه در حین نفوذ برابر 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 مرتب سازی رابطه بالا می‌توان رابطه بی بعد عمق نفوذ را به صورت زیر نوشت:

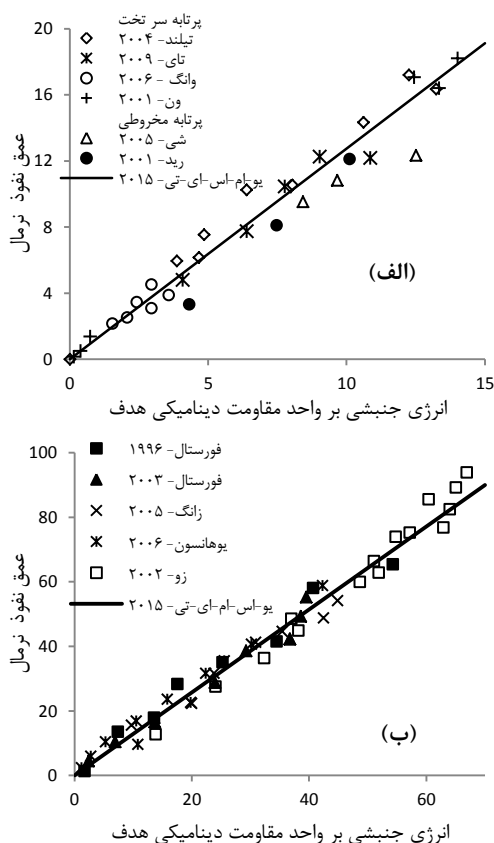
$$P_d = \frac{P}{d} = \frac{4E_k}{\pi \sigma_t d^3} \quad (3)$$

که در رابطه (۳) مقدار انرژی جنبشی در لحظه نفوذ پرتابه مقدار  $E_k = (1/2)M \cdot V_i^2$  می‌باشد. 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 ضربه ای به صورت زیر بیان کرد [۱۵]:

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

حد بحرانی انرژی ضربه پرتابه برای ایجاد ترک مخروطی، ایجاد پدیده لایه شدن در سطح زیرین هدف و

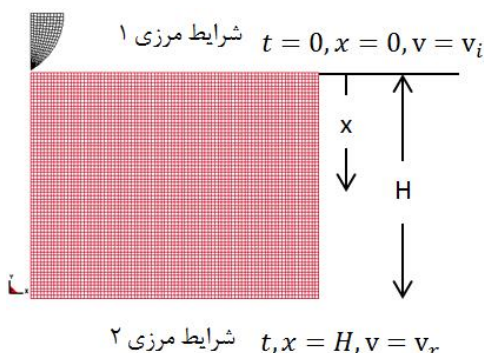
در طول چند دهه گذشته استفاده از بتن تقویت شده با الیاف فولادی بخاطر کارایی بالای آن از جمله عملکرد دینامیکی بسیار عالی آن در برابر انفجار و نفوذ پرتابه ها، مورد توجه مهندسین قرار گرفته است. توزیع تصادفی الیاف کوچک فلزی سبب بهبود خواص فیزیکی ماتریس بتن الیافی از جمله مقاومت در برابر شروع و همچنین مقاومت در برابر گسترش ترک شود [۱]. اضافه کردن الیاف به بتن باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت بتن در مقابل بارهای ضربه ای می شود. در این مورد، الیاف فولادی و به شکل قلاب دار، اثر بیشتری را از خود نشان داده است [۲]. استفاده از بتن با مقاومت بالا به خاطر رفتار ترد و شکننده آن باعث محدودیت در کارهای عملی می شود. در نتیجه یکی از راه های مقابله با این مشکل، استفاده از الیاف در ماتریس بتن می باشد که باعث شکل پذیری و افزایش خواص مکانیکی این ماده تحت بار گذاری های ضربه ای می شود [۳-۵]. همچنین مکانیزم رشد و توسعه ترک را به تاخیر می اندازد [۶]. در واقع با افزایش چقرمگی ماتریس بتن که با افزودن الیاف فلزی حاصل می شود می‌توان عمق نفوذ در اهداف را کاهش داد. از جمله کاربرد این نوع بتن را می‌توان در ساخت پوشش تونل ها، باند فرودگاه، آشیانه های پرواز و ساخت سازه راکتورها و غیره عنوان کرد [۷]. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که برای سرعت های کم بارگذاری استفاده از ۱٪ تا ۲٪ حجمی الیاف فولادی، باعث افزایش مقاومت ضربه ای بتن های الیافی می شود [۸-۹]. در تحقیق آزمایشگاهی دیگری که از پرتابه های اجایو 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 شکل پذیر در برابر نفوذ پرتابه تبدیل کند و پارامترهای آسیب ماتریس بتن الیافی مانند قطر ناحیه حفره را نسبت به بتن ساده کاهش دهد [۱۰]. بیشتر تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده در زمینه نفوذ سرعت های پایین (کمتر از ۱۰۰۰ متر بر ثانیه) و اغلب بر روی بتن های ساده و یا مسلح به میله های تقویت شده می‌باشد [۱۱-۱۲]. در اثر



شکل (۱) مقایسه رابطه تحلیلی (۵) با مقادیر نرمال تجربی برای: (الف) پرتابه های سرتخت و مخروطی، (ب) پرتابه های اجابو [۱۵]



شکل (۲) نحوه پخش الیاف فولادی در بتن و شکل ظاهری الیاف



شکل (۳) شرایط مرزی حاکم بر مساله نفوذ پرتابه در هدف بتنی

برای مشخص کردن نقش الیاف فولادی و فاکتور تیزی پرتابه در حین فرآیند نفوذ، از ضریب تصحیح آلفا در رابطه

پدیده نفوذ کامل در نمونه بتنی تابعی از ضخامت هدف و قطر پرتابه می باشد که برای نسبت  $H/d > 5$  خواهیم داشت:

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

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

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

در شکل (۱) مقایسه رابطه تحلیلی (۵) با مقادیر نرمال تجربی عمق نفوذ را برای پرتابه های سرتخت، مخروطی و اجابو می توان مشاهده کرد [۱۵].

