



## مطالعه تأثیر نوع و میزان الیاف فولادی و قطر پرتابه بر رفتار ضربه‌ای UHPSFRC

قاسم دهقانی اشکذری\*

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۳ مرداد ۱۳۹۲  
بازنگری: ۲۳ مرداد ۱۳۹۵  
پذیرش: ۶ شهریور ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۳۰ بهمن ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

بتن فوق‌توانمند  
الیاف فولادی  
برخورد پرتابه  
شبیه‌سازی عددی

**چکیده:** بسیاری از سازه‌ها در معرض بارهای حاصل از ضربه و نفوذ پرتابه‌ها (که می‌تواند ناشی از تهدیدات تصادفی، نظامی و یا خرابکارانه باشند)، قرار دارند. بنابراین بررسی و مطالعه رفتار و آسیب‌پذیری مصالح و اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای در مقابل این نوع بار و همچنین تهیه مصالحی با رفتار بهتر و آسیب‌پذیری کمتر، از اهمیت بسزایی برخوردار است. بتن فوق‌توانمند مسلح با الیاف فولادی، از جمله مصالحی است که می‌تواند رفتار بسیار مناسب‌تری را نسبت به بتن معمولی در مقابل این نوع بار داشته باشد و از عوامل اصلی و بسیار تأثیرگذار در آن نیز می‌توان به مشخصات و میزان الیاف مسلح‌کننده اشاره نمود. هدف اصلی در این تحقیق، مطالعه تأثیر میزان الیاف فولادی در محدوده مقدار معمول و اقتصادی بر رفتار ضربه‌ای بتن فوق‌توانمند است. مطالعه در برابر ضربه با سرعت کم، با آزمایش‌های سقوط وزنه و در برابر ضربه و نفوذ پرتابه‌های سرعت بالا با شبیه‌سازی‌های عددی صورت پذیرفت و اعتبار روش شبیه‌سازی ارائه شده بر اساس نتایج آزمایش‌ها تأیید شد. آزمایش‌های تعیین خصوصیات مکانیکی مورد نیاز برای مدل‌سازی بتن‌ها نیز انجام شد. همچنین تأثیر قطر پرتابه و مشخصات الیاف فولادی به ترتیب به روش‌های عددی و آزمایشگاهی مطالعه شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان میکرو الیاف از یک درصد به دو درصد حجم بتن، تعداد ضربه‌های وزنه لازم برای گسیختگی نهایی نزدیک به دو برابر شده و سطح آسیب‌دیدگی نیز کمتر می‌شود. همچنین افزایش میزان الیاف به دو درصد منجر به افزایش طاقت اهداف بتنی و کاهش عمق نفوذ و قطر حفره ناشی از برخورد پرتابه سرعت بالا می‌گردد. افزایش قطر پرتابه (که منجر به افزایش جرم آن می‌شود)، با ثابت بودن سرعت برخورد سبب افزایش نیروی ضربه و در نتیجه افزایش عمق نفوذ و قطر حفره در بتن‌های فوق‌توانمند با هر دو مقدار درصد الیاف می‌شود. اما میزان این افزایش در بتن با یک درصد الیاف به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. استفاده از ماکرو الیاف به جای میکرو الیاف، به لحاظ فنی و اقتصادی برای مسلح کردن بتن در مقابل بارهای ضربه‌ای توجیه ندارد که این موضوع، به دلیل خرد شدن بتن و جدا شدن الیاف از بتن در هنگام گسیختگی است.

دانه است. شرحی بر انواع بتن‌های با مقاومت بالا را می‌توان در مرجع [۲] مشاهده نمود.

به علت افزایش کاربرد بتن فوق‌توانمند مسلح‌شده با الیاف در ساختمان و صنعت‌های نظامی در برابر بارهای ضربه‌ای، این بتن‌ها ایفاکننده نقش مهمی در نجات جان افراد هستند. اضافه کردن الیاف به بتن فوق‌توانمند می‌تواند شکل‌پذیری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و استحکام آن را در برابر بارهای دینامیکی و ضربه‌ای افزایش بدهد. علاوه بر این، افزودن الیاف امکان گسیختگی زود هنگام و آسیب‌های پوسته‌پوسته شدن و قله‌کنی را کاهش خواهد داد. از انتشار ترک جلوگیری به عمل می‌آورد و ناحیه نرم‌شدگی در ماتریس بتن را نیز بسط می‌دهد.

