

## بررسی عملکرد ضربه‌ای بتن با مقاومت بالا و بتن فوق توانمند الیافی تحت برخورد پرتابه

مرتضی سزاری<sup>۱</sup>، قاسم دهقانی اشکزری<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

(دریافت: ۹۵/۱۱/۰۷، پذیرش: ۹۶/۰۷/۲۹)

### چکیده

مقاومت و رفتار مناسب بتن فوق توانمند در مقابل بارهای ضربه‌ای می‌تواند از ویژگی‌های مهم این نوع مصالح باشد و بررسی این موضوع از اهمیت بالایی برخوردار است و نتایج تحقیق در این زمینه می‌تواند دستاورد مهمی برای طراحی و ساخت سازه‌های امن با رویکرد پدافند غیرعامل داشته باشد. هدف از این تحقیق، بررسی رفتار یک نوع بتن فوق توانمند مسلح شده با الیاف فولادی (UHPSFRC) که توسط نویسندگان طراحی و ساخته شده است، در مقابل برخورد پرتابه‌های با سرعت کم و زیاد است. جهت بررسی رفتار و قابلیت این بتن در تحمل ضربه و برخورد پرتابه‌ها، یک نوع بتن با مقاومت بالا (HSC) نیز به عنوان مبنای مقایسه ساخته شده است. رفتار این دو نوع بتن در مقابل ضربه با سرعت کم با انجام آزمایش سقوط وزنه بررسی شده است و خصوصیات شامل تعداد ضربه‌های لازم برای ایجاد اولین ترک و گسیختگی کلی، الگوی ترک‌خوردگی و قطر سوراخ شدگی در نمونه‌های بتن مد نظر قرار گرفته است. جهت بررسی این دو نوع بتن در مقابل برخورد پرتابه با سرعت بالا، از روش شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. نتایج آزمایش سقوط چکش نشان می‌دهد که HSC ترد است و مقاومت ضربه‌ای کمی دارد و در همان ضربه اول به چندین تکه شکسته می‌شود. اما UHPSFRC با دو درصد الیاف رفتاری شکل‌پذیر بروز می‌دهد و قادر به تحمل حداقل ده ضربه پی در پی چکش است. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نیز نشان می‌دهد که تحت شرایط یکسان برخورد پرتابه اجابو شکل با سرعت بالا، هدف بتنی UHPSFRC دچار نفوذ بدون سوراخ شدگی شده، اما در هدف HSC با همان ضخامت، نفوذ کامل و سوراخ شدگی اتفاق افتاده است.

**کلیدواژه‌ها:** بتن با مقاومت بالا، بتن فوق توانمند الیافی، سقوط چکش، شبیه‌سازی عددی

## Investigation of Impact Behavior of High Strength Concrete and Ultra-High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete under Impact of Projectile

M. Sezari, Gh. Dehghani Ashkezari\*

Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 26/01/2017; Accepted: 21/10/2017)

### Abstract

The purpose of this study is the investigation of the behavior of ultra-high performance steel fiber reinforced concrete (UHPSFRC) under the low and high velocity impacts. The behavior of two types of concrete panels made of UHPSFRC and a type of conventional high strength concrete (HSC) under low velocity impact was investigated by the drop-weight tests. Experimental results, including required number of drops to initiate the crack and ultimate failure, crack pattern and the damage state for both types of concrete panel specimens are compared. Besides, numerical simulations using the LS-Dyna software package were implemented on both type concrete panels under high velocity impacts. The experimental test results proved the HSC specimens to be brittle and exhibit low impact strength by failure under the first impact incident. However, the UHPSFRC specimens with 2% fibers resulted in ductile behavior and could undergo at least ten consecutive drops. The numerical simulations revealed the identical specimens made of HSC and UHPSFRC under similar high velocity impact conditions resulted in different level of damage in panels. While the specimen composed of HSC experienced the penetration with full perforation at the impact location, the UHPSFRC specimens underwent penetration with no perforation under the impact load.

**Keywords:** Ultra-High Performance Concrete, Steel Fiber, Impact of Projectile, Numerical Simulation

## ۱. مقدمه

یکی از نوآوری‌های چند دهه پیش در عرصه فناوری بتن، ساخت بتن‌های با مقاومت بالا (HSC) و به دنبال آن بتن‌های توانمند (HPC) و فوق توانمند (UHPC) است. بتن با مقاومت معمولی و مقاومت بالا هر دو دارای رفتار شکننده هستند، به طوری که با افزایش مقاومت، ترد شکنی آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. به طور کلی پذیرفته شده است که شکل‌پذیری بتن با مقاومت بالا می‌تواند با اضافه کردن انواع مختلفی از الیاف به مخلوط‌های سیمانی بهبود یابد [۱].

بتن فوق توانمند نتیجه استفاده از بهترین مواد و ساخت با حداقل نقایص مانند ریز ترک‌ها و خلل و فرج است که به منظور دستیابی به حداکثر مقاومت نهایی اعضاء و افزایش دوام است. در حال حاضر انواع مختلفی از بتن‌های فوق توانمند در صنعت بتن موجود است. تفاوت‌های اساسی بین انواع مختلف، شامل ترکیب مخلوط، نسبت آب به سیمان، نسبت آب به ریزدانه‌ها (شامل سیمان و فیلر) و اندازه حداکثر دانه است. شرحی بر انواع بتن‌های با مقاومت بالا را می‌توان در مرجع [۲] مشاهده نمود.

به علت افزایش کاربرد بتن فوق توانمند مسلح شده با الیاف در ساختمان و صنعت‌های نظامی در برابر بارگذاری‌های با سرعت بالا، این بتن‌ها ایفاکننده نقش مهمی در نجات جان افراد در کنار صرفه اقتصادی و بهره‌گیری بهتر از فضا دارند. اضافه کردن الیاف‌ها به بتن فوق توانمند، شکل‌پذیری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و استحکام آن را در برابر بارهای دینامیکی افزایش می‌دهد. به علاوه، اضافه کردن الیاف‌ها امکان گسیختگی زود هنگام و آسیب‌های پوسته‌پوسته شدن و قلوه کنی را کاهش می‌دهد، از انتشار ترک جلوگیری به عمل می‌آورد و ناحیه نرم شدگی در ماتریس بتن را بسط می‌دهد و باعث می‌شود منحنی تنش-کرنش به سمت راست کشیده شود، یعنی امکان به وجود آمدن طاقت بالا را فراهم می‌آورد.

علوی‌نیا و همکاران [۱] تأثیر میزان الیاف و سیلیکون را به صورت جداگانه و توأم بر روی نمونه‌های بتنی با مقاومت ۳۳ و ۴۸ MPa به وسیله آزمون سقوط چکش بررسی کردند. در این سری از آزمایش‌ها یک چکش فولادی به وزن ۴/۴۵ kg بر روی گوی فولادی به قطر ۶/۳۵ cm که بر روی نمونه‌های بتنی D100\*L200 mm قرار می‌گیرد، سقوط می‌کند. مؤلفان نتایج بررسی خود را در تعداد ضربه‌های لازم جهت اولین ترک قابل رؤیت (N1) و گسیختگی نهایی (N2) گزارش داده‌اند.

چندین روش آزمایش جهت تعیین مقاومت ضربه‌ای بتن‌های الیافی وجود دارد که ساده‌ترین آن‌ها آزمایش سقوط وزنه است که توسط کمیته ACI ۵۴۴ پیشنهاد شده است. نتایج آزمایشگاهی از نمونه‌های بتنی حاوی ۱٪ تا ۲٪ الیاف پلی‌پروپیلنی نشان داده که مقاومت ضربه‌ای بتن مسلح با الیاف هم به لحاظ تعداد ضربه‌های لازم برای ایجاد اولین ترک خوردگی قابل رؤیت و هم برای ایجاد

شکست نهایی، در مقایسه با بتن غیرمسلح افزایش یافته است [۳].