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 تاثیر طول و قطر الیاف فولادی و همچنین تاثیر درصد حجمی الیاف بکار برده شده در ماتریس بتن می باشد. همان طور که در شکل (۲) آمده، بجای استفاده از آرماتورهای فولادی، می توان از توزیع تصادفی الیاف فولادی به منظور افزایش شکل پذیری و بالا بردن مقاومت ضربه ای 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، می توان تغییرات سرعت پرتابه در حین نفوذ را به صورت تابع سهمی به فرم زیر نوشت:

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

با توجه به شرایط مرزی مساله 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 باقی مانده  $v_r$  در آستانه خروج از هدف می باشد  $x=H$  و  $v=v_r$  است. با قرار دادن شرایط مذکور در رابطه (۸)، مقادیر ضرایب  $a$  و  $b$  تعیین می شود و تغییرات کاهش سرعت پرتابه در ضخامت هدف:

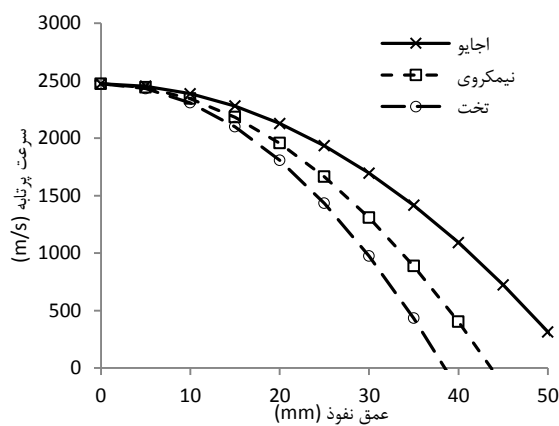
$$v = (v_r - v_i) \cdot \left( \frac{x}{H} \right)^2 + v_i \quad (9)$$

جدول (۱) مشخصات هندسی و مکانیکی الیاف فولادی

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

جدول (۲) مقادیر ضرایب ثابت مادی، شاخص تقویت و ضریب تصحیح آلفا برای ۱/۵٪ حجمی الیاف فولادی در ماتریس بتن

شکل پرتابه	نسبت ظاهری پرتابه	نسبت ظاهری الیاف	چگالی پرتابه به هدف	رابطه (۱۱)	رابطه (۱۲)	رابطه (۱۳)
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 با شکل های مختلف بر حسب عمق نفوذ در اهداف بتنی مسلح به الیاف فولادی با استفاده از رابطه (۱۴)

### ۳- شبیه سازی عددی

#### ۳-۱- مفاهیم اساسی

در نرم افزار ال-اس-داینما امکان تحلیل در محیط های دینامیکی غیر خطی، روش های پیشرفته مش بندی مجدد جهت حداقل نمودن خطای عددی، امکان بررسی رفتار سازه در حالت غیر خطی با تغییر شکل های بزرگ در بارگذاری دینامیکی، انعطاف پذیری در انتخاب روش های لاگرانژی و اویلری و قابلیت تحلیل به روش المان های محدود و مجزا از جمله فن آوری های مدرنی هستند که این نرم افزار را برای مدل سازی ضربه ای مناسب می سازد. در بیشتر مسائل ضربه در سرعت های بالا تانسور تنش یک ماده به دو بخش انحرافی و هیدرو استاتیکی تقسیم بندی می شود. بخش تانسور تنش انحرافی مربوط به مقاومت ماده در

(۹) که تابعی از فاکتورهای بی بعد ثابت مادی، شاخص تقویت<sup>۱</sup> الیاف فولادی، نسبت طول به قطر الیاف فولادی، نسبت طول به قطر پرتابه و نسبت چگالی پرتابه به چگالی هدف است، استفاده شده است:

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

در مراجع مختلف برای شاخص تقویت الیاف فولادی روابط تجربی متعددی ذکر شده است. در این تحقیق از مرجع [۱۶] برای بیان تاثیر مقاومت الیاف فولادی در ماتریس بتن استفاده شده است:

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

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

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 می توان ضریب تصحیح آلفا را با رابطه زیر بیان کرد:

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

حال معادله تحلیلی تغییرات سرعت اصلاح شده نسبت به سرعت اولیه پرتابه را بر حسب سرعت باقیمانده و عمق نفوذ پرتابه داخل بتن مسلح به الیاف فولادی را می توان به صورت رابطه نرمال زیر مشاهده کرد:

$$\frac{v}{v_i} = \alpha \cdot \left(\frac{v_r}{v_i} - 1\right) \cdot \left(\frac{x}{H}\right)^2 + 1 \quad (14)$$

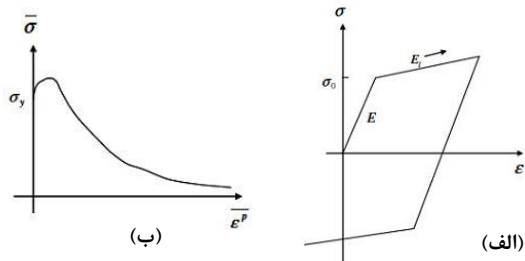
در جدول (۲) مقادیر هر یک از روابط (۱۱) الی (۱۳) را می توان برای بتن مسلح به ۱/۵٪ حجمی الیاف فولادی مشاهده کرد. همچنین نمودار تغییرات سرعت پرتابه با شکل های مختلف بر حسب عمق نفوذ در اهداف بتنی که با استفاده از رابطه تحلیلی (۱۴) بدست آمده، در شکل (۴) نشان داده شده است.

استفاده شده است. خصوصیت این مدل ماده این است که اولاً رفتار نرم شوندگی غیر خطی بتن الیافی را با دادن مقادیر تنش موثر بر حسب کرنش موثر پس از شروع تسلیم، به خوبی مدل می کند و ثانیاً تمامی پارامترهای مورد نیاز برای مشخص کردن خصوصیات این مدل ماده با تست ساده فشار تک محوری به دست می آید. این مدل ماده در حالت ساده به صورت یک منحنی دو خطی الاستیک - پلاستیک، تنش بر حسب کرنش همانند شکل (۵-الف) برای بیشتر فلزات می باشد. همچنین این مدل ماده را می توان برای پیش گویی رفتار نرم شوندگی غیر خطی اهداف بتنی مسلح به الیاف فولادی، با دادن ۱۶ نقطه تنش موثر، بر حسب کرنش پلاستیک موثر، همانند شکل (۵-ب) استفاده کرد.

