

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال ششم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۴، (پیاپی ۲۴): صص ۶۱-۵۳

تأثیر کاربرد سازه‌های بتنی مسلح به الیاف فولادی تحت نفوذ پرتابه‌های سرعت بالا

مهدی هدایتیان^۱، خداداد واحدی^۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۰۱

چکیده

در این مقاله به مدل‌سازی فرآیند نفوذ پرتابه‌های، سرعت بالا با سر نفوذگر نیم‌کروی، تخت و اجایو در بتن مسلح به الیاف فولادی پرداخته شده است. در شبیه‌سازی عددی از کد صریح و غیر خطی LS-DYNA با روش حل لاگرانژی و به‌صورت تقارن محوری استفاده شده است. پرتابه‌ها با جرم تقریبی ۴۵ گرم با سرعت بالای در حدود ۲۵۰۰ متر بر ثانیه به اهداف بتنی که با الیاف فولادی با درصدهای حجمی ۱، ۱/۵ و ۲ درصد مسلح شده‌اند نفوذ می‌کنند. در این مقاله برای پیش‌گویی دقیق رفتار پرتابه فلزی و بتن الیافی در سرعت‌های بارگذاری خیلی بالا، از مدل ماده Elastic-Plastic Hydrodynamic و برای ارتباط بین کرنش حجمی، تنش هیدرواستاتیکی و مدول بالک در سرعت‌های بالا از معادله حالت مای گرونایزن استفاده شده است. پس از صحت فرآیند شبیه‌سازی با کار آزمایشگاهی، نتایج نشان می‌دهد که پرتابه‌های با سر نفوذگر اجایو که فاکتور تیزی سر پرتابه پایینی دارد با سرعت باقی‌مانده بیشتری از اهداف خارج می‌شود و کارایی آنها در نفوذ بهتر می‌باشد. به عبارت دیگر، با افزایش نسبت طول به قطر پرتابه از ۰/۵ به ۰/۹، برای پرتابه‌هایی به ترتیب به شکل تخت، نیم‌کروی و اجایو، سرعت باقی‌مانده افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی در ماتریس بتن میزان تخریب سطح ناحیه رویی و زیرین بتن الیافی کاهش می‌یابد. اثر تیزی سر پرتابه و نسبت طول به قطر پرتابه بر روی راندمان بالستیکی پرتابه و همچنین تأثیر استفاده از الیاف فولادی در بالا بردن راندمان پانل بتنی که یکی از اهداف پدافند غیرعامل است، از نوآوری‌های مهم تحقیق حاضر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: نفوذ سرعت بالا، پرتابه، بتن مسلح به الیاف فولادی، شبیه‌سازی عددی، LS-DYNA

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسدآباد

۲- دانشیار و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع) - khvahedi@ihu.ac.ir - نویسنده مسئول

۱- مقدمه

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 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 می‌شود [۱]. اضافه کردن الیاف به بتن باعث افزایش قابل توجه 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 [۲]. استفاده از بتن با مقاومت بالا به خاطر رفتار ترد و شکننده آن باعث محدودیت در کارهای عملی می‌شود. در نتیجه، یکی از راه‌های مقابله با این مشکل، استفاده از الیاف در ماتریس بتن می‌باشد که باعث شکل‌پذیری و افزایش خواص مکانیکی این ماده تحت بارگذاری‌های ضربه‌ای می‌شود [۳-۵]. همچنین سازوکار رشد و توسعه ترک را به تاخیر می‌اندازد [۶]. 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 [۷]. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که برای سرعت‌های کم بارگذاری، استفاده از ۱٪ تا ۲٪ حجمی الیاف فولادی، باعث افزایش مقاومت ضربه‌ای بتن‌های الیافی می‌شود [۸-۱۹]. در تحقیق آزمایشگاهی دیگری که از پرتابه‌های 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 شکل‌پذیر 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 سرعت‌های پایین (کمتر از ۱۰۰۰ متر بر ثانیه) و اغلب بر روی بتن‌های ساده و یا مسلح به میله‌های تقویت شده می‌باشد [۱۱-۱۲]. 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 هندسه عضو، سرعت برخورد و زاویه برخورد و ... بستگی دارد [۱۳-۱۴]. دستاورد مهم این تحقیق در تاثیر استفاده از پرتابه‌ها با جرم و قطر یکسان و شکل‌های مختلف در سرعت‌های بالا و اثر

استفاده از درصد‌های مختلف حجمی الیاف فولادی بر روی سازوکار گسیختگی بتن الیافی و مطابقت آن با نتایج تجربی می‌باشد.