با استفاده از ماشین سقوط چکش، ناتراجا و همکارانش [۴] مقاومت ضربه‌ای بتن مسلح شده با الیاف فولادی را با دو مقاومت فشاری ۳۰ MPa و ۵۰ MPa بررسی کردند. نتایج نشان داده است که مقاومت ضربه‌ای همه نمونه‌ها در اولین ترک‌خوردگی و شکست نهایی با افزایش درصد حجمی الیاف، بالا می‌رود. آن‌ها دریافتند که افزودن ۰/۵٪ الیاف فولادی، افزایش مقاومت ضربه‌ای نمونه را برای اولین ترک و گسیختگی نهایی به ترتیب ۳ و ۴ برابر نسبت به بتن غیرمسلح، میسر می‌سازد. این مقادیر برای بتن با مقاومت ۵۰ MPa به ترتیب ۷ و ۱۰ ضربه گزارش شده است.

فرنام [۵] یک نوع بتن خود تراکم مسلح شده با الیاف که میزان الیاف برابر دو درصد حجم بتن عنوان شده بود، مورد بررسی ضربه‌ای به وسیله آزمایش سقوط چکش به وزن ۸/۵ Kg که از ارتفاع یک متری تحت وزن خود بر روی پانل‌های بتنی به ابعاد ۲۳×۳۰×۳۰ mm سقوط می‌کرد، قرار داد. او همچنین برای اینکه بتواند تأثیر افزودن الیاف فولادی بر روی نمونه‌های مسلح شده را مشاهده کند، از همان طرح اختلاط نمونه‌های کنترلی بدون الیاف نیز استفاده نمود. مقاومت فشاری تک محوره بتن خود تراکم ساخته‌شده، از اندازه‌گیری سه نمونه و میانگین‌گیری بین آن‌ها، تقریباً ۱۰۰ MPa گزارش شده است.

محمدی و همکارانش [۶] مقاومت ضربه‌ای یک نوع بتن الیافی را تحت آزمایش سقوط وزنه ۵/۵۴ kg و ارتفاع سقوط ۴۵۷ mm بر روی پانل‌های بتنی مسلح شده با ۱٪، ۱/۵٪ و ۲٪ الیاف (بر حسب حجم بتن) بررسی کردند. تحقیق آن‌ها بر روی دو نوع بتن الیافی با نسبت‌های ظاهری طول به قطر الیاف ( $L_f/R_f$ ) برابر ۴۰ و ۲۰ و پارامترهای تعداد ضربه‌های لازم جهت مشاهده اولین ترک قابل رؤیت و گسیختگی نهایی انجام شده بود. نتیجه مطالعه آن‌ها نشان می‌داد که پانل‌های بتنی مسلح شده با الیاف‌های  $L_f/R_f=40$  صرف‌نظر از میزان الیاف، تقریباً دو برابر پانل‌های بتنی مسلح شده با الیاف‌های  $L_f/R_f=20$  تاب ضربه‌ای دارند.

چین [۷] عملکرد ضربه‌ای اهداف ECC با الیاف دوگانه را در برابر برخورد پرتابه ۱۵ gr به قطر ۱۲/۶ mm و سرعت برخورد ۳۰۵ m/s و ۴۵۰ m/s، مورد بررسی عددی قرار داد. در این شبیه‌سازی‌ها از مدل مصالح آسیب بتن جهت مدل کردن رفتار بتن استفاده شده است و نتایج ارائه‌شده توافق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد [۷].

حدود سه دهه است که از تولید بتن‌های با مقاومت خیلی بالا که به جهت افزودن الیاف و در نتیجه داشتن شکل‌پذیری مناسب تحت عناوین توانمند و فوق توانمند نیز شناخته می‌شوند، می‌گذرد، اما همچنان نتایج آزمایشگاهی و عددی محدودی از رفتار این مصالح تحت بارگذاری‌های مختلف در دسترس است.

تحقیقات گذشته، مطالعه آزمایشی نیاز نبود و همان طرح اختلاط مورد نظر جواب‌گوی مسئله می‌بود. در ادامه برخی مشخصات مکانیکی بتن‌های با مقاومت بالای بدون الیاف (با نام- گذاری در اینجا تحت عنوان H) و فوق توانمند مسلح شده با دو درصد الیاف (با نام‌گذاری در اینجا تحت عنوان U2) که جهت شبیه‌سازی عددی به عنوان پارامترهای مدل مصالح نیاز هستند، ذکر می‌شود. شکل (۱) مخلوط بتن فوق توانمند الیافی ساخته‌شده را نشان می‌دهد.

الیاف مورد استفاده در بتن فوق توانمند معمولاً کوتاه، نرم و مستقیم هستند. از آنجا که بتن فوق توانمند معمولاً شامل درشت‌دانه نمی‌شود، ابعاد الیاف اولین تأثیر را در روانی بتن دارد. بنابراین تنها الیاف خیلی خاص در این بتن کارایی خواهند داشت. از آنجایی که این نوع الیاف فولادی تنها در کشورهای بسیار معدودی تولید می‌شوند، وارد کردن آن از خارج کشور، در حال حاضر اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین با تمهیدات صورت گرفته، این نوع الیاف از کشور آلمان و شرکت STRATEC وارد شد. طول این الیاف ۱۳ میلی‌متر و قطر آن‌ها ۰/۱۷۵ میلی‌متر است (نسبت طول به قطر ۷۴). همچنین مقاومت کششی این الیاف بیش از ۲۰۰۰ مگاپاسکال است.



شکل ۱. مخلوط بتن فوق توانمند الیافی

## ۲-۲. مشخصات مکانیکی

جهت شناسایی عملکرد استاتیکی بتن‌های مورد نظر، آزمایش‌های مقاومت فشاری و کشش مستقیم بر روی آن‌ها انجام شد. در جدول (۱) مشخصات این مصالح ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی بتن‌های با مقاومت بالا و فوق توانمند مسلح شده با الیاف

کد نمونه	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	میزان الیاف (% حجمی بتن)	مقاومت فشاری MPa	مقاومت کششی MPa	مدول الاستیسیته GPa	مدول برشی GPa	نسبت پواسون
H	۲۳۴۹	-	۶۰	۱/۳۵	۳۳/۸	۱۳/۳۵	۰/۱۶۳
U2	۲۴۱۵	۲	۱۶۰	۶/۳۶	۴۷/۶	۱۶/۹	۰/۱۹

استاتیکی، در بازه زمان تغییر می‌کنند که این تغییرات ممکن است در مقدار، جهت و یا محل اعمال بار باشد.

در بارگذاری ضربه‌ای، یک پرتابه با سرعت مشخص با سازه هدف برخورد می‌کند و به بروز پدیده‌های گوناگونی منجر

مقاومت و رفتار مناسب بتن فوق توانمند در مقابل بارهای ضربه‌ای می‌تواند از ویژگی‌های مهم این نوع مصالح باشد و بررسی این موضوع از اهمیت بالایی برخوردار است و نتایج تحقیق در این زمینه می‌تواند دستاورد مهمی برای طراحی و ساخت سازه‌های امن با رویکرد پدافند غیرعامل داشته باشد.

از این رو در این مطالعه سعی شده است که عملکرد ضربه‌ای یک نوع بتن فوق توانمند مسلح شده با الیاف فولادی (MPa)  $f_c = 160$  که توسط نویسندگان طراحی و ساخته شده است، تحت برخورد با سرعت کم سقوط چکش به صورت آزمایشگاهی و تحت برخورد پرتابه با سرعت بالا به روش شبیه‌سازی عددی بررسی شود. این بررسی‌ها به صورت مقایسه‌ای انجام شده است. بدین ترتیب که یک نوع بتن با مقاومت بالا ( $f_c = 60$  MPa) نیز به عنوان مبنای مقایسه، ساخته‌شده و آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی مشابه بر روی آن نیز صورت پذیرفته است. انتشار چنین تحقیقاتی می‌تواند زمینه آشنایی با رفتار چنین مصالحی را تحت بارگذاری‌های مختلف در سطح وسیعی فراهم آورد و شاهد استفاده فراگیر آن‌ها در صنعت ساخت سازه‌های مقاوم باشید.

## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. ساخت نمونه‌های بتنی مقاومت بالا و فوق توانمند مسلح شده با الیاف فولادی

به منظور ساخت بتن فوق توانمند با مقاومت فشاری بیش از ۱۵۰ MPa، طرح اختلاط‌های مختلفی طرح شد و از هر مخلوط ساخته‌شده سه آزمون مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر تهیه گردید. پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها به مدت ۴۵ ثانیه بر روی میز لرزان متراکم شدند و به مدت ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاه نگهداری شدند. سپس قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها عمل‌آوری شدند و در انتها مورد آزمایش مقاومت فشاری تک محوره قرار گرفتند. طرح اختلاط نهایی با توجه به نتایج به دست آمده انتخاب شد. برای ساخت نمونه‌های با مقاومت بالا با توجه به

### ۲-۳. مقاومت ضربه‌ای بتن با مقاومت بالا و بتن فوق

#### توانمند الیافی تحت ضربه با سرعت پایین

یک سازه ممکن است در طول مدت ساخت و بهره‌برداری تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی مختلفی قرار گیرد. بارهای ضربه‌ای از نوع بارهای دینامیکی هستند که برخلاف بارهای

متنابوب بر روی گوی فولادی سخت با قطر  $63/5$  میلی‌متر (که در مرکز سطح بالایی نمونه استوانه‌ای قرار دارد) رها می‌شود. در برخی از مطالعات آزمایشگاهی، بار ضربه بر روی یک پانل بتنی الیافی اعمال می‌شود که نسبت طول و عرض به ضخامت آن قابل توجه است و می‌تواند مدلی برای دال یا پوسته کامپوزیتی باشد.

در این تحقیق با توجه به عنوان و هدف تحقیق، پانل‌های مربعی شکل به طول  $30$  سانتی‌متر و ضخامت  $23$  میلی‌متر طراحی شده است. شکل (۲) قالب ساخته‌شده برای این آزمایش را نشان می‌دهد.

آزمایش بارگذاری ضربه‌ای با توجه به انواع آزمایش‌های ممکن که مورد اشاره قرار گرفت، به صورت سامانه سقوط وزنه در نظر گرفته شده است. یک وزنه به وزن  $8/5$  کیلوگرم از ارتفاع  $1$  متری بر روی پانل‌های بتنی رها می‌شود. مقدار انرژی وارد بر نمونه بتنی با توجه به مقاومت زیاد آن تقریباً  $4$  برابر میزان انرژی است که در آزمایش توصیه‌شده در ACI-544.2R (وزنه  $4/5$  کیلوپی که از ارتفاع  $0/5$  متری رها می‌شود) ارائه شده است.



شکل ۲. قالب فولادی مورد استفاده برای ساخت پانل بتنی الیافی

دستگاه سقوط وزنه مورد استفاده، در آزمایشگاه ساخته شده است و به صورت دستی و با کشیدن طناب متصل به وزنه تا ارتفاع مورد نظر عمل می‌کند. سامانه مورد استفاده برای انجام آزمایش ضربه در شکل (۳) ملاحظه می‌شود.



شکل ۳. دستگاه و آزمایش ضربه (سقوط وزنه)

می‌گردد. ایجاد هر یک از این پدیده‌ها به مشخصات پرتابه و سازه هدف ارتباط دارد. خصوصیات سلاح‌ها از قبیل وزن ( $w$ )، قطر یا کالیبر ( $d$ )، شکل، مقاومت و نوع فیوزگذاری، شرایط اصابت شامل سرعت برخورد ( $v_0$ )، زاویه برخورد و درنهایت خصوصیات مواد به‌کاررفته در هدف مانند مقاومت فشاری و سختی، غلظت، نرمی، خلل و فرج مصالح بر روی رفتار مصالح در برابر بارگذاری ضربه‌ای تأثیر می‌گذارد [۸ و ۹].

در اثر برخورد یک پرتابه به یک عضو بتنی، ایجاد پدیده‌های گوناگونی احتمال دارد 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. این پدیده‌ها شامل انعکاس<sup>۱</sup>، تغییر شکل الاستیک<sup>۲</sup>، نفوذ<sup>۳</sup>، ترک‌خوردگی و بیرون زدگی مخروطی<sup>۴</sup>، خرد شدن<sup>۵</sup>، ترک‌خوردگی شعاعی<sup>۶</sup>، قلوه کن شدن<sup>۷</sup> و عبور<sup>۸</sup> هستند.

بتن به صورت ایده‌آل یک ماده مرکب شامل خمیر سیمان، سنگ دانه (بدون آسیب) و ناحیه انتقال بین سنگ دانه و خمیر سیمان (محل شروع ترک‌های بتن از آنجا است) فرض می‌شود. بخشی از نیروی لازم برای گسترش ترک، صرف غلبه بر نیروی اینرسی سکون دو سطح ترک می‌شود. این نیروهای اینرسی از گسترش ترک جلوگیری می‌کنند و باعث افزایش مقاومت می‌شوند. البته در بارگذاری استاتیکی اثر آن‌ها بر افزایش مقاومت ناچیز است.

دومین اثری که باعث افزایش مقاومت می‌شود، شکست سنگ دانه در بارگذاری با سرعت زیادتر است. تحت بارگذاری با سرعت کند، ترک‌های در حال رشد در نواحی ضعیف خمیر سیمان و سنگ دانه رشد می‌کنند. اما در سرعت بارگذاری زیاد تعداد زیادی از ریز ترک‌های موجود در بتن شروع به رشد می‌کنند و به دلیل عدم فرصت کافی، از نواحی با مقاومت زیاد عبور می‌کنند و باعث افزایش مقاومت ظاهری در برابر گسترش ترک می‌شوند.

**ابعاد نمونه‌ها و مشخصات آزمایش ضربه:** آزمایش ضربه بتنی الیافی بر اساس توصیه‌نامه ACI-544.2R، عموماً بر روی نمونه‌های دیسکی شکل (به قطر  $15$  و ضخامت  $6$  سانتی‌متر) انجام می‌شود. نحوه انجام آزمایش بدین صورت است که یک چکش به وزن تقریبی  $4/5$  کیلوگرم از ارتفاع  $0/5$  متری به طور

<sup>1</sup> Reflection

<sup>2</sup> Elastic Deformation

<sup>3</sup> Penetration

<sup>4</sup> Cone Cracking and Plugging

<sup>5</sup> Spalling

<sup>6</sup> Radial Cracking

<sup>7</sup> Scabbing

<sup>8</sup> Perforation

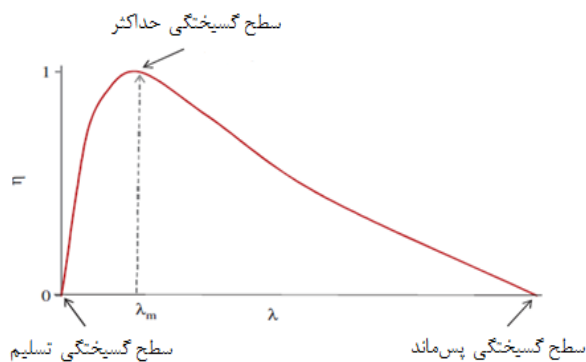
بهبودیافته (MAT 16 (pseudo\_Tensor) پیشنهاد شد. مدل آسیب بتن، یک مدل سه نامتغیری با استفاده از سه سطح تسلیم برشی که شامل اثرات آسیب و نرخ کرنش می‌شود، است. در مدل آسیب بتن همان طور که در اغلب مدل‌های ژئومتریال انجام شده است، پاسخ‌های حجمی<sup>۳</sup> و انحرافی<sup>۴</sup> تفکیک می‌شوند. رفتار حجمی به وسیله یک معادله حالت (EOS) که رفتار فشاری ماده را تشریح می‌کند، حاکم می‌شود. پاسخ انحرافی نیز مربوط به مقاومت مصالح می‌گردد. در MAT 72 بعد از اینکه نقطه تنش به سطح تسلیم اولیه قبل از سطح گسیختگی حداکثر می‌رسد، سطح فعلی به صورت خطی بین دو سطح به صورت زیر درون‌یابی می‌شود:

$$\Delta\sigma = \eta(\Delta\sigma_m - \Delta\sigma_y) + \Delta\sigma_y \quad (2)$$

بعد از رسیدن به سطح گسیختگی حداکثر، سطح فعلی به صورت خطی بین دو سطح گسیختگی حداکثر و پسماند همانند زیر درون‌یابی می‌شود:

$$\Delta\sigma = \eta(\Delta\sigma_m - \Delta\sigma_r) + \Delta\sigma_r \quad (3)$$

پارامتر  $\eta(\lambda)$  در MAT 72 موقعیت نسبی سطح گسیختگی فعلی<sup>۵</sup> (رایج) را نشان می‌دهد و تابعی از کرنش پلاستیک مؤثر یعنی  $\lambda$  است. به طور معمول  $\eta(0)$  از صفر شروع می‌شود و تا مقدار یک در  $\lambda = \lambda_m$  مقدار  $\eta$  با حداکثر مقدار  $\eta$  (یعنی ۱ است) افزایش می‌یابد و با افزایش  $\lambda$  به سمت صفر شدن پیش می‌رود (شکل (۴)).