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 [۱۶] می باشد. این رابطه که با استفاده تست فشار تک محوری بر روی نمونه های بتنی استوانه ای به ابعاد  $100 \times 200$  میلی متر که مسلح به الیاف فولادی برای درصد های مختلف حجمی الیاف ارائه شده است به صورت زیر می باشد:

$$\frac{f_{cf}}{f_c} = \frac{\beta \left( \frac{\epsilon_{cf}}{\epsilon_c} \right)}{\beta - 1 + \left( \frac{\epsilon_{cf}}{\epsilon_c} \right)^\beta} \quad (15)$$

در رابطه فوق  $f_c$  و  $\epsilon_c$  به ترتیب مقاومت فشاری و کرنش متناظر مقاومت فشاری بتن الیافی می باشد. همچنین  $f_{cf}$  و  $\epsilon_{cf}$  بیان کننده مقادیر تنش و کرنش فشاری منحنی شکل (۶) می باشد.



شکل ۵ الف) منحنی تنش - کرنش دو خطی الاستیک - پلاستیک، ب) منحنی نرم شوندگی غیر خطی تنش موثر بر حسب کرنش پلاستیک موثر

برابر تغییر شکل های برشی می باشد. بخش تانسور تنش هیدرو استاتیکی بیان کننده یک معادله حالت با توجه به سرعت بارگذاری می باشد زیرا در سرعت های بالای برخورد چگالی و حجم ثابت نیست. در نتیجه برای ارتباط بین تغییر حجم و چگالی با فشار اعمال شده از معادله حالت گرونازن استفاده می شود [۱۷]. در نرم افزار ال اس-داینما مدل ماده های زیادی برای بتن با کاربرد های مختلف ارائه شده است که شامل اثر های نرخ کرنش و گسترش ترک می باشد. مدل ماده تیپ ۸۴ با نام بتن وینفریش<sup>۱</sup>، بر اساس توصیه نامه سی ای بی<sup>۲</sup>، سه ثابت و چهار پارامتر را مد نظر قرار می دهد و اثر های آهنگ کرنش را نیز در نظر می گیرد. مدل ماده تیپ ۱۶ با نام بتن شبه تانسور<sup>۳</sup> و مدل ماده تیپ ۷۲ این نرم افزار با نام مدل آسیب بتن<sup>۴</sup>، سه پارامتر گسترش ترک، اثر آهنگ کرنش و معادله حالت<sup>۵</sup> را در نظر می گیرد. مدل ماده تیپ ۹۶ با نام مدل آسیب ترد<sup>۶</sup>، فقط دو پارامتر گسترش ترک و آهنگ کرنش را در نظر می گیرد. همه مدل های اشاره شده با در نظر گرفتن معیارهای گسیختگی مختلف، قابلیت مدل سازی بارهای ضربه ای و انفجاری بتن را دارا می باشند [۱۸]. مدل های ماده ذکر شده در بالا از آن جهت که رفتار ترد بتن را پیش گویی می کنند، می توانند مفید واقع شوند. ولی از جمله ضعف این مدل ماده ها این است که: اولاً رفتار نرم شوندگی غیر خطی بتن الیافی را پس از شروع تسلیم نمی توانند مدل کنند و ثانیاً این مدل مواد دارای پارامترهای زیادی هستند که بدست آوردن این پارامترها نیاز به انجام آزمایش های مختلف دارد و با آزمایش های مادی ساده (تست کشش و فشار تک محوری) بدست نمی آیند.

در این مقاله برای مدل سازی سرعت نفوذ بالای پرتابه و هدف، از مدل ماده الاستیک - پلاستیک هیدرو دینامیک، که مدل ماده شماره ۱۰ نرم افزار ال اس-داینما می باشد،

1- Winfrith Concrete

2- CEB

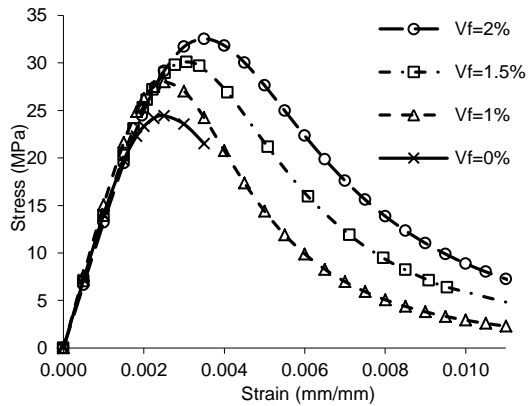
3- Pseudo Tensor Concrete

4- Concrete Damage Model

5- Equation of state (EOS)

6- Brittle Damage Model

اهداف بتنی، را مشاهده کرد. لازم به توضیح است که پارامترهای ضریب هوگونیت<sup>۳</sup> و ثابت گرونایزن<sup>۴</sup> توسط تست های تجربی ضربه پرتابه فلزی [۲۱] و هدف بتنی [۲۲] بدست آمده است.



شکل (۶) دیاگرام تنش- کرنش از تست فشار تک محوری برای بتن ساده و بتن الیافی با درصد های مختلف حجمی الیاف فولادی

جدول (۳) پارامترهای خواص مکانیکی پرتابه و نمونه های بتنی [۲۰]

پارامترها	درصد حجمی الیاف فولادی			
	پرتابه	% ۱	% ۱/۵	% ۲
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	۷۸۷۰	۲۴۷۰	۲۳۵۰	۲۳۶۰
مدول برشی (GPa)	۷۷/۵	۵۵/۳۰	۵۹/۲۴	۶۳/۱۵
تنش تسلیم (MPa)	۵۰۰	۲۷/۴۳	۲۵/۲۹	۲۴/۶۳
مقاومت فشاری (MPa)	-	۳۲/۵۲	۳۰/۱	۲۸/۰۳
مدول الاستیسیته (GPa)	-	۱۳/۱۶	۱۴/۱۰	۱۴/۹۰
ضریب پواسون	-	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۸
مقاومت کششی (MPa)	-	۵/۰۲	۴/۰۱	۳/۶۰
مدول سخت شونددگی (GPa)	۴/۲	-	-	-

جدول (۴) ضرایب معادله حالت پرتابه [۲۱] و نمونه های بتنی [۲۲]

پارامتر	نماد (واحد)	بتن تقویت شده به الیاف فولادی			
		پرتابه	% ۱	% ۱/۵	% ۲
سرعت					
حجمی صوت	C <sub>0</sub> (m/s)	۴۵۷۰	۱۶۹۲/۵	۱۷۹۶/۰	۱۸۱۳/۶
ضریب اول هوگونیت	S <sub>1</sub>	۱/۴۹	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰
ثابت گرونایزن	γ <sub>0</sub>	۲/۱۷	-	-	-

مقدار β نیز به که عنوان پارامتر مادی نامیده می شود، از رابطه (۱۱) قابل محاسبه است. با به کار بردن رابطه فوق می توان نمودار کامل تنش- کرنش را برای درصد های مختلف حجمی الیاف فولادی همانند شکل (۶) رسم کرد. با توجه به شکل مشخص است که افزودن الیاف به ماتریس بتن باعث افزایش ناحیه نرم شونددگی و انعطاف پذیری بتن می شود و تاثیر کمی بر روی مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و همچنین ضریب پواسون دارد. زیرا تا قبل از ناحیه تسلیم رفتار نمونه ها تقریباً مشابه بتن ساده است.