نیلی و افروغ‌ثابت<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۹ میلادی، تأثیر میزان الیاف و سیلیکافوم را هم به صورت جداگانه و هم به صورت همزمان بر روی نمونه‌های بتنی با مقاومت ۳۳ و ۴۸ مگاپاسکال به وسیله آزمون سقوط چکش بررسی کردند. در این سری از آزمایش‌ها، یک چکش فولادی به جرم ۴/۴۵ کیلوگرم بر روی گوی فولادی به قطر ۶/۳۵ سانتی‌متر که بر روی نمونه‌های بتنی به

### ۱- مقدمه

بتن با مقاومت معمولی و مقاومت بالا هر دو ترد (دارای رفتار شکننده) هستند؛ به طوری که با افزایش مقاومت، تردشکنی آن 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]. یکی از نوآوری‌های اخیر در عرصه فناوری بتن، ساخت بتن فوق‌توانمند<sup>۱</sup> (UHPC) است. بتن فوق‌توانمند نتیجه استفاده از بهترین مواد و ساخت با کمینه نقایص<sup>۲</sup> (MDF) مانند ریزترک‌ها و خلل و فرج است که به منظور دستیابی به بیشینه مقاومت نهایی اعضاء و همچنین افزایش دوام توسعه یافته است. در حال حاضر، انواع مختلفی از بتن‌های فوق‌توانمند در صنعت بتن موجود است. تفاوت اساسی بین انواع مختلف شامل ترکیب مخلوط، نسبت آب به سیمان، نسبت آب به ریزدانه‌ها (شامل سیمان و فیلر) و بیشینه اندازه

<sup>1</sup> Ultra High Performance Concrete

<sup>2</sup> Macro Defect Free

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghdeas@yahoo.com

<sup>3</sup> M. Nili and V. Afrough Sabet

فوق توانمند نیز شناخته می‌شوند)، می‌گذرد. اما همچنان نتایج آزمایشگاهی و عددی محدودی از رفتار این مصالح تحت بارگذاری‌های مختلف در دسترس است. بر همین اساس سعی شده است تا در مطالعه صورت گرفته، عملکرد دو نوع بتن فوق توانمند الیافی که دارای طرح اختلاط یکسان و میزان متفاوت الیاف هستند، تحت بار ضربه‌ای بررسی شوند.

## ۲- مواد و روش

۲-۱- ساخت نمونه‌های بتن فوق توانمند مسلح شده با الیاف فولادی  
به منظور ساخت بتن فوق توانمند با مقاومت فشاری بیش از ۱۵۰ مگاپاسکال، طرح اختلاط‌های گوناگونی مطرح شد و از هر مخلوط ساخته شده، سه نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی متر برای آزمون تهیه گردید. نمونه‌ها پس از قالبگیری به مدت ۴۵ ثانیه بر روی میز لرزان متراکم و به مدت ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاه نگهداری شدند. سپس قالب‌ها باز شدند و نمونه‌ها عمل‌آوری شدند و در انتها نیز مورد آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری قرار گرفتند. طرح اختلاط نهایی با توجه به نتایج بدست‌آمده انتخاب شد. در ادامه، برخی مشخصات مکانیکی بتن فوق توانمند برگزیده مسلح شده با یک درصد الیاف (U1) و دو درصد الیاف (U2) که برای شبیه‌سازی عددی به عنوان مؤلفه‌های مدل مصالح مورد نیاز هستند، ذکر می‌شود. لازم به ذکر است که از میکرو الیاف با طول ۱۳ میلی‌متر، قطر ۰/۱۷۵ میلی‌متر (نسبت طول به قطر ۷۴) و مقاومت کششی بیش از ۲۰۰۰ مگاپاسکال استفاده شد. این الیاف از شرکت STRATEC و کشور آلمان وارد شدند. شکل ۱ بتن فوق توانمند الیافی ساخته شده را نشان می‌دهد.

## ۲-۲- مشخصات مکانیکی

به منظور شناسایی عملکرد استاتیکی بتن‌های فوق توانمند ساخته شده، آزمایش‌های مقاومت فشاری با رویکرد بدست‌آوردن منحنی تنش-کرنش



شکل ۱: مخلوط بتن فوق توانمند الیافی

Fig. 1. Fiber reinforced ultra-high performance concrete mix

طول ۲۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۰۰ میلی‌متر قرار می‌گیرد، سقوط می‌کند. مؤلفان نتایج بررسی خود را در اصطلاح‌های ضربات لازم برای اولین ترک قابل رویت (N1) و گسیختگی نهایی (N2) گزارش داده‌اند [۱].

چندین روش آزمایش برای تعیین مقاومت ضربه‌ای بتن‌های الیافی وجود دارد که ساده‌ترین آن‌ها، آزمایش سقوط وزنه است که توسط کمیته ۵۴۴ ACI پیشنهاد شده است. نتایج آزمایشگاهی از نمونه‌های بتنی حاوی یک تا دو درصد الیاف پلی‌پروپیلنی نشان داده است که مقاومت ضربه‌ای بتن (هم در اولین ترک‌خوردگی قابل رویت و هم در شکست نهایی)، در مقایسه با بتن غیرمسلح افزایش یافته است [۳].