شکل ۴. شماتیک تکامل تدریجی تابع آسیب [۱۲]

پارامتر آسیب  $\lambda$ ، انباشتگی (تجمع) آسیب را در MAT 72 نشان می‌دهد [۷]. در مدل آسیب بتن از اختلاف تنش یعنی  $\Delta\sigma = \sqrt{3}J_2$  استفاده می‌شود که به راحتی از داده‌های آزمون سه محوری محاسبه می‌شود. همان طور که در شکل (a-5) نشان داده شده

میزان انرژی وارده (E) در هر ضربه با توجه به فرمول‌های زیر قابل محاسبه است:

$$E = mgh$$

$$E = 8.5kg \times 9.81m/s^2 \times 1m \quad (1)$$

$$E = 83.385J$$

در انجام این پروژه، دو نوع شرایط تکیه‌گاهی گیردار و ساده با توزیع یکنواخت سطحی مورد بررسی قرار گرفت. برای اعمال شرایط گیرداری و ساده، تکیه‌گاهی طراحی و ساخته شد که شامل دو قید زیرین و بالایی است که توسط پیچ‌هایی به هم محکم می‌شوند و پانل بین آن‌ها قرار می‌گیرد. برای جلوگیری از تمرکز تنش یک پلاستیک سخت در محل تماس پانل و قید پایینی تعبیه شده است. برای اعمال شرایط تکیه‌گاه ساده قیود به هم پیچ نشده و برای جلوگیری از بلند شدن پانل قید بالایی توسط دست ثابت نگه داشته می‌شود.

**انجام آزمایش و ثبت نتایج:** پانل‌ها پس از آماده شدن (برای هر نوع بتن دو نمونه) در تکیه‌گاه‌های مربوطه قرار می‌گیرند و محل آن‌ها برای اصابت مرکز وزنه به نقطه مرکزی پانل تنظیم می‌شود. اطلاعاتی که در این آزمایش برای هر کدام از بتن‌ها به دست آمده شامل موارد زیر است:

- الف) تعداد ضربات وارد بر پانل برای ایجاد اولین ترک قابل رؤیت
- ب) تعداد ضربات برای رسیدن به حد گسیختگی نهایی
- پ) الگوی رفتاری و گسیختگی پانل
- ث) میزان تغییر شکل در زیر مرکز پانل بتنی در ضربه آخر

## ۲-۴- بررسی عددی بتن تحت ضربه با سرعت بالا

برای انجام مطالعات عددی در این تحقیق از نرم‌افزار Is-dyna استفاده شده است. برای شبیه‌سازی عددی برخورد و نفوذ اجسام با سرعت بالا احتیاج به انتخاب مدل‌های مناسب مصالح برای بخش انحراف‌آور تانسور تنش، کرنش و سطوح تسلیم و گسیختگی و همچنین یک معادله حالت<sup>۱</sup> برای مرتبط کردن فشار هیدرواستاتیک و کرنش حجمی است. به علاوه، یک الگوریتم فرسایش المان در مدل المان محدود لاگرانژی برای شبیه‌سازی آسیب و نشان دادن اثر برخورد پرتابه مورد نیاز است.

**مدل مصالح و معادله حالت:** مدل مصالح آسیب بتن<sup>۲</sup> (MAT 72) توسط مال‌ور و همکارانش [۱۰ و ۱۱] به عنوان نسخه

<sup>3</sup> Volumetric

<sup>4</sup> Deviatoric

<sup>5</sup> Current

<sup>1</sup> Equation of State (EOS)

<sup>2</sup> Concrete\_Damage Model

در این مطالعه از معادله حالت تراکم جدولی<sup>۱</sup> که EOS 8 در LS-DYNA شماره‌گذاری شده، برای نمایش دادن پاسخ مصالح در سطح فشار هیدرواستاتیکی که در تطابق با مدل مصالح آسیب بتن است، استفاده شده است. این معادله حالت، فشار را به صورت زیر در فاز بارگذاری فشاری تعریف می‌کند:

$$P = C(\varepsilon_v) + \gamma T(\varepsilon_v) e_i \quad (۴)$$

باربرداری در شبیهی مطابق با مدول بالک (حجمی) در پیک (فشاری‌ترین) کرنش حجمی رخ می‌دهد. بارگذاری مجدد از روی مسیر باربرداری تا نقطه‌ای که باربرداری از آنجا شروع شده بود، پیش‌روی می‌کند و بر روی مسیر بارگذاری ادامه می‌یابد. کرنش حجمی  $\varepsilon_v$  به وسیله لگاریتم طبیعی حجم نسبی یعنی  $\ln(V/V_0)$  ارائه می‌شود.  $C$  و  $T$  ضرایبی هستند که در مقابل  $\ln(V/V_0)$  جدول‌بندی شده‌اند، در حالی که  $\gamma$  نسبت گرمای ویژه است [۱۳].

**الگوریتم تماس و فرسایش:** در نرم‌افزارهای المان محدودی، توصیف‌های موجود برای جابه‌جایی مصالح عبارت‌اند از توصیف‌های لاگرانژی و اویلری که استفاده از توصیف لاگرانژی در کل، مزیت استفاده از تعداد مش کمتر و در نتیجه کاهش زمان تحلیل را دارد. در این تحقیق مش‌های لاگرانژی برای پرتابه و هدف در نظر گرفته شده است [۱۴]. در سال‌های اخیر پیشنهاد‌های زیادی برای توسعه الگوریتم‌های قابل‌اعتماد به منظور هر چه واقعی‌تر کردن تحلیل سازه‌های در معرض بارگذاری با نرخ کرنش بالا، توسعه یافته است. به عنوان مثال، یک الگوریتم فرسایش می‌تواند برای حل مسئله پیچیدگی<sup>۲</sup> بیش از حد المان و مدل کردن شکست و گسیختگی مصالح اتخاذ شود [۱۵ و ۱۶]. در این حالت هر وقت پاسخ مصالح در المان از حد معیارهای تعریف شده بیشتر شود، المان بلافاصله از ادامه تحلیل حذف می‌شود [۱۵ و ۱۶]. خاطر نشان می‌شود که برای تعیین معیارهای فرسایش روشی وجود ندارد و می‌بایست به روش سعی و خطا، با مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تعیین شوند [۱۷].

در این مطالعه، الگوریتم تماس حذف سطح به سطح<sup>۳</sup> برای رفتار سطوح مشترک برخورد در حین نفوذ اتخاذ شده است و فرض می‌شود که هیچ انتقال حرارتی بین پرتابه و هدف برای مسائل عبوری با سرعت بالا رخ نمی‌دهد. همچنین، معیارهای فرسایش کرنش اصلی حداقل و حداکثر و نیز کرنش برشی در کد محاسباتی به‌کاررفته‌اند [۱۴، ۱۵ و ۱۶].