۲- بررسی روابط نفوذ

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

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

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:

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

که در رابطه (۳) مقدار انرژی جنبشی در لحظه نفوذ پرتابه، مقدار $E_k = (1/2)M.V_i^2$ 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 ضربه‌ای به صورت زیر بیان کرد:

$$\sigma_t = 4.2f_c + 135 + \left(0.014f_c + 0.45 \right) V_i \quad (4)$$

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 $H/d > 5$ خواهیم داشت:

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

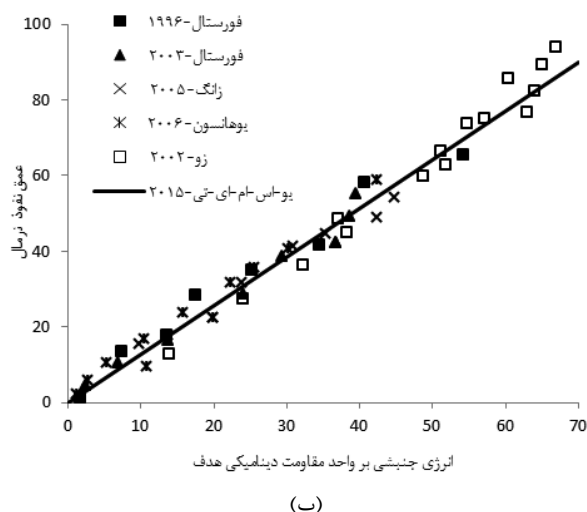
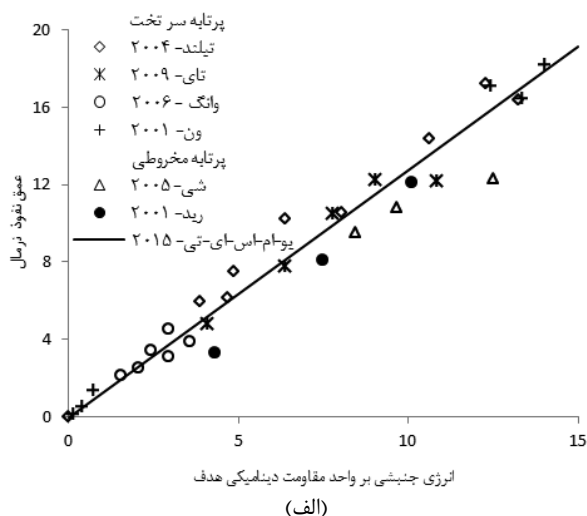
$$\frac{E_s}{\sigma_t d^3} \frac{N^*}{0.72} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{d} - 4.3 \right) \quad (6)$$

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

در شکل (۱) مقایسه رابطه تحلیلی (۵) با مقادیر نرمال تجربی عمق نفوذ را برای پرتابه‌های سرتخت، مخروطی و اجایو می‌توان مشاهده کرد [۱۵].

مسائل ضربه در سرعت‌های بالا تانسور تنش یک ماده به دو بخش انحرافی و هیدرو استاتیکی تقسیم‌بندی 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 برخورد، چگالی و حجم ثابت نیست. در نتیجه برای ارتباط بین تغییر حجم و چگالی با فشار اعمال‌شده، از معادله حالت گرونایزن استفاده می‌شود [۱۶]. در نرم‌افزار ال اس-دایناس مدل ماده‌های زیادی برای بتن با کاربردهای مختلف ارائه شده است که شامل اثرهای نرخ کرنش و گسترش ترک می‌باشد. مدل ماده تیپ ۸۴ با نام بتن وینفریش^۲، بر اساس توصیه‌نامه سی ای بی^۳، سه ثابت و چهار پارامتر را مد نظر قرار می‌دهد و اثرهای آهنگ کرنش را نیز در نظر می‌گیرد. مدل ماده تیپ ۱۶ با نام بتن شبه تانسور^۴ و مدل ماده تیپ ۷۲ این نرم‌افزار با نام مدل آسیب بتن^۵، سه پارامتر گسترش ترک، اثر آهنگ کرنش و معادله حالت^۶ را در نظر می‌گیرد. مدل ماده تیپ ۹۶ با نام مدل آسیب ترد^۷، فقط دو پارامتر گسترش ترک و آهنگ کرنش را در نظر می‌گیرد. همه مدل‌های اشاره‌شده با در نظر گرفتن معیارهای گسیختگی مختلف، قابلیت مدل‌سازی بارهای ضربه‌ای و انفجاری بتن را دارا می‌باشند [۱۷]. 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 نرم‌شوندگی غیرخطی بتن الیافی را پس از شروع تسلیم نمی‌توانند مدل کنند و ثانیاً این مدل مواد دارای پارامترهای زیادی هستند که به‌دست آوردن این پارامترها نیاز به انجام آزمایش‌های مختلف دارد و با آزمایش‌های مادی ساده (تست کشش و فشار تک‌محوری) به‌دست نمی‌آیند.