ناتاراجا و همکارانش<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۵ میلادی، مقاومت ضربه‌ای بتن مسلح شده را توسط ماشین سقوط چکش با الیاف فولادی با نسبت ظاهری الیاف (یعنی نسبت طول به قطر) برابر با ۴۰ را در دو مقاومت ۳۰ و ۵۰ مگاپاسکال بررسی کردند. نتایج نشان داده است که مقاومت ضربه‌ای برای همه نمونه‌ها در اولین ترک‌خوردگی و شکست نهایی با افزایش درصد حجمی الیاف، بالا می‌رود. آن‌ها دریافتند که افزودن ۰/۵ درصد الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت ضربه‌ای نمونه بتن الیافی در اولین ترک و گسیختگی نهایی به ترتیب تا ۳ و ۴ برابر نسبت به بتن غیرمسلح می‌شود. این مقادیر برای بتن با مقاومت ۵۰ مگاپاسکال به ترتیب برابر با ۷ و ۱۰ ضربه گزارش شده است [۴].

فرنام<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۸ میلادی، یک نوع بتن خودمتراکم مسلح شده با الیاف (که میزان الیاف دو درصد حجم بتن عنوان شده بود) را به وسیله آزمون سقوط چکش به وزن ۸/۵ کیلوگرم که از ارتفاع یک‌متری تحت وزن خود بر روی پانل‌های بتنی ساخته شده سقوط می‌کرد، مورد ارزیابی ضربه‌ای قرار داد. او همچنین برای این‌که بتواند تأثیر افزودن الیاف فولادی را بر روی نمونه‌های مسلح شده مشاهده نماید، نمونه‌های کنترلی بدون الیاف را نیز از همان طرح اختلاط تهیه نمود. مقدار مقاومت متوسط بتن خودمتراکم ساخته شده از اندازه‌گیری سه نمونه و میانگین‌گیری بین آن‌ها بدست آمد و تقریباً برابر با ۱۰۰ مگاپاسکال گزارش شده بود [۵].

تسو-لیانگ‌تنگ و همکارانش<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۸ میلادی، سه نوع بتن مسلح شده با الیاف فولادی را با مقاومتی در حدود ۳۰ مگاپاسکال به روش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی تحت برخورد پرتابه با سرعت بالا مورد بررسی قرار دادند. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، از مدل مصالح ارتجاعی-خمیری هیدرودینامیک برای مدل کردن رفتار بتن‌های الیافی استفاده شده بود. نتایج عددی بدست‌آمده در مؤلفه‌های قطر حفره در جلو و پشت نمونه و همچنین سرعت پسماند پرتابه، تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند [۶].

حدود سه دهه است که از تولید بتن‌های با مقاومت بسیار بالا (که به علت افزودن الیاف و داشتن شکل‌پذیری مناسب تحت عناوین توانمند و

<sup>1</sup> M. C. Nataraja et al.

<sup>2</sup> Y. Farnam

<sup>3</sup> Tso-Liang Teng et al.



استاتیکی و دینامیکی مختلفی قرار گیرد. بارهای ضربه‌ای از نوع بارهای دینامیکی هستند که برخلاف بارهای استاتیکی در بازه زمان تغییر می‌کنند. 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 که منجر به بروز پدیده‌های گوناگونی خواهد شد. ایجاد هر یک از این پدیده‌ها به مشخصات پرتابه و سازه هدف ارتباط دارد. خصوصیات پرتابه مانند وزن ( $W$ )، قطر یا کالیبر ( $d$ )، شکل، مقاومت، شرایط اصابت شامل سرعت برخورد ( $V_0$ )، زاویه برخورد و در نهایت خصوصیات مواد بکار رفته در هدف مانند مقاومت فشاری، سختی، غلظت، نرمی و خلل و فرج مصالح بر روی رفتار مصالح در برابر بارگذاری ضربه‌ای تأثیر می‌گذارد [۷، ۸]. در اثر برخورد یک پرتابه به یک عضو بتنی، احتمال ایجاد پدیده‌های گوناگونی وجود دارد که وقوع این پدیده‌ها به خواص بتن، خصوصیات هندسی و فیزیکی و شکل پرتابه، ضخامت و هندسه عضو، سرعت و زاویه برخورد و غیره بستگی دارد. این پدیده‌ها شامل انعکاس<sup>۱</sup>، تغییر شکل الاستیک<sup>۲</sup>، نفوذ<sup>۳</sup>، ترک خوردگی و بیرون زدگی مخروطی<sup>۴</sup>، خرد شدن<sup>۵</sup>، ترک خوردگی شعاعی<sup>۶</sup>، قله‌کن شدن<sup>۷</sup> و سوراخ کردن<sup>۸</sup> هستند.