است، فرمولاسیون این مدل پلاستیسیته مبتنی بر سه سطح برش مستقل است که توابعی از فشار هیدرواستاتیک هستند. شکل (۵) - تنش - کرنش معمول از یک نمونه تحت فشار (تک محوری) محصور نشده را نشان می‌دهد. می‌توان دید که در قسمت اول این شکل با افزایش فشار محوری، کرنش محوری نیز به صورت خطی تا زمانی که تسلیم رخ می‌دهد، افزایش می‌یابد. سپس نمونه شروع به سخت‌شدگی، تا وقتی که مقاومت حداکثر (Pt.2) حاصل شود، می‌کند. علت مستقیم بودن خط سیر، ثابت بودن نسبت تنش انحرافی به مؤلفه هیدرواستاتیکی در بارگذاری تک محوره است. بعد از حاصل شدن مقاومت حداکثر، نرم‌شدگی تا وقتی که مقاومت پسماند (Pt.3) حاصل شود، شکل می‌گیرد [۱۲].

$$\Delta \sigma_m = a_0 + \frac{p}{a_1 + a_2 p} \quad (۴) \quad \text{سطح تسلیم حداکثر}$$

$$\Delta \sigma_y = a_{0y} + \frac{p}{a_{1y} + a_{2y} p} \quad (۵) \quad \text{سطح تسلیم اولیه}$$

$$\Delta \sigma_r = + \frac{p}{a_{1f} + a_{2f} p} \quad (۶) \quad \text{سطح تسلیم پس‌ماند}$$

$P$  تنش متوسط و سایر پارامترها ثابت‌های مصالح هستند.

$$p = 1/3 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = 1/3 (\sigma_1 + 2\sigma_2) \quad (۷)$$

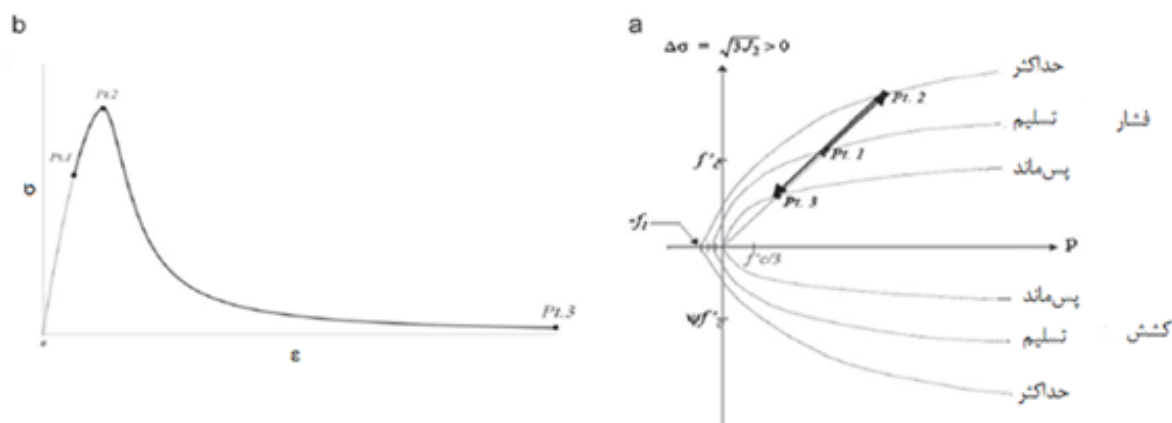
$\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  تنش‌های اصلی هستند.

یک مدل ماده نیازمند معادلاتی است که بین تنش حاصل از تغییر شکل و انرژی داخلی (یا دما) رابطه برقرار کند. در اکثر حالات، تانسور تنش ممکن است به فشار هیدرواستاتیک یکنواخت و تانسور تنش انحرافی تفکیک شود. پس مدل ماده نیازمند رابطه بین تنش هیدرواستاتیک، چگالی محلی (یا حجم ویژه) و انرژی ویژه محلی (یا دما) است که به عنوان معادله حالت شناخته می‌شود. در واقع معادله حالت فرمولی است که رابطه بین خواص مختلف یک سامانه را که قابل اندازه‌گیری و ماکروسکوپی هستند، توصیف می‌کند. برای حالات فیزیکی مصالح، این معادله معمولاً متغیرهای ترمودینامیکی؛ فشار، دما، حجم و تعداد اتم‌ها (جرم) را به یکدیگر مرتبط می‌کند. در حالت تعادل ترمودینامیکی، فشار هیدرواستاتیکی محلی  $p$ ، حجم نسبی  $V$  و انرژی داخلی  $e_i$  می‌توانند از طریق یک معادله حالت، EOS مرتبط شوند.

<sup>1</sup> Tabulated Compaction

<sup>2</sup> Distortion

<sup>3</sup> Eroding\_Surface\_to\_Surface



شکل ۵. (a) سطوح برشی در مدل آسیب بتن، (b) رفتار اساسی بتن [۱۲]

بتن، از نتایج آزمایشگاهی ونگ شاشا [۱۸] استفاده شده است. ونگ برای انجام آزمایش‌های ضربه خود از پرتابه فولادی به قطر ۱۳/۳۵ mm و طول ۲۵/۳۶ mm جرم ۱۹ gr و شعاع سر جنگی ۲/۵ است، استفاده کرد. بنا بر گزارشی که او از کار آزمایشگاهی خود ارائه کرده بود، پرتابه آسیب ناچیزی متحمل می‌شد به همین جهت در این تحقیق از مدل مصالح صلب برای پرتابه استفاده شده است.

شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه در اهداف بتنی و صحت‌سنجی آن: همان طور که اشاره شد به خاطر کارآمدی نرم‌افزار LS-DYNA در شبیه‌سازی ضربه بر روی سازه‌ها و به ویژه قابلیت آن در مدل‌سازی انواع مصالح از جمله انواع مصالح بتنی، از این نرم‌افزار در شبیه‌سازی رایانه‌ای استفاده شده است. در این تحقیق جهت اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی ضربه و نفوذ پرتابه با سرعت بالا در هدف بتنی با استفاده از مدل آسیب

جدول ۲. صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی نفوذ در بتن در این تحقیق، با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایش ونگ شاشا [۱۸]

نوع بررسی	کد نمونه	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کشش خمشی (MPa)	پرتابه		عمق نفوذ (mm)	
					سرعت (m/s)	جرم (g)	میانگین	
آزمایش ونگ شاشا [19]	HSC-1	۲۳۹۷	۸۳	۶	۶۴۱	۱۸/۸	۴۳/۸	۴۰/۱
	HSC-2				۶۴۹	۱۸/۵	۳۶/۴	
	HSC-3				۶۴۱	۱۸/۵	۴۰/۲	
شبیه‌سازی عددی در این تحقیق	HSC	۲۳۹۷	۸۳	۶	۶۴۰	۱۸/۵	۴۲/۰۳	

اهداف بتنی HSC و UHPSFRC در نظر گرفته شده است. هدف از این قسمت، تعیین عمق نفوذ و ناحیه تحت تأثیر ضربه پرتابه در اهداف بتنی است. ابعاد اهداف بتنی ۳۰۰×۱۷۰×۱۵۰ mm است. به علت تقارن فقط نصف هدف و پرتابه مدل شده است و در ناحیه برخورد پرتابه، مش‌بندی هدف نسبت به سایر قسمت‌ها ریزتر یعنی ۲ mm در نظر گرفته شده است. ابعاد مش، پس از بررسی تأثیر این پارامتر بر مقادیر پاسخ، با انجام شبیه‌سازی‌های عددی به ازای ابعاد مختلف مش از بزرگ به کوچک انتخاب شده است. شکل (۷) مدل شبیه‌سازی شده هدف و پرتابه را نشان می‌دهد.

در شکل (۶) نتیجه شبیه‌سازی آزمایش فوق‌الذکر که در این تحقیق انجام شده است، نشان داده می‌شود. عمق نفوذ اندازه‌گیری شده حاصل از این شبیه‌سازی برابر ۴۲/۰۳ mm است که در توافق خوبی با نتیجه آزمایشگاهی است. همچنین در جدول (۲) مشخصات بتن مورد مطالعه آقای ونگ شاشا به همراه اطلاعات آزمایش ضربه و نتایج حاصل از آزمایش فوق‌الذکر و شبیه‌سازی عددی انجام شده در این تحقیق مقایسه شده است.