در نتیجه در این مقاله، برای مدل‌سازی سرعت نفوذ بالای پرتابه و هدف، از مدل ماده الاستیک-پلاستیک هیدرودینامیک^۸ که مدل ماده شماره ۱۰ نرم‌افزار ال اس-دایناس می‌باشد، استفاده شده است. خصوصیت این مدل ماده این است که اولاً رفتار نرم‌شوندگی غیرخطی بتن الیافی را با دادن مقادیر تنش موثر بر حسب کرنش موثر پس از شروع تسلیم، به خوبی مدل می‌کند و ثانیاً تمامی پارامترهای مورد نیاز برای مشخص کردن خصوصیات



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

۳- شبیه‌سازی عددی

۳-۱- مفاهیم اساسی

در نرم‌افزار ال اس-دایناس^۱ امکان تحلیل در محیط‌های دینامیکی غیرخطی، روش‌های پیشرفته مش‌بندی 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 فناوری‌های مدرنی هستند که این نرم‌افزار را برای مدل‌سازی ضربه‌ای مناسب می‌سازد. در بیشتر

2- Winfrith Concrete

3- CEB

4- Pseudo Tensor Concrete

5- Concrete Damage Model

6- Equation of state (EOS)

7- Brittle Damage Model

8- Elastic-Plastic Hydrodynamic

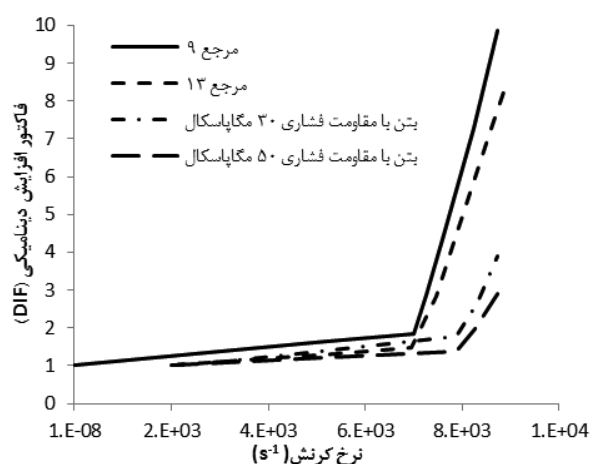
1- LS-DYNA

دارد [۱۴]. اثرات نرخ کرنش در سازه‌های بتنی را می‌توان با استفاده از فاکتور افزایش دینامیکی - که عبارت است از نسبت مقاومت کششی دینامیکی^۴ به مقاومت کششی استاتیکی - بیان کرد.

جدول ۱- پارامترهای خواص مادی و معادله حالت پرتابه و نمونه‌های بتنی [۱۹]

پارامترها	پرتابه	درصد حجمی الیاف فولادی		
		%۱	%۱/۵	%۲
چگالی (kg/m ^۳)	۷۸۷۰	۲۳۵۰	۲۳۶۰	۲۴۷۰
مدول برشی (GPa)	۷۷/۵	۵۵/۳۰	۶۳/۱۵	۲۴/۵۹
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 سخت‌شوندگی (GPa)	۴/۲	-	-	-
سرعت شوک (m/s)	۴۵۷۰	۱۶۹۲/۵	۱۷۹۶/۰	۱۸۱۳/۶
ضریب هوگونیت	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰
ثابت گرونایزن	۲/۱۷	-	-	-

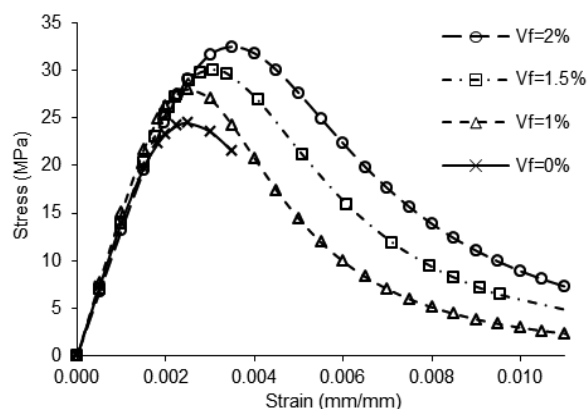
طبق تحقیقات انجام گرفته توسط محققین همانند شکل (۳) می‌توان برای نرخ کرنش‌های کمتر از $10^2 s^{-1}$ مقدار فاکتور افزایش دینامیکی را عدد ۱/۵ در نظر گرفت [۹-۱۳]. بنابراین با داشتن مقدار فاکتور افزایش دینامیکی و مقاومت کششی استاتیکی که از تست کشش غیر مستقیم بدست می‌آید، می‌توان مقاومت کششی دینامیکی نمونه‌های بتنی را بدست آورد و از آن به‌عنوان معیار گسیختگی کششی نمونه‌های بتنی استفاده کرد.



شکل ۳- نمودار تغییرات فاکتور افزایش دینامیکی بر حسب اثرات نرخ کرنش در سازه‌های بتنی [۱۳]

این مدل ماده با تست ساده فشار تک‌محوری به‌دست می‌آید. این مدل ماده در حالت ساده به صورت یک منحنی دو خطی الاستیک - پلاستیک، تنش بر حسب کرنش برای بیشتر فلزات می‌باشد.