برای تعیین خصوصیات بتن الیافی که به عنوان پارامترهای ورودی باید به نرم افزار داد، از تست فشار تک محوری و تست کشش غیر مستقیم استفاده می شود.

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<sup>۱</sup> [۱۹] که در واقع ارتباط بین کرنش حجمی، تنش هیدرواستاتیکی و مدول بالک است، برای مواد منبسط شده تحت تاثیر ضربه وارده که در رابطه (۱۶) نشان داده شده است، استفاده می شود.

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

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

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

در حالتی که شدت بارگذاری بالا باشد از رابطه فشار شوک هوگونیت<sup>۲</sup> برحسب حجم مخصوص ماده استفاده می شود. رابطه غیرخطی بین سرعت موج شوک U<sub>s</sub>، برحسب سرعت ذرات U<sub>p</sub>، 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<sub>in</sub> انرژی داخلی، C<sub>0</sub> سرعت حجمی صوت، K مدول حجمی، γ<sub>0</sub> ثابت گرونایزن است و S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> ضرایب شیب منحنی U<sub>s</sub> - U<sub>p</sub> است. در این تحقیق از رابطه خطی معادله (۱۹) استفاده شده است.

در جدول (۳) می توان پارامترهای مربوط به خواص مکانیکی [۲۰] و در جدول (۴) معادله حالت برای پرتابه و

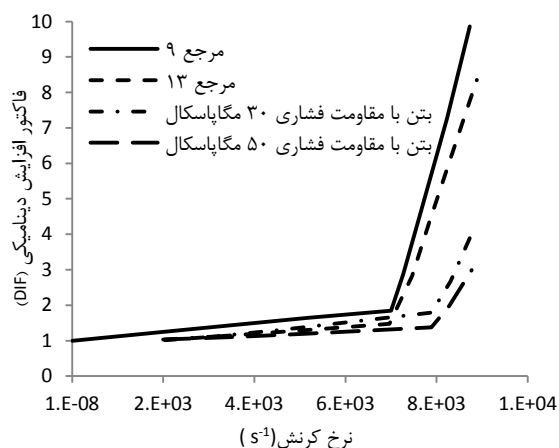
7- Hugoniot coefficient ( S<sub>1</sub> )

8- Gruneisen's gamma ( γ<sub>0</sub> )

1. Mie-Gruneisen equation of state

2. Hugoniot shock

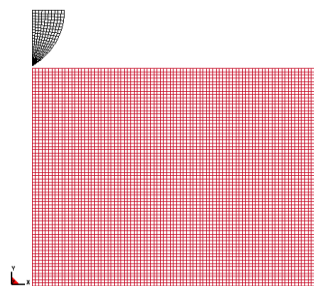
با توجه به شکل (۹)، نمونه بتنی به صورت تقارن محوری با شعاع ۲۵۰ میلی متر و ضخامت ۱۰۰ میلی متر و با تعداد المان های ۲۰۰×۸۰ و مجموعاً ۱۶۰۰۰ المان برای رسیدن به دقت جواب مناسب، شبکه بندی شده اند.



شکل (۷) نمودار تغییرات فاکتور افزایش دینامیکی بر حسب اثرات نرخ کرنش در سازه های بتنی [۱۳]



شکل (۸) پرتابه های فلزی به صورت تقارن محوری با سر نفوذ گر به ترتیب از راست به چپ به شکل: اجایو، نیم کروی و تخت



شکل (۹) شبکه مش بندی دو بعدی تقارن محوری پرتابه و هدف

یکی از معیار های مهم در تقسیم بندی پرتابه ها، ضریب تیزی سر پرتابه<sup>۴</sup> می باشد که فرمول های تجربی مختلفی برای تیزی سر پرتابه ها ارائه شده است. در روابط زیر این ضریب برای پرتابه های اجایو، نیمکروی و تخت ذکر شده است [۱۳]:

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

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

در تحقیق حاضر به خاطر آن که سرعت بارگذاری فوق العاده بالاست، باید اثرات نرخ کرنش را مد نظر قرار دهیم. زیرا نرخ کرنش بر روی مقاومت ماده به خصوص مقاومت کششی اثر گذار است. نرخ کرنش در سازه های بتنی به جرم و سرعت ضربه پرتابه بستگی دارد [۱۴]. اثرات نرخ کرنش در سازه های بتنی را می توان با استفاده از فاکتور افزایش دینامیکی<sup>۱</sup>، که عبارت است از نسبت مقاومت کششی دینامیکی به مقاومت کششی استاتیکی بیان کرد.

طبق تحقیقات انجام گرفته توسط محققین همانند شکل (۷) می توان برای نرخ کرنش های کمتر از  $10^2 s^{-1}$  مقدار فاکتور افزایش دینامیکی را عدد ۱/۵ در نظر گرفت [۱۳-۹]. بنابراین با داشتن مقدار فاکتور افزایش دینامیکی و مقاومت کششی استاتیکی که از تست کشش غیر مستقیم بدست می آید، می توان مقاومت کششی دینامیکی نمونه های بتنی را بدست آورد و از آن به عنوان معیار گسیختگی کششی نمونه های بتنی استفاده کرد.

### ۳-۲- نحوه شبیه سازی

در این تحقیق برای مدل سازی هندسی و ایجاد شبکه مش بندی از پیش پردازشگر اف ای ام بی ۲۸ استفاده شده است. پرتابه و نمونه بتنی به صورت دو بعدی و تقارن محوری با یک نقطه انتگرال گیری مدل سازی شده اند. همچنین حل مساله به روش لاگرانژی صورت گرفته است. پرتابه های فلزی همانند شکل (۸)، که دارای سر نفوذ گر به شکل های تخت، نیم کروی و اجایو هستند، دارای جرم تقریبی ۴۵ گرم و شعاع سر ۱۲/۳ میلی متر می باشند و با سرعت تقریبی ۲۴۷۴ متر بر ثانیه به هدف بتنی اصابت می کنند. هر یک از پرتابه ها به صورت تقارن محوری<sup>۳</sup> با ۱۹۲ المان و با سایز ۰/۹۳۵ میلی متر شبکه بندی شده اند. قابل ذکر است که برای ثابت ماندن جرم و قطر تمام پرتابه ها در شبیه سازی، نسبت بی بعد طول به قطر برای پرتابه های تخت، نیمکروی و اجایو به ترتیب ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ می باشد.