در این مطالعه برخورد عمودی پرتابه با دماغه اجابو به طول ۲۵ mm قطر ۱۳/۵ mm و وزن ۱۳/۵ gr با سرعت ۸۰۰ m/s به

از ویژگی‌های دیگر مدل آسیب بتن، تولید خودکار پارامترهای مدل مصالح و معادله حالت سازگار با این مدل مصالح است. البته خاطرنشان می‌شود که بعضی از پارامترهای مدل مصالح می‌بایست اصلاح شوند تا بتوان رفتار هماهنگ‌تری با رفتار واقعی بتن داشت. برای چنین اصلاحاتی نیاز به در دست داشتن منحنی‌های تنش-کرنش کامل بتن در فشار و کشش و انجام شبیه‌سازی‌های تک المانی جهت مقایسه سطح زیر نمودارهای تنش-کرنش حاصل از این شبیه‌سازی‌ها و رفتار واقعی مصالح است.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مطالعه، پرتابه با رفتار الاستیک-پلاستیک کامل با مشخصات: چگالی  $2.5 \text{ gr/cm}^3$ ، مدول یانگ  $200 \text{ GPa}$ ، نسبت پواسون  $0.3$  و تنش تسلیم  $1500 \text{ MPa}$  فرض شده است.

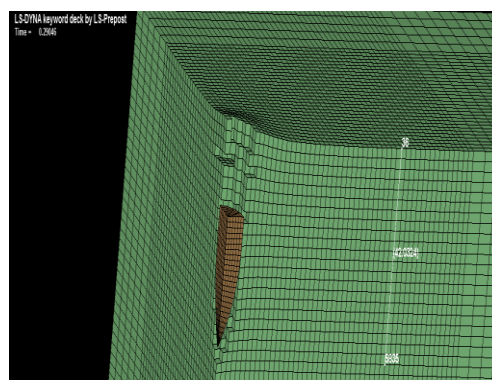
### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. نتایج آزمایش سقوط چکش

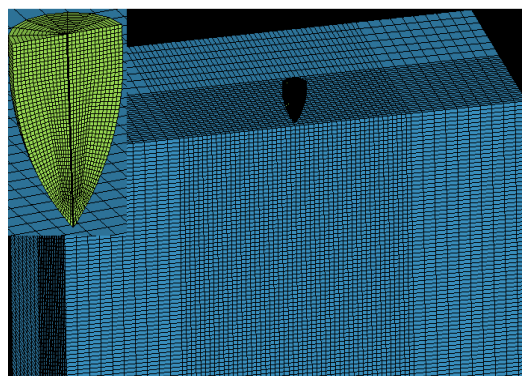
اعمال ضربه بر هر یک از پانل‌ها تا رسیدن به حد گسیختگی نهایی انجام شده است. در هر ضربه، تغییر مکان نقطه میانی پانل اندازه‌گیری شده و الگوهای ترک‌خوردگی و گسیختگی ارزیابی شده‌اند. همچنین ترک‌های ایجاد شده در وجه پشتی و رویی پانل بعد از هر ضربه با رنگ‌های مجزا مشخص شده‌اند. در جدول (۳) تعداد ضربه‌های مربوط به مشاهده اولین ترک و نیز گسیختگی، همچنین قطرهای بازشدگی و میزان تغییر مکان نهایی ارائه شده است.

در شکل‌های (۸) و (۹) نیز الگوی گسیختگی نمونه‌ها نشان داده شده است. حروف R و S همراه نام نوع بتن‌ها، به ترتیب نشان‌دهنده نوع تکیه‌گاه گیردار و ساده در آزمایش است. لازم به ذکر است که آزمایش برای هر حالت بر روی دو پانل آزمایشی انجام شده است و نتایج ارائه‌شده، متوسط هر حالت است.

یکی از ویژگی‌های مدل مصالح آسیب بتن، در نظر گرفتن نرخ کرنش به صورت تغییرات ضریب افزایش مقاومت (نسبت مقاومت در حالت دینامیکی به مقاومت در حالت استاتیکی)، DIF، در مقابل تغییرات کرنش در فشار و کشش است. محققان زیادی بر اساس نتایج آزمایشگاهی خود، روابط تجربی را برای تعیین DIF پیشنهاد داده‌اند که یکی از این روابط، فرمول‌های انجمن بتن اروپا است که در این مطالعه جهت معرفی منحنی تغییرات DIF در مقابل تغییرات نرخ کرنش استفاده شده است. جهت مشاهده این روابط به عنوان مثال می‌توان به مرجع [۱۸] مراجعه نمود



شکل ۶. مدل هدف و پرتابه در آزمایش ونگ شاشا [۱۸]، شبیه‌سازی شده در این تحقیق



شکل ۷. نصف هدف و پرتابه شبیه‌سازی شده

#### جدول ۳. تعداد ضربات، قطرهای بازشدگی (d و D) و تغییر مکان

نام نمونه	تعداد ضربه متناظر با مشاهده اولین ترک	تعداد ضربه در لحظه گسیختگی نهایی	D (پشت نمونه) (mm)	d (روی نمونه) (mm)	تغییر مکان در ضربه آخر (mm)
H-R	۱	۱	به علت چند تکه شدن قابل اندازه‌گیری نیست		
H-S	۱	۱	-	-	-
U2-R	۱	۱۰	۱۷	۸	۲۶
U2-S	۱	۱۳	۱۴	۷/۷۵	۲۲





شکل ۸. الگوی گسیختگی نهایی؛ (الف) پانل H-S و (ب) پانل H-R بعد از ضربه اول؛ (چپ) وجه جلویی و (راست) وجه پشتی



شکل ۹. الگوی گسیختگی نهایی؛ (الف) پانل U-S و (ب) پانل U-R؛ (راست) وجه پشتی و (چپ) وجه جلویی

### ۲-۳. نتایج شبیه‌سازی عددی

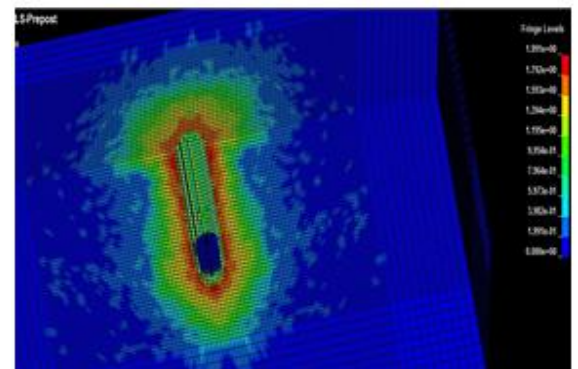
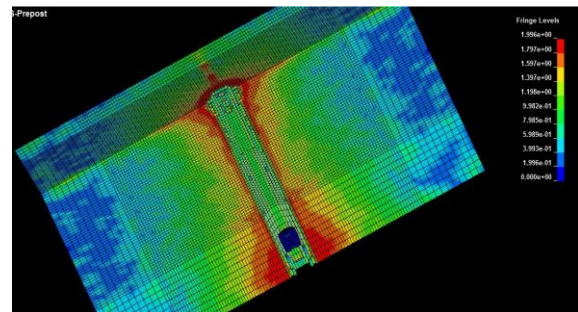
در این شبیه‌سازی‌ها از مدل مصالح آسیب بتن و پلاستیک-کینماتیک به ترتیب جهت مدل‌سازی رفتار بتن (بتن با مقاومت بالا و بتن فوق توانمند مسلح شده با الیاف) و پرتابه استفاده شده است. در شکل (۱۰) مدل‌های شبیه‌سازی شده بعد از برخورد پرتابه، نمایش داده شده است. همچنین در جدول (۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها ارائه شده است.