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

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

### ۲-۳-۲- ابعاد نمونه‌ها و مشخصات آزمایش ضربه

آزمایش ضربه بتن الیافی بر اساس توصیه‌نامه ACI-544.2R، عموماً بر روی نمونه‌های دیسکی شکل (به قطر ۱۵ و ضخامت ۶ سانتی‌متر) تحت بار ضربه انجام می‌شود. نحوه انجام آزمایش به این صورت است که

<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

کامل و کشش شکافتن (کشش برزیلی) انجام شد. در جدول ۱ مشخصات این مصالح ارائه شده است. همچنین در شکل ۲ منحنی تنش-کرنش دو نوع بتن فوق‌توانمند نشان داده شده است.

### ۲-۳-۳- مقاومت ضربه‌ای بتن فوق‌توانمند تحت ضربه با سرعت پایین

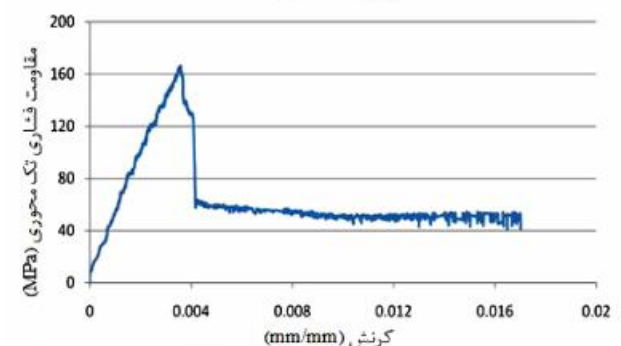
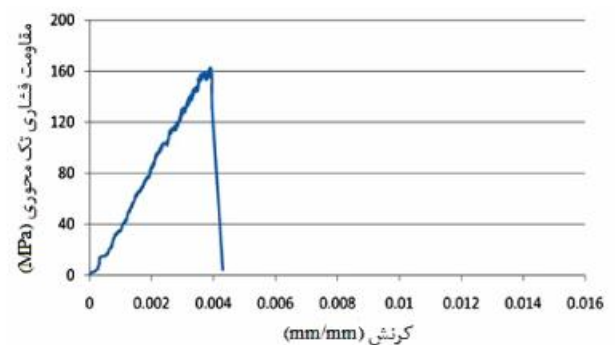
#### ۲-۳-۱- کلیات

یک سازه ممکن است در طول مدت ساخت و بهره‌برداری تحت بارهای

جدول ۱: مشخصات بتن‌های فوق‌توانمند مسلح‌شده با الیاف

Table 1. Fiber reinforced ultra-high performance concretes specifications

$U_2$	$U_1$	مؤلفه‌های بتن
۲۴۱۵	۲۴۲۴	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۲	۱	درصد الیاف (حجم بتن)
۱۶۵	۱۶۱	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)
۱۳/۸	۱۱/۶	مقاومت کشش برزیلی (مگا پاسکال)
۴۷/۶	۴۲/۳	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)
۱۶/۹	۱۵/۱	مدول برشی (گیگا پاسکال)
۰/۱۹	۰/۱۸	ضریب پواسون



شکل ۲: منحنی تنش-کرنش؛ (بالا) نمونه  $U_1$  و (پایین) نمونه  $U_2$

Fig 2. Stress-strain curve; (up)  $U_1$  Specimen, (bottom)

$U_2$  Specimen



شکل ۴: دستگاه و آزمایش ضربه

Fig. 4. Impact setup and experiment

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 برخورد پانل و قید پایینی تعبیه شده است. برای اعمال شرایط تکیه‌گاه ساده قیود به هم پیچ‌نشده و برای جلوگیری از بلندشدن پانل، قید بالایی توسط دست ثابت نگه داشته می‌شد.

#### ۲-۳-۳- انجام آزمایش و ثبت نتایج

پس از آماده‌شدن نمونه‌ها و اندازه‌گیری ابعاد، پانل در تکیه‌گاه‌های مربوطه قرار می‌گیرد و محل آن برای اصابت مرکز وزنه به نقطه مرکزی پانل تنظیم می‌شود. اطلاعاتی که در این آزمایش برای هر کدام از بتن‌های فوق‌توانمند مسلح‌شده با الیاف بدست‌آمده شامل موارد زیر است:

(الف) تعداد ضربه‌های وارد بر پانل در اولین ترک قابل رؤیت

(ب) تعداد ضربه برای رسیدن به حد گسیختگی نهایی

(ج) الگوی رفتاری و گسیختگی پانل

#### ۲-۴- شبیه‌سازی عددی بتن فوق‌توانمند مسلح‌شده با الیاف تحت ضربه با سرعت بالا

در این بررسی، رفتار نرم‌شدگی غیرخطی بتن الیافی به وسیله داده‌های جدول‌بندی منحنی تنش-کرنش در مدل مصالح هیدروپنماتیک ارتجاعی-خمیری در نرم‌افزار LS-DYANA مدل می‌شود. نرم‌شدگی غیرخطی