9- Dynamic Increase Factor (DIF)

2- FEM 28

3- Axisymmetric

4- Nose Shape Factor



#### ۴- بحث و مقایسه نتایج

در شکل (۱۰) مقایسه‌ای بین حل عددی و نتایج تجربی [۲۰] بر روی سرعت باقی مانده پرتابه با شکل نیم کروی در اثر نفوذ در اهداف بتنی با درصد های حجمی مختلف الیاف فولادی انجام گرفته است. حداکثر اختلاف بین حل عددی و نتایج آزمایشگاهی برابر با ۸٪ می‌باشد. 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. به طوری که با توجه به شکل (۱۰) و نتایج حاصل از شبیه سازی، با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی از ۱٪ به ۱/۵٪ و از ۱٪ به ۲٪ به ترتیب سرعت باقی مانده پرتابه در خروج از اهداف به میزان نسبی ۲۷٪ و ۴۴٪ کاهش می‌یابد.

در شکل های (۱۱) کانتور های کرنش موثر پلاستیک و نحوه نفوذ پرتابه با سر نیم کروی در هدف و مکانیزم شکل گیری ترک و گسیختگی نمونه بتنی با به کار بردن ۱/۵٪ حجمی الیاف، در زمان های ۲۶، ۵۲، ۸۸ و ۲۳۰ میکرو ثانیه رسم شده است. اولین پدیده های خرد شدن نمونه بتنی (ناحیه شکل گیری حفره)، از سطح رویی نمونه در زمان ۲۶ میکرو ثانیه اتفاق می‌افتد. هنگامی که موج تنش فشاری در زمان ۵۲ میکرو ثانیه به سطح زیرین نمونه می‌رسد، به صورت امواج کششی منعکس می‌شود و در این لحظه پدیده پوسته پوسته شدن از سطح زیرین نمونه اتفاق می‌افتد. در زمان ۸۸ میکرو ثانیه 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 میکرو ثانیه شکل نهایی گسیختگی برای پرتابه و نمونه بتنی قابل مشاهده است.

جدول (۶) معیار فرسایش برای المان های پرتابه و نمونه های بتنی

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

در جدول (۵) می‌توان مقادیر پارامتر های 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 تیز تر است. که این موضوع در نتایج حاصل از شبیه سازی بررسی شده است.

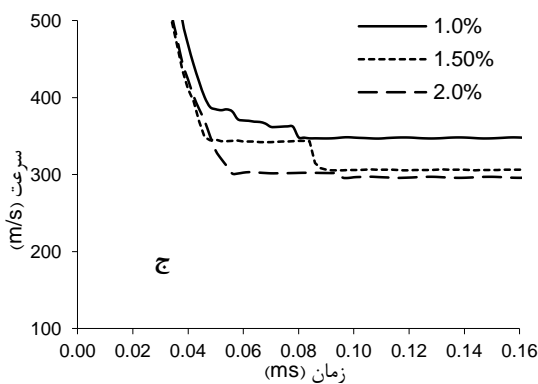
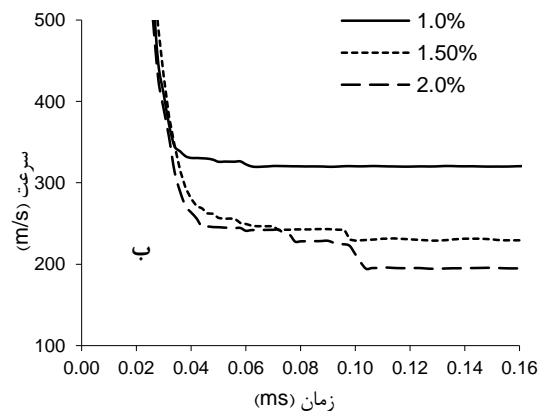
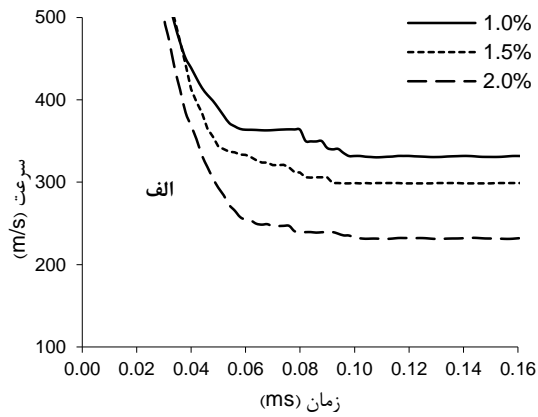
جدول (۵) مقادیر پارامتر های مختلف فاکتور تیزی سر پرتابه