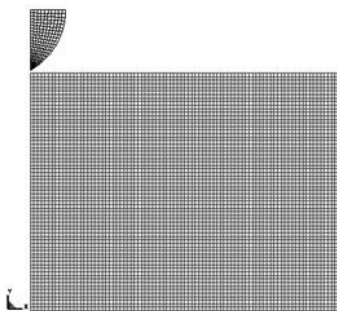
همچنین این مدل ماده را می‌توان برای پیش‌گویی رفتار نرم‌شوندگی غیرخطی اهداف بتنی مسلح به الیاف فولادی^۱، با دادن ۱۶ نقطه تنش موثر، بر حسب کرنش پلاستیک موثر استفاده کرد. در شکل ۲ دیگرام تنش-کرنش تجربی از تست فشار تک‌محوری برای بتن ساده و بتن الیافی نشان داده شده است. مشخص است که استفاده از الیاف در ماتریس بتن باعث افزایش مساحت ناحیه نرم‌شوندگی بتن الیافی در مقایسه با بتن ساده می‌شود. همچنین به علت فشار بالای حاصل در منطقه برخورد و تغییر چگالی ماده پرتابه و هدف، برای تعیین فشار هیدرواستاتیکی و تعریف خواص الاستیسیته ماده پرتابه، از معادله حالت میگرونایزن که در واقع ارتباط بین کرنش حجمی، تنش هیدرواستاتیکی و مدول بالک است استفاده شده است [۱۸]. در جدول (۱) می‌توان پارامترهای مربوط به خصوصیات مادی و معادله حالت در ناحیه الاستیک برای پرتابه و اهداف بتنی، را مشاهده کرد [۱۹]. لازم به توضیح است که پارامترهای ضریب هوگونیت^۲ و ثابت گرونایزن^۳ توسط تست‌های تجربی ضربه پرتابه فلزی [۲۰] و هدف بتنی [۲۱] به‌دست آمده است.



شکل ۲- دیگرام تنش-کرنش از تست فشار تک‌محوری برای بتن ساده و بتن الیافی

در تحقیق حاضر به خاطر آن که سرعت بارگذاری فوق‌العاده بالاست، باید اثرات نرخ کرنش را مد نظر قرار دهیم. 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

1- Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)
2- Hugoniot coefficient
3- Gruneisen's gamma



شکل ۵- شبکه مش‌بندی دو بعدی تقارن محوری پرتابه و هدف

در جدول (۲) 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 شبیه‌سازی بررسی شده است.

جدول ۲- 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
نیم‌کروی	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 نرم‌افزار ال اس داینه، نبود هیچ‌گونه 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 نرم‌افزار جاری وجود دارد. برای آن که بتوان اثر الیاف را در رفتار ضربه‌ای بتن مدل کرد، تنها راه حل، استفاده از گزینه خرابی المان^۱ها به عنوان معیار شکست مادی ماتریس بتن می‌باشد [۱۹]. با استفاده از نتایج تجربی، از معیارهای ماکزیمم کرنش برشی^۲ در شکست، برای پرتابه و هدف بتنی، و از معیار ماکزیمم تنش کششی^۳ در شکست، برای هدف بتنی به منظور نحوه گسیختگی هدف در اثر لایه‌لایه شدن در سطوح زیری هدف و خورد شدن^۴ هدف در سطح بالایی نمونه در نرم‌افزار استفاده شده است. هنگامی که کرنش موثر پلاستیک یا تنش کششی در المان‌ها به مقادیر بحرانی خود برسند، المان مورد نظر 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

۳-۲- نحوه شبیه‌سازی

در این تحقیق، برای مدل‌سازی هندسی و ایجاد شبکه مش‌بندی، از پیش‌پردازشگر اف ای ام بی ۲۸^۱ استفاده شده است. پرتابه و نمونه بتنی به صورت دوبعدی و تقارن محوری با یک نقطه انتگرال‌گیری مدل‌سازی شده‌اند. همچنین حل مسئله به روش لاگرانژی صورت گرفته است. پرتابه‌های فلزی همانند شکل ۴، که دارای سر نفوذگر 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 ثانیه به هدف بتنی اصابت می‌کنند. هر یک از پرتابه‌ها به صورت تقارن محوری^۲ با ۱۹۲ المان و با سایز ۰/۹۳۵ میلی‌متر شبکه‌بندی 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 ۰/۷، ۰/۹ و ۰/۹ می‌باشد.



شکل ۴- پرتابه‌های فلزی به صورت تقارن محوری با سر نفوذگر به ترتیب از راست به چپ به شکل: اجایو، نیم‌کروی و تخت

با توجه به شکل (۵)، نمونه بتنی به صورت تقارن محوری با شعاع ۲۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و با تعداد المان‌های ۸۰×۲۰۰ و مجموعاً ۱۶۰۰۰ المان با سایز ۲۵/۱ میلی‌متر برای رسیدن به دقت جواب مناسب، شبکه‌بندی شده‌اند.