### جدول ۴. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برای بتن‌های با مقاومت بالا و فوق توانمند با دو درصد الیاف

کد نمونه	سرعت برخورد (m/s)	قطر ناحیه Spall (mm)	قطر حفره (mm)	عمق نفوذ (mm)
H	۸۰۰	۴۸	۲۸	سوراخ شدن هدف به ضخامت ۱۵۰ mm (نفوذ کامل)
U2	۸۰۰	۴۰	۱۶	۷۵

### ۳-۳. بحث

با توجه به گسترش روزافزون کاربرد بتن‌های با مقاومت بالای الیافی، ارزیابی و شناسایی عملکرد چنین مصالحی تحت بارگذاری‌های مختلف و بهینه‌سازی جهت کاربری‌های خاص، فارغ از مسائل نظامی و تهدیدها، از نظر صرفه اقتصادی و استفاده مفید از فضا در مصارف متنوع، امری بدیهی به نظر می‌آید. البته این تحقیق با رویکرد تأمین ملاحظات پدافند غیرعامل در حوزه تهدیدات ضربه‌ای انجام شده است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، هدف از این تحقیق بررسی رفتار ضربه‌ای یک نوع بتن فوق توانمند مسلح شده با الیاف فولادی تحت برخورد پرتابه با سرعت پایین و بالا به ترتیب به روش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی است و به عنوان مبنای مقایسه، جهت بررسی این رفتار، یک نوع بتن با مقاومت بالا نیز ساخته شده و تحت بررسی‌های مشابه قرار گرفته است. لازم به یادآوری است که اگر چه تحقیقات در دسترس محدودی در



شکل ۱۰. مدل‌های شبیه‌سازی شده اهداف بتنی؛ (بالا) HSC و (پایین) UHPSFRC

این پدیده بدین صورت قابل توجیه است که اولین ترک، از نوع ترک‌های موضعی است که به طور عمده متأثر از خواص بتن است و الیاف فولادی استفاده شده در این تحقیق تأثیر چندانی در آن ندارد (از این رو انتظار می‌رود که الیاف با ابعاد ریزتر در ایجاد اولین ترک مؤثر واقع شوند). در خصوص تأثیر مقاومت بتن در ایجاد اولین ترک، می‌توان گفت این پارامتر در ایجاد اولین ترک مؤثر است، اما علت اینکه در این تحقیق تأثیری در تعداد ضربه‌های لازم برای ایجاد آن نداشته، این است که انرژی ضربه وارد شده (وزن چکش و ارتفاع سقوط) از انرژی لازم برای ایجاد اولین ترک خوردگی هر دو نوع بتن، بیشتر بوده است. بنابراین پیش‌بینی می‌شود که اگر ضربه به صورت ضعیف‌تری (با انرژی کمتری) اعمال می‌شد، به طور مسلم بر خلاف نتایج آزمایش‌های ضربه در این تحقیق، تعداد ضربه‌های لازم برای ایجاد اولین ترک در بتن فوق توانمند نسبت به بتن توانمند بیشتر می‌شد.

استفاده از الیاف در بتن‌های با مقاومت کمتر، تنها بهبود ناپذیری را در رفتار بتن به لحاظ تعداد ضربه‌های لازم برای گسیختگی فراهم می‌آورد. علت ناپذیر بودن بهبود رفتار را می‌توان در پایین بودن مقاومت چسبندگی بین ماتریس بتنی و الیاف‌ها در اثر کم بودن مقاومت این نوع بتن جستجو کرد، به طوری که به علت پیوند ضعیف ماتریس-الیاف، قبل از اینکه انتقال تنش محسوسی از ماتریس به الیاف صورت گیرد، الیاف‌ها از ماتریس جدا و فاقد کاربری مورد انتظار می‌شوند. بنابراین با توجه به هزینه الیاف، استفاده از آن در بتن‌های با مقاومت کمتر، به لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر نیست.

**تحلیل و تفسیر نتایج شبیه‌سازی عددی:** اکثر محققان بیان داشته‌اند که مقاومت فشاری عامل اصلی تأثیرگذار بر عمق نفوذ است. از این رو شاهد عمق‌های نفوذ متفاوت در اهداف بتنی مورد نظر هستیم (جدول ۴). در شکل (۹) برای نمونه HSC شاهد ناحیه با شعاع بزرگ‌تری در وجوه جلویی و پشتی که تحت تأثیر ضربه پرتابه قرار گرفته، هستیم. علت این قضیه نیز به تفاوت آشکار میزان مقاومت دو نمونه در ترم‌های کشش و فشار و همچنین کرنش پذیری و به دنبال آن تفاوت میزان چقرمگی (طاقات) نمونه‌ها مربوط می‌شود. در این شکل همچنین شاهد هستیم که حفره با قطر کوچکی که تقریباً محدود به ناحیه تماس هدف و پرتابه می‌شود، به وجود آمده است. با توجه به این که در شبیه‌سازی‌های این تحقیق تغییرات متعددی در میزان معیارهای فرسایش اعمال شد و تفاوتی در نتایج حاصل نگردید (نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی ونگ شانشا [19] نیز اختلاف حدود ۴۰٪ را در تعیین این پارامتر نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد) می‌توان گفت به علت در نظر گرفته نشدن معیار فرسایش در مدل آسیب بتن و نیز معیاری که مربوط به کرنش

مورد عملکرد ضربه‌ای بتن‌های با مقاومت بالا موجود است، با این حال، نظر به تفاوت اجزای به‌کاررفته و طرح اختلاط استفاده شده جهت ساخت بتن‌های مورد نظر و همچنین مشخصات متفاوت، شناسایی رفتار بتن‌های ساخته شده در این تحقیق، ضرورت خاص خود را دارد.

**تحلیل و تفسیر نتایج آزمایش سقوط وزنه:** مطابق نتایج آزمایش‌ها، نمونه بتن فوق توانمند با دو درصد الیاف در هر دو حالت شرایط تکیه‌گاهی می‌تواند تعداد ضربه بیشتری را نسبت به نمونه بتنی با مقاومت بالا متحمل شود. علت تحمل تعداد ضربه بیشتر برای گسیختگی در مورد نمونه UHPSFRC می‌تواند به مقاومت‌های فشاری و کششی بیشتر و همچنین جذب انرژی بالاتر و تنش جاداشدگی بزرگ‌تر در این نمونه مربوط باشد. برای نمونه‌های HSC با توجه به اینکه در همان ضربه اول شکسته می‌شوند، نمی‌توان در مورد شرایط تکیه‌گاهی اظهار نظر کرد. اما نتایج حاصل از نمونه‌های فوق توانمند مسلح شده با دو درصد الیاف نشان می‌دهد که در حالت داشتن شرایط تکیه‌گاهی ساده، می‌توان انتظار تحمل ضربه‌های بیشتری را داشت. علت این امر، صلبیت بیشتر تکیه‌گاه گیردار نسبت به تکیه‌گاه ساده است، به نحوی که سبب شده است تمام انرژی وارده از طریق وزنه در تکیه‌گاه گیردار به پانل منتقل شود. ولی در تکیه‌گاه ساده، این انرژی به صورت مناسبی در کل پانل و در ادامه به کف انتقال پیدا کرده است.

در شکل (۹) شاهد هستیم که نمونه بتن فوق توانمند مسلح شده با دو درصد الیاف تحت شرایط گیردار در گسیختگی نهایی متحمل آسیب کمتری شده است. علت این امر ممکن است مربوط به این قضیه باشد که برای یک مصالح همگن و با مقاومت فشاری و کششی یکسان و مود رفتار خمشی، تکیه‌گاه گیردار موجب توزیع لنگرها و نیروها و دور شدن از تمرکز لنگر در وسط دهانه به سمت توزیع لنگر در تکیه‌گاه‌ها و توزیع باربری متعادل‌تر در سطح پانل می‌شود. افزودن الیاف باعث می‌شود که مود رفتاری عضو از حالت ترد به حالت شکل‌پذیر و خمشی تبدیل شود و بنابراین اثر تکیه‌گاه گیردار در توزیع لنگرها و نیروها بیشتر نمایان و میزان خرابی و بازشدگی عضو پس از ضربه دهم (گسیختگی نهایی) در حالت تکیه‌گاه گیردار کمتر از حالت تکیه‌گاه ساده می‌شود.

بر خلاف نتایج ارائه‌شده توسط محققان قبلی [۳، ۴ و ۷] مبنی بر تأثیر مقاومت بتن و الیاف در افزایش تعداد ضربه‌های لازم برای ایجاد اولین ترک، از نتایج آزمایش‌های ضربه در این تحقیق مشاهده می‌شود که تعداد ضربه‌های لازم برای ایجاد اولین ترک در بتن فوق توانمند الیافی، برابر بتن توانمند بدون الیاف است.