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

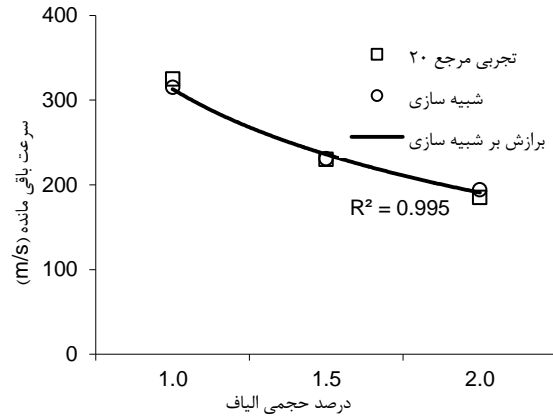
#### ۳-۳- تعریف معیار خرابی

یکی از مشکلات نرم افزار ال اس داینما، نبود هیچ گونه مدل مادی برای مدل کردن کامپوزیت بتن الیافی در برنامه تحلیل اجزاء محدود حاضر می‌باشد. در حالت کلی چندین مدل ماده برای بتن ساده در نرم افزار جاری وجود دارد. برای آن که بتوان اثر الیاف را در رفتار ضربه ای بتن مدل کرد، تنها راه حل استفاده از گزینه خرابی المان ها به عنوان معیار شکست مادی ماتریس بتن می‌باشد. با استفاده از نتایج تجربی از معیار ماکزیمم کرنش برشی در شکست برای پرتابه و هدف بتنی و از معیار ماکزیمم تنش کششی در شکست برای هدف بتنی به منظور نحوه گسیختگی هدف در اثر لایه لایه شدن در سطوح زیری هدف و خرد شدن هدف در سطح بالایی نمونه در نرم افزار استفاده شده است. هنگامی که کرنش موثر پلاستیک یا تنش کششی در المان به مقادیر بحرانی خود برسد، المان مورد نظر پاک می‌شود. برای مشخص شدن نقش واقعی الیاف در بیرون کشیده شدن از ماتریس بتن می‌توان از معیار کرنش پلاستیک در شکست به عنوان معیار خرابی المان ها استفاده کرد. که این مقدار برای پرتابه و نمونه های بتنی به ترتیب ۰/۹ و ۰/۴ می‌باشد [۲۰]. برای نمونه های بتنی از معیار گسیختگی به وسیله امواج کششی، که همان مقاومت کششی دینامیکی بتنی است، همانند جدول (۶) استفاده شده است.

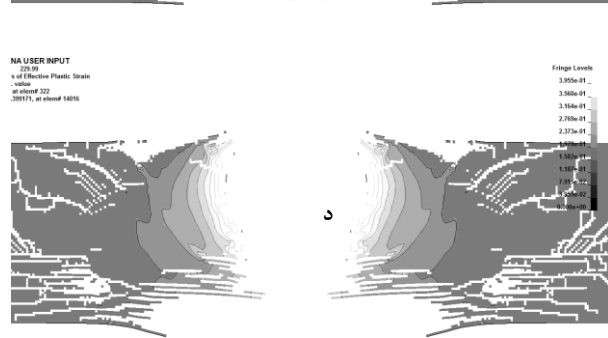
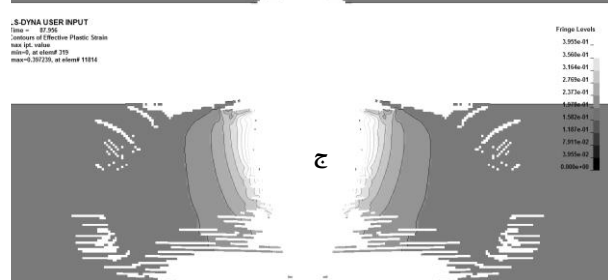
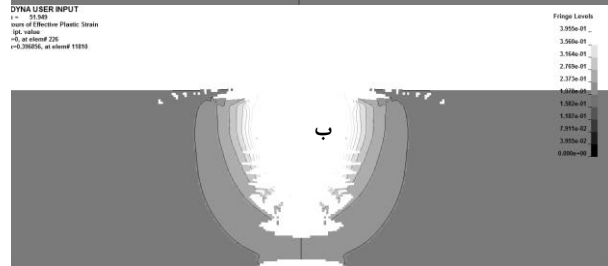
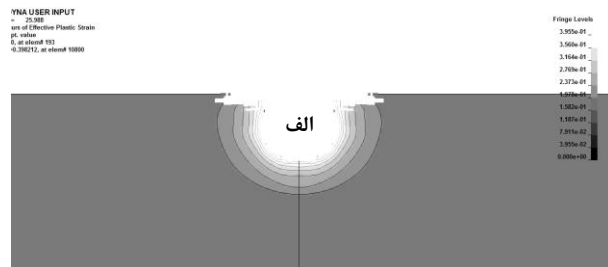
در شکل های (۱۲) تاریخچه زمانی سرعت پرتابه ها با شکل های مختلف در هنگام نفوذ در اهداف بتنی با درصد های حجمی مختلف نمایش داده شده است. واضح است که پرتابه ها تقریباً با شتاب ثابتی در اهداف نفوذ می کنند و پس از عبور پرتابه از هدف، سرعت پرتابه به صورت یک خط مستقیم ثابت می ماند (سرعت باقی مانده).



شکل (۱۲) تاریخچه زمانی سرعت پرتابه با سر نفوذگر: الف) تخت ب) نیم کروی، ج) اجایو، در اهداف بتنی با درصد حجمی مختلف الیاف

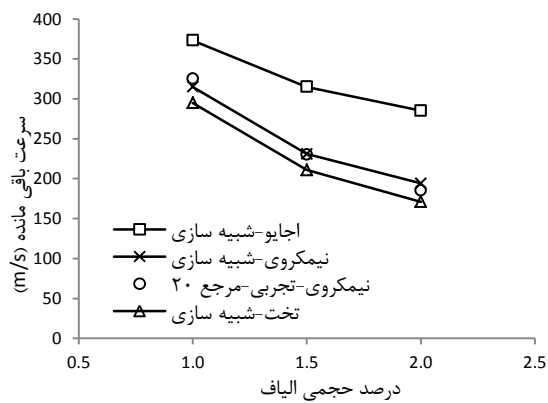


شکل (۱۰) مقایسه سرعت باقی مانده پرتابه با شکل نیم کروی در اثر نفوذ در اهداف بتنی با درصد های حجمی مختلف الیاف فولادی

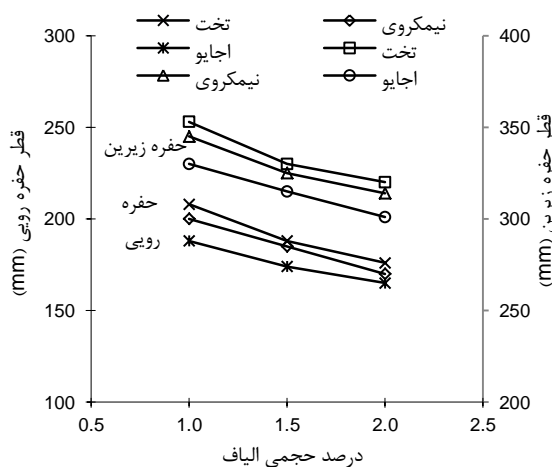


شکل (۱۱) کانتور کرنش موثر پلاستیک در نمونه بتنی با ۱/۵٪ حجمی الیاف، در زمان: الف) ۲۶، ب) ۵۲، ج) ۸۸، د) ۲۳۰ میکرو ثانیه

در شکل (۱۴) سرعت باقی مانده هر پرتابه با شکل های مختلف، در اثر نفوذ در اهداف بتنی با درصد های حجمی مختلف را می توان 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. در شکل (۱۵) 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 می توان ملاحظه کرد. میزان تخریب در سطح زیرین نمونه بیشتر از سطح رویی هدف است که علت آن در بازگشت موج تنش فشاری از سطح زیرین نمونه می باشد که به موج تنش کششی تبدیل شده و چون مقاومت بتن در بارگذاری کششی کمتر است، سبب آسیب بیشتر در سطح زیرین هدف می شود.