یک چکش به وزن تقریبی ۴/۵ کیلوگرم از ارتفاع ۰/۵ متری به طور متناوب بر روی گوی فولادی سخت با قطر ۶۳/۵ میلی‌متر (که در مرکز دایره سطح بالایی نمونه استوانه قرار دارد)، رها می‌شود. در برخی از مطالعات آزمایشگاهی، بار ضربه بر روی یک پانل بتن الیافی اعمال می‌شود که نسبت طول و عرض به ضخامت آن قابل توجه بوده و می‌تواند مدلی برای دال یا پوسته کامپوزیتی باشد.

در این تحقیق با توجه به عنوان و هدف آن، پانل‌های مربعی شکل به طول ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت ۲۳ میلی‌متر طراحی شده است. قالب فولادی با ابعاد ذکر شده طراحی و ساخته شده و در شکل ۳ قابل مشاهده است.

در این مطالعه، آزمایش بارگذاری ضربه‌ای با توجه به انواع آزمایش‌های ممکن که اشاره شد، به صورت سقوط وزنه در نظر گرفته شده است. یک وزنه به جرم ۸/۵ کیلوگرم از ارتفاع یک متری بر روی پانل‌های بتنی رها می‌شود. مقدار انرژی وارد بر نمونه بتنی با توجه به مقاومت زیاد آن، تقریباً ۴ برابر میزان انرژی است که در آزمایش توصیه‌شده در ACI-544.2R (وزنه ۴/۵ کیلوگرمی که از ارتفاع ۰/۵ متری رها می‌شود)، ارائه شده است.

دستگاه سقوط وزنه مورد استفاده در آزمایشگاه ساخته شده است و ضربه به صورت دستی و با کشیدن طناب متصل به وزنه تا ارتفاع مورد نظر (که در این مطالعه یک متر در نظر گرفته شده است)، عمل می‌کند. سامانه مورد استفاده برای انجام آزمایش ضربه، در شکل ۴ ملاحظه می‌شود.

میزان انرژی وارده ( $E$ ) در هر ضربه با توجه به رابطه ۱ قابل محاسبه است:

$$E = mgh$$

$$E = 8.5 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 1 \text{ m}$$

$$E = 83.385 \text{ J}$$

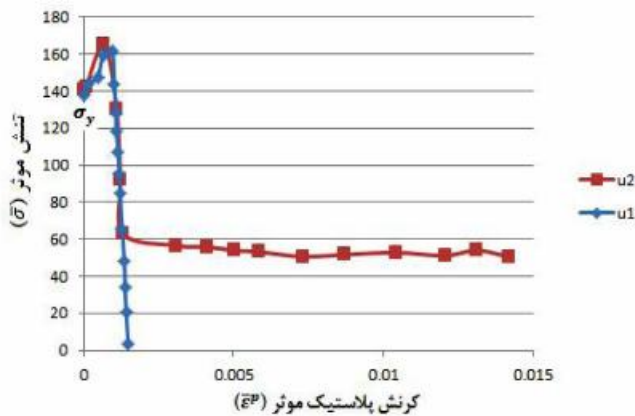
در انجام این پژوهش، دو نوع شرایط تکیه‌گاهی گیردار و ساده با توزیع



شکل ۳: قالب فولادی مورد استفاده برای ساخت پانل بتن الیافی

Fig. 3. Steel mold used to manufacturing of fiber reinforced concrete panel





شکل ۵: منحنی تنش مؤثر در مقابل کرنش پلاستیک مؤثر بتن‌های با مقاومت بالا

Fig. 5. Effective stress vs. effective plastic strain curve for high performance concretes

$$\bar{\epsilon}^p = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_y^p \dot{\epsilon}_y^p} dt \quad (5)$$

$\dot{\epsilon}_y^p$  نرخ کرنش پلاستیک (تغییرات کرنش پلاستیک نسبت به زمان) بوده که اختلاف بین نرخ کرنش کلی و نرخ کرنش الاستیک است [۶، ۸-۱۰]. در این مطالعه، معادله حالت Mie-Gruneisen در ترکیب با مدل هیدرودینامیک ارتجاعی-خمیری برای بتن بکار رفته است. این معادله حالت، رابطه میزان فشار را در یک یا دو جهت (بسته به این که ماده فشرده و یا منبسط شده است) تعریف می‌کند. این معادله، فشار را برای مصالح فشرده‌شده مطابق با رابطه ۶ تعریف می‌کند:

$$P = \frac{\rho_0 c_0 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{b}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (s_1 - 1) \mu - \left( s_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} \right) - \left( s_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right) \right]} + (\gamma_0 + b \mu) E_m \quad (6)$$