یکی از معیارهای مهم در تقسیم‌بندی پرتابه‌ها، ضریب تیزی سر پرتابه^۳ می‌باشد که فرمول‌های تجربی مختلفی برای تیزی سر پرتابه‌ها ارائه شده است. در روابط زیر، این ضریب برای پرتابه‌های اجایو، نیم‌کروی و تخت ذکر شده است [۱۳]:

$$N_{ogive}^* = \frac{1}{3\phi} - \frac{1}{24\phi^2} \quad (۸)$$

$$N_{hemi}^* \& N_{flat}^* = 1 - \frac{1}{8\phi^2} \quad (۹)$$

1- Erosion

2- Shear Strain Failure

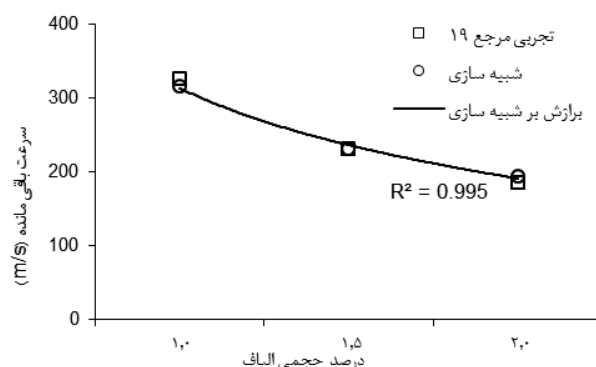
3- Tensile Cut-Off Failure

4- Scabbing

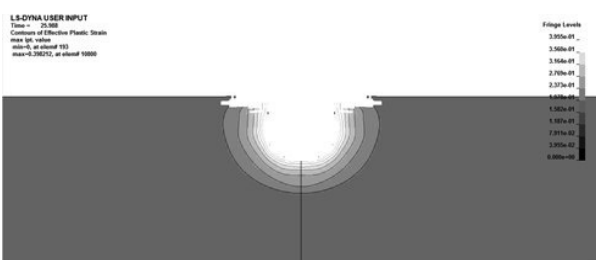
1- FEM 28

2- Axisymmetric

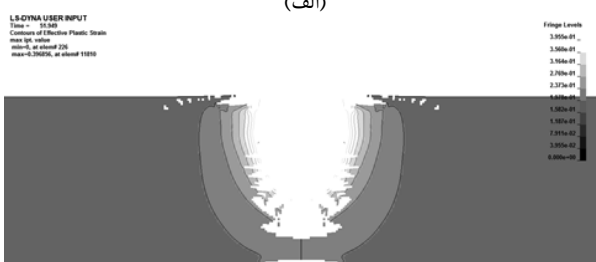
3- Nose Shape Factor



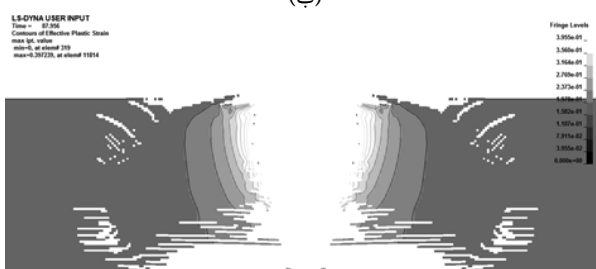
شکل ۶- مقایسه سرعت باقی مانده پرتابه با شکل نیم کروی در اثر نفوذ در اهداف بتنی با درصدهای حجمی مختلف الیاف فولادی



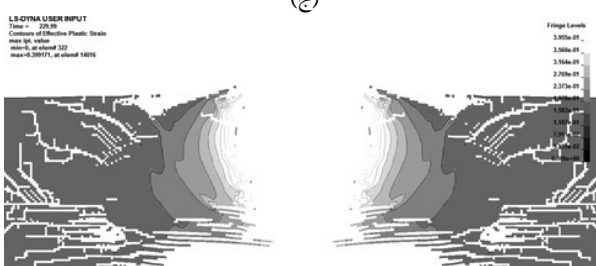
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۷- کانتور کرنش موثر پلاستیک در نمونه بتنی با ۱/۵٪ حجمی الیاف، در زمان: الف) ۲۶، ب) ۵۲، ج) ۸۸، د) ۲۳۰ میکروثانیه

المان‌ها 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 (۳) استفاده شده است.

جدول ۳- معیار فرسایش برای المان‌های پرتابه و نمونه‌های بتنی

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

۴- بحث و مقایسه نتایج

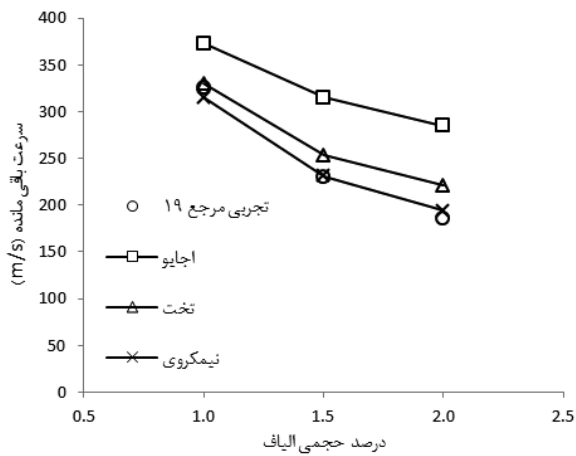
در شکل (۶) مقایسه‌ای بین حل عددی و نتایج تجربی [۱۹] بر روی سرعت باقی مانده پرتابه با شکل نیم کروی در اثر نفوذ در اهداف بتنی با درصدهای حجمی مختلف الیاف فولادی انجام گرفته است. حداکثر اختلاف بین حل عددی و نتایج آزمایشگاهی برابر با ۸٪ می‌باشد. هر دوی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی، مقاومت در برابر نفوذ پرتابه در اهداف بتنی بیشتر می‌شود و سرعت پرتابه در خروج از هدف کاهش می‌یابد.