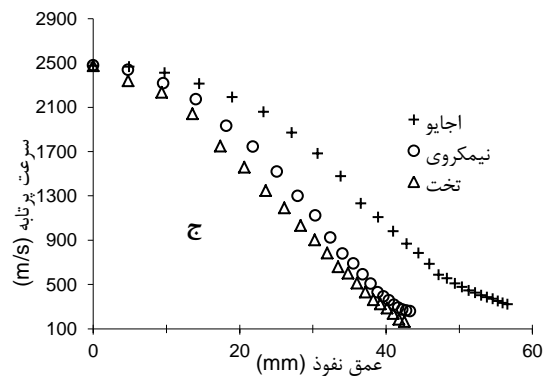
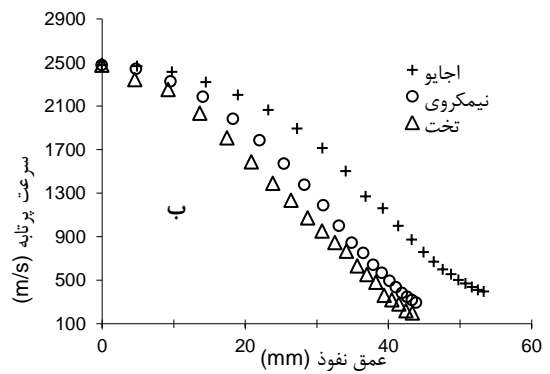
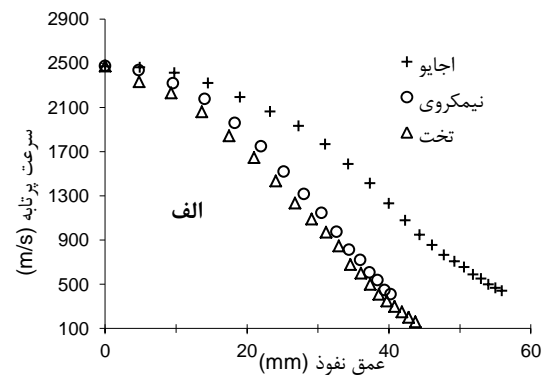


شکل (۱۴) نمودار سرعت باقی مانده پرتابه با شکل های مختلف در اثر نفوذ در اهداف بتنی با درصد های حجمی مختلف

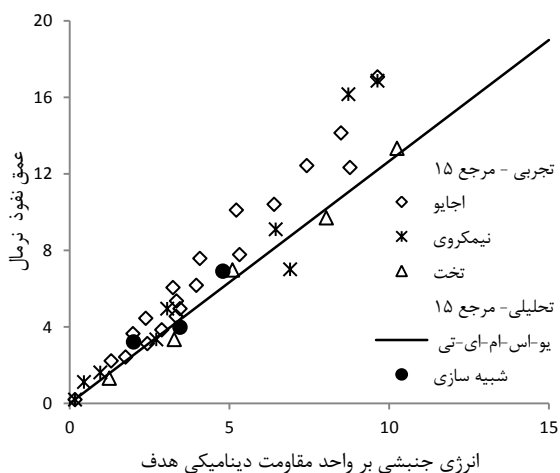


شکل (۱۵) قطر ناحیه پوسته شده در سطح زیرین و قطر ناحیه ایجاد حفره در سطح بالایی اهداف بتنی

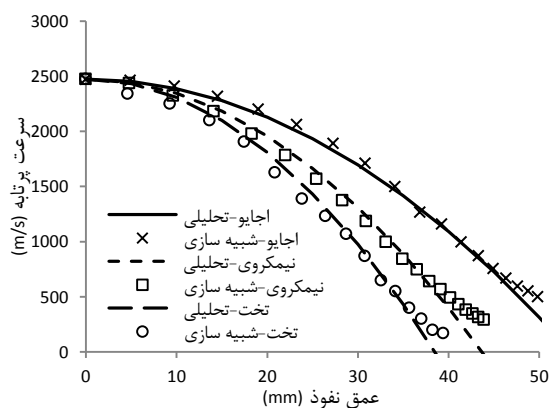
با استفاده از نتایج شبیه سازی از تلفیق نمودارهای جابجایی بر حسب زمان و سرعت بر حسب زمان و در نهایت حذف پارامتر زمان، می توان همانند شکل (۱۳)، نمودار تغییرات سرعت پرتابه بر حسب عمق نفوذ در اهداف بتنی را برای پرتابه هایی با شکل های مختلف مشاهده نمود. مشخص است که نمودار تغییرات سرعت پرتابه بر حسب عمق نفوذ در هدف به صورت یک منحنی درجه دوم می باشد. این موضوع فرض خطی بودن کاهش شتاب پرتابه در داخل هدف را که اساس کار تحلیلی این تحقیق است را به خوبی نشان می دهد.



شکل (۱۳) نمودار تغییرات سرعت پرتابه بر حسب عمق نفوذ در اهداف بتنی با درصد حجمی الیاف: الف) ۱٪، ب) ۱/۵٪، ج) ۲٪



شکل (۱۶) مقایسه شبیه سازی با کار تجربی مقدار بی بعد عمق نفوذ بر حسب نسبت بی بعد انرژی جنبشی بر واحد مقاومت دینامیکی هدف



شکل (۱۷) مقایسه حل عددی و تحلیلی تغییرات سرعت پرتابه در حین نفوذ

در واقع با کاهش فاکتور تیزی سر پرتابه ها از  $0/5$  به  $0/3$  و یا افزایش نسبت طول به قطر پرتابه از  $0/5$  به  $0/9$ ، برای پرتابه به شکل های تخت، نیم کروی و اجایو، سرعت باقی مانده افزایش می یابد.

مشخص است که با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی از  $1$  تا  $2$  درصد در ماتریس بتن، میزان جذب انرژی داخلی در اهداف به طور نسبی افزایش می یابد و همچنین، قطر ناحیه پوسته شده در سطح زیرین و قطر حفره ایجاد شده در سطح فوقانی هدف کاهش می یابد.