که مؤلفه‌های آن عبارتند از:

$E_m$ : انرژی داخلی در واحد حجم اولیه

$C_0$ : عرض از مبدأ منحنی  $u_s - u_p$  (منحنی سرعت موج شوک  $u_s$  بر

حسب سرعت ذره  $u_p$ )

$S_1$  و  $S_2$  و  $S_3$ : ضرایب شیب منحنی  $u_s - u_p$

$\gamma_0$ : گامای گرونیسن

$b$ : ضریب تصحیح مرتبه اول حجم بر حسب  $\gamma_0$

ثابت‌های  $\gamma_0$  و  $S_1$  و  $S_2$  و  $S_3$  و  $C_0$  و  $b$  مؤلفه‌های ورودی توسط کاربر

هستند.

تراکم  $\mu$  در اصطلاح‌های حجم نسبی به صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود:

$$\mu = \frac{v}{v_0} - 1 \quad (7)$$

بعد از تسلیم در اصطلاح‌های تنش مؤثر و کرنش پلاستیک مؤثر در فشار توصیف می‌شود. همچنین یک معادله حالت (EOS) نیز برای مرتبط کردن تنش و کرنش حجمی مربوط به پاسخ‌های شوک برای ضربه با سرعت بالا اتخاذ می‌شود. در نهایت، پاسخ ماده به پرتابه با استفاده از مدل مصالح هیدرودینامیک ارتجاعی-خمیری و EOS مدل شده است. علاوه بر این، یک الگوریتم فرسایش المان‌ها در مدل المان محدود لاگرانژی برای شبیه‌سازی خسارت پرتابه و هدف بتنی بکار گرفته شده است. خاطر نشان می‌شود در صحت‌سنجی که بر اساس نتایج آزمایشگاهی تسو-لیانگ‌تنگ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ میلادی انجام شده بود [۶]، نتایج عددی تطابق خیلی خوبی (اختلاف در حدود ۸ درصد) را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دادند.

#### ۲-۴-۱- مدل مصالح و معادله حالت

یک برنامه المان محدودی که به عنوان نرم‌افزار هیدرودینامیکی شناخته می‌شود، می‌تواند کرنش‌ها، تنش‌ها، سرعت‌ها و انتشار امواج شوک را به صورت تابعی از زمان و موقعیت محاسبه کند. برنامه المان محدود هیدرودینامیکی، تانسور تنش کلی را به فشار هیدرواستاتیکی و تنش انحرافی تفکیک می‌کند. فشار هیدرودینامیکی به وسیله معادله حالت، به چگالی و انرژی مرتبط می‌شود. تانسور تنش انحرافی نیز مقاومت مصالح را به وسیله مدل مقاومت در برابر اعوجاج برشی تشریح می‌کند.

مدل مصالح ارتجاعی-خمیری هیدرودینامیک می‌تواند به یک رابطه تنش-کرنش الاستیک-پلاستیک دو خطی برای بیشتر مواد مهندسی ساده‌سازی شود. مقاومت تسلیم ( $\sigma_y$ )، تابعی از کرنش پلاستیک مؤثر ( $\bar{\epsilon}_p$ )، مدول سخت‌شدگی پلاستیک ( $E_h$ ) و تنش تسلیم اولیه است که به وسیله رابطه ۲ بدست می‌آید [۶]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + E_h \cdot \bar{\epsilon}^p \quad (2)$$

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در صورتی که منحنی داده‌های جدول‌بندی‌شده برای برقراری رابطه بین تنش مؤثر ( $\bar{\sigma}$ ) و کرنش پلاستیک مؤثر ( $\bar{\epsilon}_p$ ) مفروض باشد، مقداری برای  $f(\bar{\epsilon}_p)$  به وسیله درون‌یابی از داده‌های منحنی شکل ۵ یافت می‌شود. در این حالت، دیگر نیازی به وارد کردن  $E_h$  در رابطه ۲ در محاسبات نیست [۹].

$$\sigma_y = f(\bar{\epsilon}^p) \quad (3)$$

همان‌طوری که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، هنگامی که کرنش پلاستیک برابر با صفر است، تنش تسلیم غیرصفر است. تنش مؤثر در اصطلاح‌های تانسور تنش انحرافی  $S_{ij}$  به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad (4)$$

و کرنش پلاستیک نیز در هر زمان  $t$  از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

<sup>1</sup> Equation of State

متر بر ثانیه به اهداف بتنی UHPSFRC در نظر گرفته شده است. هدف در این قسمت، تعیین عمق نفوذ و قطر حفره در اهداف بتنی است. ابعاد اهداف بتنی فوق‌توانمند الیافی  $400 \times 400 \times 250$  میلی‌متر است. همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، تنها تفاوت دو نوع بتن مورد نظر، اختلاف در میزان الیاف است و در این‌جا تأثیر میزان الیاف در مقاومت ضربه‌ای اهداف UHPSFRC ارزیابی خواهد شد.