در شکل‌های ۷ کانتورهای کرنش موثر پلاستیک و نحوه نفوذ پرتابه با سر نیم کروی در هدف و سازوکار شکل‌گیری ترک و گسیختگی نمونه بتنی با به کار بردن ۱/۵٪ حجمی الیاف، در زمان‌های ۲۶، ۵۲، ۸۸ و ۲۳۰ میکروثانیه رسم شده است.

اولین پدیده‌های خرد شدن نمونه بتنی (ناحیه شکل‌گیری حفره)، از سطح رویی نمونه در زمان ۲۶ میکروثانیه اتفاق می‌افتد. هنگامی که موج تنش فشاری در زمان ۵۲ میکروثانیه به سطح زیرین نمونه می‌رسد، به صورت امواج کششی منعکس می‌شود و در این لحظه پدیده پوسته‌پوسته شدن از سطح زیرین نمونه اتفاق می‌افتد. در زمان ۸۸ میکروثانیه هیچ‌گونه 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.

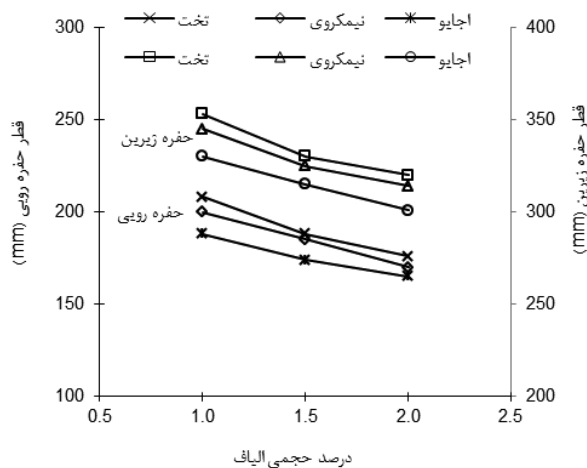
در شکل‌های (۸) تاریخچه زمانی سرعت پرتابه‌ها با شکل‌های مختلف در هنگام نفوذ در اهداف بتنی با درصدهای حجمی مختلف نمایش داده شده است. واضح است که پرتابه‌ها تقریباً با شتاب ثابتی در اهداف نفوذ می‌کنند و پس از عبور پرتابه از هدف، سرعت پرتابه به صورت یک خط مستقیم ثابت می‌ماند (سرعت باقی مانده).

در شکل (۹) سرعت باقی مانده هر پرتابه با شکل‌های مختلف، در اثر نفوذ در اهداف بتنی با درصدهای حجمی مختلف را می‌توان ملاحظه کرد.

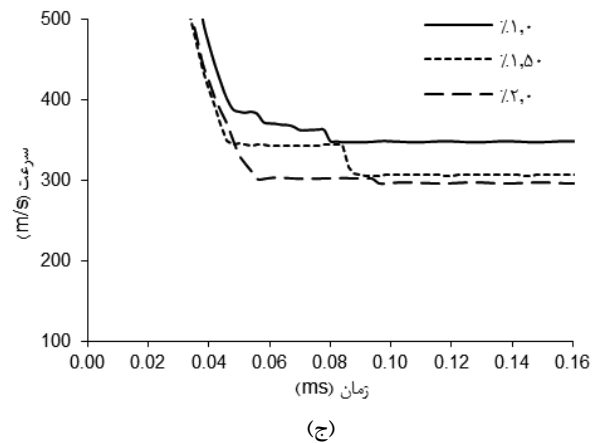
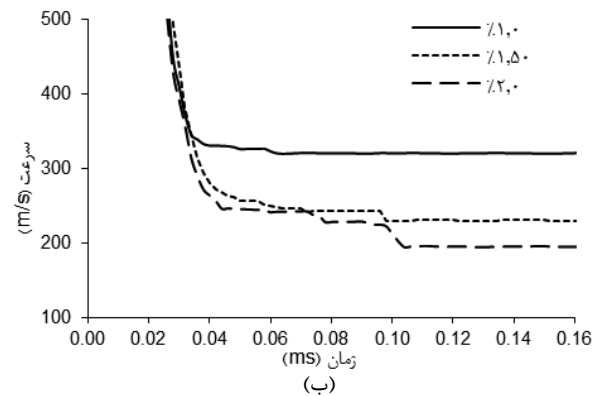
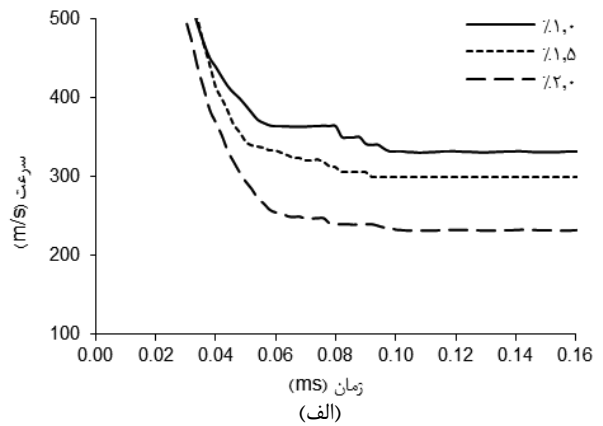