عمق نفوذ نیست، به طوری که کانتورهای کرنش پلاستیک، قطر ناحیه تحت تأثیر ضربه به مراتب کوچک‌تری را برای این نوع بتن نشان می‌دهند. نظر به اینکه یکی از اهداف این تحقیق، تعیین عمق نفوذ در اهداف بتنی فوق توانمند مسلح شده با الیاف فولادی و بتن با مقاومت بالا است، مطابق نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی، می‌توان انتظار داشت که با فرض استفاده از پرتابه‌ای در محدوده مشخصات ذکر شده برای پرتابه استفاده شده در این مطالعه، شاهد نفوذ و متوقف شدن پرتابه در بتن فوق توانمند الیافی و سوراخ شدن هدف بتنی با مقاومت بالا و سرعت پسماند در حدود  $40 \text{ m/s}$  پرتابه در یک بلوک بتنی به ضخامت  $15 \text{ cm}$  باشید.

#### ۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از مسئولین و همکاران انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران، جناب آقای دکتر شکرچی زاده و آقای مهندس مرادیان به خاطر همکاری‌ها و زحماتشان در انجام این تحقیق اعلام نمایند.

#### ۶. مرجع‌ها

- [1] 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.
- [2] Trüb, M. "Numerical Modeling of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites"; Swiss Federal Institute of Technology, Institute of Structural Engineering, Sep. 2011.
- [3] ACI Committee 544 "State-of-the-Art Report on Fiber-Reinforced Concrete"; Report 544.1R-96. Detroit: American Concrete Institute, 1996.
- [4] Nataraja, M. C.; Nagaraj T. S.; Basavaraja S. B. "Reproportioning of Steel Fiber Reinforced Concrete Mixes and Their Impact Resistance"; *Cement Concrete Res.* 2005, 35, 2350-2359.
- [5] Farnam, Y.; Mohammad, S.; Shekarchi, M. "Experimental and Numerical Investigations of Low Velocity Impact Behavior of High-Performance fiber-Reinforced Cement Based Composite"; *Int. J. Impact Eng.* 2010, 37220-229.
- [6] Mohammadi, Y.; Carkon-Azad, R.; Singh, S. P.; Kaushik, S. K. "Compressive Stress-Strain Behavior of Small Scale Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete Cylinders"; *J. Adv. Concr. Tech.* 2006, 1, 109-121.
- [7] Chin, L. S. "Finite Element Modeling of Hybrid-Fiber ECC Targets Subjected to Impact and Blast"; National University of Singapore, 2006.
- [8] Abrate, S. "Impact on Composite Materials and Structures"; Cambridge University Press, 1998.
- [9] Leppänen, J. "Concrete Structures Subject to Fragment Impacts"; Ph.D. Thesis, Chalmers Univ. of Tech., Göteborg, Sweden, 2004.
- [10] Malvar, L. J.; Crawford, J. E.; Wesevich, J. W.; Simons, D.

پلاستیک باشد و چون قابلیت تعریف جداگانه معیارهای فرسایش وجود ندارد، شاهد عملکرد نامناسبی از مدل مصالح آسیب بتن در تعیین قطر حفره هستید. خاطرنشان می‌شود قبل از انجام شبیه‌سازی‌های مربوط به این مطالعه، صحت‌سنجی عددی بر اساس نتایج آزمایشگاهی ونگ شاشا [19] در تعیین عمق نفوذ صورت گرفته بود که توافق خیلی خوب نتایج عددی را نشان می‌داد.

با توجه به کانتور کرنش به دست آمده برای بتن با مقاومت بالا، می‌توان انتظار داشت که در صورت انجام آزمایش میدانی بر روی این نوع بتن، شاهد قلوه‌کنی در وجه پشتی نمونه باشید. علت این امر مربوط به ضعف مقاومت در برابر کشش و رفتار شکننده این نوع بتن در بارگذاری است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که پانل‌های بتنی فوق توانمند مسلح شده با الیاف در هر شرایط تکیه‌گاهی، بیش‌ترین مقاومت ضربه‌ای را در مقایسه با بتن با مقاومت بالا از خود نشان می‌دهند. از طرف دیگر، بتن با مقاومت بالا به علت تردی، در همان ضربه اول در هر دو حالت شرایط تکیه‌گاهی به چند قطعه شکسته می‌شود و ممکن است در صورت داشتن الیاف کوتاه و مستقیم (مشابه الیاف استفاده شده برای بتن فوق توانمند) نیز عملکرد چندان قابل‌توجهی بروز ندهد. برای این که الیاف‌ها بتوانند در فرایند باربری مؤثر باشند، باید مقاومت چسبندگی قوی بین آن‌ها و ماتریس بتنی برقرار باشد تا قبل از اینکه بتوانند در فرایند باربری مؤثر واقع شوند، از ماتریس بتنی جدا نگردند. از این رو به نظر می‌رسد چنین بتنی نتواند چسبندگی لازم بین ماتریس و الیاف‌های مستقیم را فراهم آورد. در بتن فوق توانمند مسلح شده با الیاف فولادی، افزایش توأم مقاومت فشاری و چقرمگی وجود دارد و می‌توان گفت در صورت وجود نداشتن الیاف، حتماً شاهد عملکرد ضربه‌ای مشاهده‌شده در آزمایش برای این نوع بتن نمی‌بودیم و شکستگی نمونه به صورت ترد در همان یکی- دو ضربه اول مشاهده می‌شد. به طور کلی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی تصدیق‌کننده ادبیات فنی موجود، یعنی وابستگی عمق نفوذ به مقاومت نهایی است. مدل مصالح آسیب بتن با توجه به در نظر گرفتن شرایط بارگذاری با سرعت بالا از جمله تأثیر نرخ کرنش در رفتارهای کششی و فشاری بتن، مقاومت در برابر میزان نفوذ را به خوبی نشان می‌دهد. ولی به دلیل در نظر گرفته نشدن معیار فرسایش در آن، نتایج خوبی را در تعیین قطر حفره ارائه نمی‌کند و فقط قادر به حذف المان‌ها در محدوده تماس فیزیکی پرتابه- هدف است. عملکرد مناسب UHPSFRC نسبت به HSC فقط محدود به

- Comput. Mater. Sci. 2008, 42, 90-99.
- [15] Wang, Z. L.; Wu, J.; Wang, J. G. "Experimental and Numerical Analysis on Effect of Fiber Aspect Ratio on mechanical Properties of SRFC"; *Constr. Build. Mater.* 2010, 559-565.
- [16] Wang, Z. L.; Konietzky, H.; Huang, R. Y.; "Elastic-Plastic-Hydrodynamic Analysis of Crater Blasting in steel Fiber Reinforced Concrete"; *Theoretical Appl. Fracture Mechanics* 2009, 111-116.
- [17] Wang, Z. L.; Li, Y. C.; Shen, R. F.; Wang, J. G. "Numerical Study on Craters and Penetration of Concrete Slab by Ogive-Nose Steel Projectile"; *Comput. Geotech.* 2007, 1-9.
- [18] Shasha, W. "Experimental and Numerical Studies on Behavior of Plain and Fiber-Reinforced High Strength Concrete Subjected to High Strain Rate Loadings"; Ph.D. Thesis, National Univ. of Singapore, 2011.
- "A Plasticity Concrete Material Model for DYNA3D"; *Int. J. Impact Eng.* 1997, 847-873.
- [11] Malvar, L. J.; Crawford, J. E.; Wesevich, J. W.; Simons, D. "A New Concrete Material Model for DYNA3D"; Karagozian & Case, Glendale, California, USA, TR,94,14,3, 1994.
- [12] Markovich, N.; Kochavi, E.; Ben-Dor, G. "An Improved Calibration of the Concrete Damage Model"; *Finite Elements in Analysis and Design* 2011, 47, 1280-1290.
- [13] Salehi, A. "The Investigation of the Penetration of Projectile on Concrete"; M.Sc. Thesis, Khajeh Nasir Univ., Tehran, 2007.
- [14] Teng, T-L.; Chub, 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";