به علت تقارن، فقط نصف هدف و پرتابه مدل شده است و در ناحیه برخورد پرتابه، مش‌بندی هدف نسبت به سایر قسمت‌ها ریزتر (۲ میلی‌متر) در نظر گرفته شده است. شکل ۶ مدل شبیه‌سازی شده هدف و پرتابه را نشان می‌دهد.

در شکل ۲ منحنی‌های تنش-کرنش دو هدف بتنی نشان داده شده بود و مؤلفه‌های مصالح اهداف بتنی در جدول ۲ ارائه شده‌اند. داده‌های تنش مؤثر و کرنش مؤثر پلاستیک برای مشخص کردن رفتار نرم‌شدگی در آسیب بعد از تسلیم، از شکل ۵ برداشت شده است. همچنین پرتابه ارتجاعی-خمیری کامل با مشخصات چگالی  $8/05$  گرم بر متر مکعب، مدول یانگ  $200$  گیگاپاسکال، نسبت پواسون  $0/3$  و تنش تسلیم  $1500$  مگاپاسکال فرض شده است.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- نتایج آزمون سقوط چکش

اعمال ضربه بر هر یک از پانل‌ها تا رسیدن به حد گسیختگی انجام شده است. در هر ضربه، تغییر مکان نقطه میانی پانل اندازه‌گیری و الگوهای ترک‌خوردگی و گسیختگی ارزیابی شده‌اند. ترک‌های ایجاد شده در وجه پشتی و رویی پانل بعد از هر ضربه، با رنگ‌های مجزا مشخص شده است. در جدول ۳ تعداد ضربات مربوط به مشاهده اولین ترک، گسیختگی نهایی، قطرهای بازشدگی و میزان تغییر مکان نهایی ارائه شده است. همچنین در شکل‌های ۷ تا ۱۰ الگوی گسیختگی نمونه‌ها نشان داده شده است. حرف R

که  $V_0$  حجم اولیه و  $V$  حجم فعلی است.

فشار برای مصالح منبسط‌شده از طریق رابطه ۸ بدست می‌آید:

$$P = \rho_0 c_0^2 \mu + \gamma_0 E_m \quad (8)$$

وقتی که شدت بارگذاری بسیار بالا است، EOS از طریق رابطه فشار شوک با حجم مخصوص بدست می‌آید. تغییرات سرعت شوک-سرعت ذره‌ای  $u_p - u_s$  غیرخطی است. در اغلب حالت‌ها، یک رابطه خطی بین سرعت شوک  $u_s$  و سرعت ذره‌ای  $u_p$  مطابق با رابطه ۹ اتخاذ شده و در این پژوهش، از این رابطه استفاده شده است:

$$U_s = C_0 + S_1 U_p \quad (9)$$

که  $C_0$  سرعت حجمی و  $S_1$  ثابت مصالح است [۸،۹،۱۱].

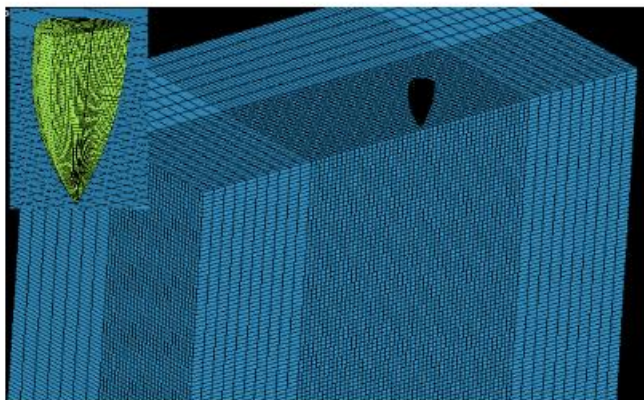
#### ۲-۴-۲- الگوریتم تماس و فرسایش

در این مطالعه، شبیه‌سازی‌های عددی به وسیله نرم‌افزار المان محدود Ls-Dyna (که یکی از کدهای جامع به ویژه در مسائل دینامیکی است)، انجام شده‌اند. در نرم‌افزارهای المان محدود، توصیف‌ها برای جابجایی مصالح عبارتند از توصیف‌های لاگرانژی و اویلری؛ که در کل، استفاده از توصیف لاگرانژی 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 [۸]. در سال‌های اخیر، پیشنهادها زیادی برای توسعه الگوریتم‌های قابل اعتماد به منظور هرچه 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>۱</sup> بیش از حد المان و مدل کردن شکست و گسیختگی مصالح اتخاذ شود [۹،۱۱]. در این حالت، هر وقت که پاسخ مصالح در المان از حد معیارهای تعریف شده بیشتر شود، المان بلافاصله در ادامه تحلیل حذف می‌شود [۹،۱۱]. خاطر نشان می‌شود که برای تعیین معیارهای فرسایش، روشی وجود ندارد و باید با روش سعی و خطا در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تعیین شوند [۱۲].