شکل ۹- نمودار سرعت باقی‌مانده پرتابه با شکل‌های مختلف در اثر نفوذ در اهداف بتنی با درصد‌های حجمی مختلف

در شکل (۱۰) قطر ناحیه پوسته‌پوسته‌شده (سطح زیرین) و قطر ناحیه ایجاد حفره (سطح بالایی)، اهداف بتنی با درصد‌های حجمی مختلف در اثر نفوذ پرتابه با شکل‌های مختلف در اهداف بتنی را می‌توان ملاحظه کرد. همچنین از روابط آزمایشگاهی یو-اس-ام-ای-تی^۱ [۱۵] با توجه به شکل (۱۱) می‌توان مقدار بی‌بعد عمق نفوذ^۲ بر حسب نسبت بی‌بعد 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 شبیه‌سازی با نتایج عملی دقت خوبی دارد.



شکل ۱۰- قطر ناحیه پوسته‌شده در سطح زیرین و قطر ناحیه ایجاد حفره در سطح بالایی اهداف بتنی



شکل ۸- تاریخچه زمانی سرعت پرتابه با سر نفوذگر: (الف) تخت (ب) نیم‌کروی، (ج) اجایو، در اهداف بتنی با درصد‌های حجمی مختلف الیاف

مشخص است که پرتابه اجایو که ضریب تیزی سر آن از پرتابه‌های دیگر کمتر است، کارایی بیشتری در حین نفوذ کامل داخل هدف دارد. همچنین پرتابه‌های نیم‌کروی و سرتخت تقریباً رفتار مشابهی در حین پدیده نفوذ دارند. همچنین برای صحت نتایج شبیه‌سازی، نتایج آزمایشگاهی [۱۹] برای پرتابه نیم‌کروی ارائه شده است.

1- USMIT

2- Normalized Depths of Penetration

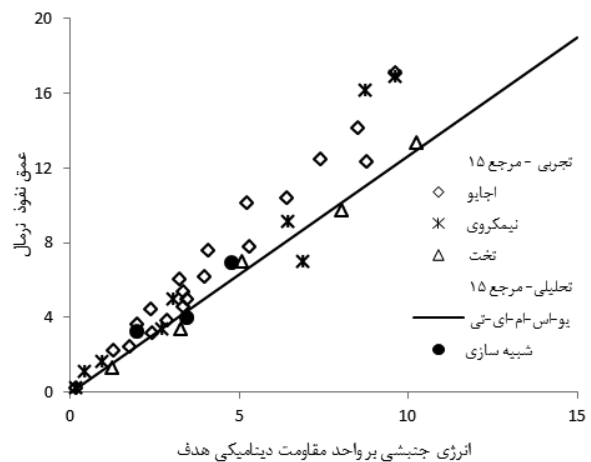
3- Kinetic Energy Per Unit of Dynamic Strength

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
F_c	مقاومت فشاری بتن، MPa
L	طول پرتابه، mm
M	جرم پرتابه، kg
N^*	فاکتور تیزی سر پرتابه
P	عمق نفوذ، mm
P_d	نسبت بی بعد عمق نفوذ
V_i	سرعت اولیه پرتابه، m/s
علائم یونانی	
ρ	چگالی، kg/m^3
σ	کالیبر سر پرتابه
φ_t	مقاومت دینامیکی، MPa
زیرنویسها	
ogive	اجایو
hemi	نیم‌کروی
flat	تخت

۷- مراجع

1. W. Jianhua, L. Jun, and Y. Haiping, The study on steel Fiber reinforced concrete under dynamic compression by damage mechanics method, Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, vol. 6, no. 7, pp. 1759-1767, 2014.
2. A. Miamoto and H. Nakamura, "Visualization of impact failure behavior for RC slab," Proceedings of 3rd International Conference on Concrete under Severe Condition, UBC, 2001.
3. J. Gao, W. Sun, and K. Morino, "Cement Concr. Compos.," vol. 19, pp. 307-313, 1997.
4. M. C. Nataraja, N. Dhang, and A. P. Gupta, "Cement Concr. Compos.," vol. 21, pp. 383-390, 1999.
5. P. S. Song and S. Hwang, "Construct. Build. Mater.," vol. 18, pp. 669-673, 2004.