استفاده از مدل ماده الاستیک-پلاستیک هیدرودینامیک، روشی کارآمد برای مدل سازی رفتار غیر خطی بتن الیافی و رفتار الاستیک-پلاستیک پرتابه فلزی در سرعت های بارگذاری بالا می باشد که ضرایب این مدل

از روابط آزمایشگاهی یو-اس-ام-ای-تی<sup>۱</sup> [۱۵] با توجه به شکل (۱۶) می توان مقدار بی بعد عمق نفوذ<sup>۲</sup> بر حسب نسبت بی بعد انرژی جنبشی بر مقاومت دینامیکی<sup>۳</sup> هدف که از روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه می باشد، را ارزیابی کرد. مشخص است که نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج عملی دقت خوبی دارد.

در شکل (۱۷) مقایسه بین حل تحلیلی از رابطه (۱۴) و نتایج حاصل از شبیه سازی در زمینه تغییرات سرعت پرتابه با شکل های مختلف بر حسب عمق نفوذ، در اهداف بتنی مسلح به  $1/5\%$  حجمی الیاف فولادی ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که حل تحلیلی تطابق خوبی با نتایج حاصل از شبیه سازی دارد. باید توجه داشت که در شبیه سازی عددی فرآیند حذف المان ها با رسیدن به حد بحرانی خود اتفاق می افتد که این امر باعث ایجاد خطا بین حل تحلیلی و حل عددی می گردد.

## 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 کارآیی بیشتر پرتابه با سر اجایو در نفوذ کامل در بتن می باشد.

1- USMIT

2-Normalized Depths of Penetration

3- Kinetic Energy Per Unit of Dynamic Strength

- Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6, 2014, pp. 1759-1767.
- [2] Miamoto A., Nakamura H., *Visualization of impact failure behavior for RC slab*, Proceedings of 3rd International Conference on Concrete under Severe Condition, UBC, 2001.
- [3] Gao J., Sun W., Morino K., Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites*, 19, 1997, pp. 307-313.
- [4] Shahid I., Ahsan A., Holschemacher K., Thomas A., Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC), *Construction and Building Materials*. 98, 2015, pp. 325-333.
- [5] P.S. Song, S. Hwang, Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*. 18, 2004, pp. 669-673.
- [6] Farnam Y., Experimental and simulation study of the impact of high strength fibrous concrete panels, *PhD Thesis*, Tehran University, Tehran, 2010. (In Persian)
- [7] Tokgoz S., Dundar C., Tanrikulu A.K., Experimental behavior of steel fiber high strength reinforced concrete and composite columns, *Journal of Constructional Steel Research*. 74, 2012, pp. 98-107.
- [8] Murali G., Santhi A. S., Mohan Ganesh G., Empirical Relationship between the Impact Energy and Compressive Strength for Fiber Reinforced Concrete, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 73, 2014, pp. 469-473.
- [9] 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, *International Journal of Impact Engineering*, 71, 2014, pp. 89-96.
- [10] Sovják R., Vavřinik T., Máca P., Zatloukal J., Konvalinka P., Experimental Investigation of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete Slabs Subjected to Deformable Projectile Impact, *Procedia Engineering*, 65, 2013, pp. 120-125.
- [11] Luo X., Sun W., Chan Y.N., Characteristics of high-performance steel fiber-reinforced concrete subject to high velocity impact, *Cement and Concrete Research*, 30, 2013, pp. 907-914.
- [12] Huang F., Wu H., Jin Q., Zhang Q., A numerical simulation on the perforation of reinforced concrete targets, *International Journal of Impact Engineering*, 32, 2005, pp. 173-187.
- [13] Li Q. M., Reid S. R., Wen H. M., Telford A. R., Local impact effects of hard missiles on concrete targets, *International Journal of Impact Engineering*, 32, 2005, pp. 224-284.

ماده با انجام تست های مکانیکی ساده فشاری و کششی امکان پذیر است.

## ۶- فهرست علائم

$d_p$	قطر پرتابه، mm
$d_f$	قطر الیاف فولادی، 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
$f_c$	مقاومت فشاری بتن، MPa
H	ضخامت هدف، mm
$l_p$	طول پرتابه، mm
$l_f$	طول الیاف فولادی، mm
M	جرم پرتابه، kg
$N^*$	فاکتور تیزی سر پرتابه
P	عمق نفوذ، mm
$P_d$	نسبت بی بعد عمق نفوذ شاخص تقویت
RI	شاخص تقویت
$V_i$	سرعت اولیه پرتابه، m/s
$V_r$	سرعت باقی مانده پرتابه، m/s
$v_f$	درصد حجمی الیاف فولادی
	علائم یونانی
$\alpha$	ضریب تصحیح سرعت
$\beta_t$	ثابت مادی هدف
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\varphi$	کالیبر سر پرتابه
$\sigma_t$	مقاومت دینامیکی هدف، MPa
	زیرنویس ها
ogive	اجایو
hemi	نیمکروی
flat	تخت

## مراجع:

- [1] Jianhua W., Jun L., Haiping Y., The study on steel fiber reinforced concrete under dynamic compression by damage mechanics method,

- [14] Leppanen C., Concrete subject to fragment impacts, *PhD Thesis*, Chalmers University of technology, Goteborg, Sweden, 2004.
- [15] Wen H.M., Xian Y.X., A unified approach for concrete impact, *International Journal of Impact Engineering*, 77, 2015, pp. 84-96.
- [16] Nataraja M.C., Dhang N., Gupta A.P., Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression, *Cement and Concrete Composites*. 21, 1999, pp. 383-390.
- [17] 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*, 5 th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures, 2003.
- [18] Hallquist J. O., *LS-DYNA Theory Manual*, Livermore Software Technology Corporation, California, March 2006.
- [19] Feli S., Bakhtiar M., Determination of Compressive Stress of Metallic Materials Based on Impact Test, *Mech. Aerospace J*, 8, 2012, pp. 43- 54.
- [20] Teng L., T. Chu, Yi. An., Chang, Fwu. An., Shen, Bor. Cherng. and Cheng, Ding. Shing., Development and validation of numerical model of steel Fiber reinforced concrete for high-velocity impact, *Computational Materials Science*, 42, 2008, pp. 90-99.
- [21] Marsh S. P., *LASL shock hugoniot data*, University of California, 1980.
- [22] Gebbeken N., Greulich S., Pietzsch A., Hugoniot properties for concrete determined by full-scale detonation experiments and flyer-plate-impact tests, *International Journal of Impact Engineering*, 32, 2006, pp. 2017-2031.