شکل ۱۱- مقایسه شبهه سازی با کار تجربی مقدار بی بعد عمق نفوذ بر حسب نسبت بی بعد انرژی جنبشی بر واحد مقاومت دینامیکی هدف

۵- نتیجه‌گیری

یکی از اهداف مهم در پدافند غیرعامل استفاده از سازه‌هایی است که بیشترین مقاومت را در برابر نفوذ خارجی داشته باشند. به همین منظور در این تحقیق استفاده از الیاف فولادی به‌عنوان تقویت‌کننده در سازه‌های بتنی در برابر بار ضربه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت از دیدگاه مقابل نیز استفاده از پرتابه‌هایی که بیشترین تخریب را بر روی سازه بگذارد از اهداف محققان در بحث طراحی سلاح‌های با راندمان بالا محسوب می‌شود. از تست‌های استاتیکی مشخص است که استفاده از الیاف در ماتریس بتن باعث افزایش مساحت ناحیه نرم‌شوندگی و انعطاف‌پذیری بتن الیافی در مقایسه با بتن ساده می‌شود. از تست‌های ضربه‌ای سرعت بالا مشخص شد 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 می‌یابد و همچنین، قطر ناحیه پوسته‌شده در سطح زیرین و قطر حفره ایجادشده در سطح فوقانی هدف کاهش می‌یابد. بیشترین و کمترین درصد کاهش سرعت پرتابه به ترتیب مربوط به پرتابه با سر نیم‌کروی و سر اجایو می‌باشد. که به معنی کارایی بیشتر پرتابه با سر اجایو در نفوذ کامل در بتن می‌باشد. در واقع با کاهش فاکتور تیزی سر پرتابه‌ها از ۰/۵ به ۰/۳ و یا افزایش نسبت طول به قطر پرتابه از ۰/۵ به ۰/۹، برای پرتابه به شکل‌های تخت، نیم‌کروی و اجایو، سرعت باقی‌مانده افزایش می‌یابد.

19. L. Teng, T. Chu, Y. An et al, "Development and validation of numerical model of steel Fiber reinforced concrete for high-velocity impact," *Computational Materials Science*, vol. 42, pp. 90-99, 2008.
20. S. P. Marsh, "LASL shock hugoniot data," University of California, 1980.
21. N. Gebbeken, S. Greulich, and A. Pietzsch, "International Journal of Impact Engineering," vol. 32, pp. 2017-2031, 2006.
6. Y. Farnam, "Experimental and simulation study of the impact of high strength fibrous concrete panels," PhD Thesis, Tehran University, Tehran, 2010. (In Persian)
7. S. Tokgoz, C. Dundar, and A. K. Tanrikulu, "Journal of Constructional Steel Research," vol. 74, pp. 98-107, 2012.
8. G. Murali, A. S. Santhi, and G. Mohan Ganesh, "Empirical Relationship between the Impact Energy and Compressive Strength for Fiber Reinforced Concrete," *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 73, pp. 469-473, 2014.
9. X. X. Zhang, A. M. Abdelazim, G. Ruiz, and R. C. Yu, "Fracture behavior of steel Fibre-reinforced concrete at a wide range of loading rates.," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 71, pp. 89-96, 2014.
10. R. Sovják, T. Vavříník, P. Máca, J. Zatloukal, and P. Konvalinka, "Experimental Investigation of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete Slabs Subjected to Deformable Projectile Impact," *Procedia Engineering*, vol. 65, pp. 120-125, 2013.
11. X. Luo, W. Sun, and Y. N. Chan, "Cement Concr. Res." vol. 30, pp. 907-914, 2013.
12. F. Huang, H. Wu, Q. Jin, and Q. Zhang, "Int. J. Impact Eng.," vol. 32, pp. 173-187, 2005.
13. Q. M. Li, S. R. Reid, H. M. Wen, and A. R. Telford, "Local impact effects of hard missiles on concrete targets," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, pp. 224-284, 2005.
14. C. Leppanen, "Concrete subject to fragment impacts," PhD Thesis, Chalmer University of technology, Goteborg, Sweden, 2004.
15. H. M. Wen and Y. X. Xian, "A unified approach for concrete impact," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 77, pp. 84-96, 2015.
16. X. Quan, N. K. Birnbaum, M. S. Cowler, B. I. Gerber, R. A. Clegge, and C. J. Hayhurst, "Numerical simulation of structural deformation under shock and impact loads using a coupled multi solver approach," 5th Asia Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures, 2003.
17. J. O. Hallquist, "LS-DYNA Theory Manual," Livermore Software Technology Corporation, California, March 2006.
18. S. Feli and M. Bakhtiar, "Determination of Compressive Stress of Metallic Materials Based on Impact Test, *Mech. Aerospace J.*, vol. 8, no. 1, pp. 43- 54, 2012 (In Persian).

The Effect of Steel Fiber Reinforced Concrete Panel Under the Penetration of High-Speed Projectile

M. Hedayatian

KH. Vahedi*

Abstract

In this paper, modeling of high speed projectiles with different nose shapes, penetrating into steel fiber reinforced concrete is investigated. Numerical simulation is used using LS-DYNA cod capabilities 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 most important innovations of the present study is effect the steepness and length to diameter ratio projectile on the ballistic performance of the projectile and the effectiveness of use of steel fibers in concrete panels that increase the efficiency of passive defense.

Key Words: *High Speed Penetration, Projectiles, Steel fiber reinforced concrete, Numerical Simulation, LS-DYNA.*