در این مطالعه، الگوریتم تماس حذف سطح به سطح<sup>۲</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 [۸،۹،۱۱]. معیار فرسایش کشش جداشدگی (که مطابق با تنش کششی مصالح است) و معیار کرنش برشی برای حذف المان‌ها در حین نفوذ پرتابه در کد محاسباتی استفاده شده است.

#### ۲-۴-۳- شبیه‌سازی نفوذ اهداف بتنی فوق‌توانمند الیافی

در این مطالعه، برخورد عمودی پرتابه با دماغه اجایو به طول  $25$  میلی‌متر، قطر  $15/5$  میلی‌متر، وزن  $11/68$  گرم و شعاع سرچنگی  $2/87$  با سرعت  $800$



شکل ۶: نصف هدف و پرتابه شبیه‌سازی شده

Fig. 6. Half of simulated target and projectile

<sup>1</sup> Distortion

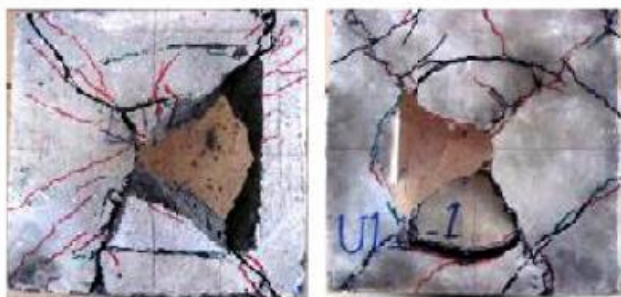
<sup>2</sup> Eroding\_Surface\_to\_Surface





شکل ۷: الگوی گسیختگی نهایی U1 بر روی تکیه‌گاه ساده بعد از ضربه ششم؛ (راست) وجه جلویی و (چپ) وجه پشتی

Fig. 7. Final failure pattern of U1 on the simple support after the sixth impact; (right) front face, (left) back face



شکل ۸: الگوی گسیختگی نهایی U1 بر روی تکیه‌گاه گیردار بعد از ضربه ششم؛ (راست) وجه جلویی و (چپ) وجه پشتی

Fig. 8. Final failure pattern of U1 on the rigid support after the sixth impact; (right) front face, (left) back face

پلاستیک-کینماتیک به ترتیب برای مدل‌سازی رفتار بتن‌های فوق‌توانمند و پرتابه استفاده شده است. در شکل ۱۱ مدل‌های شبیه‌سازی شده بعد از برخورد و متوقف شدن پرتابه نشان داده شده است. همچنین در جدول ۴ نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها ارائه شده است.

### ۳-۳- بررسی عددی تأثیر قطر پرتابه

برای بررسی تأثیر تغییرات قطر پرتابه بر میزان عمق نفوذ و قطر حفره در سطح نمونه، شبیه‌سازی‌های عددی با سه مقدار دیگر برای قطر پرتابه تکرار شده است. نتایج این بررسی به همراه قطر و جرم پرتابه‌ها در جدول ۵ ذکر

جدول ۲: مؤلفه‌های استفاده‌شده در شبیه‌سازی عددی اهداف بتنی فوق‌توانمند

Table 2. Used parameters for numerical simulation of ultra-high performance concrete targets

نمونه‌ها		مشخصات
$U_2$	$U_1$	
۲۴۱۵	۲۴۲۴	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱۶۵	۱۶۱	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)
۱۴۰/۵	۱۳۷/۵	تنش تسلیم اولیه (مگا پاسکال)
۴۷/۶	۴۲/۳	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)
۱۶/۹	۱۵/۱	مدول برشی (گیگا پاسکال)
۰/۱۹	۰/۱۸۱	ضریب پواسون
۳۴۰۰	۳۸۰۰	$C_0$ (متر بر ثانیه)
۱/۵	۱/۵	$S_1$ معادله حالت
۲	۲	$\gamma_0$
-۳۲	-۲۵	تنش Cut-off
۰/۵۵	۰/۵۲	$\gamma_{max}$ فرسایش

جدول ۳: تعداد ضربات، قطرهای بازشدگی ( $d$  و  $D$ ) و تغییر مکان

Table 3. Numbers of impacts, opening up diameters ( $D$  and  $d$ ) and displacement

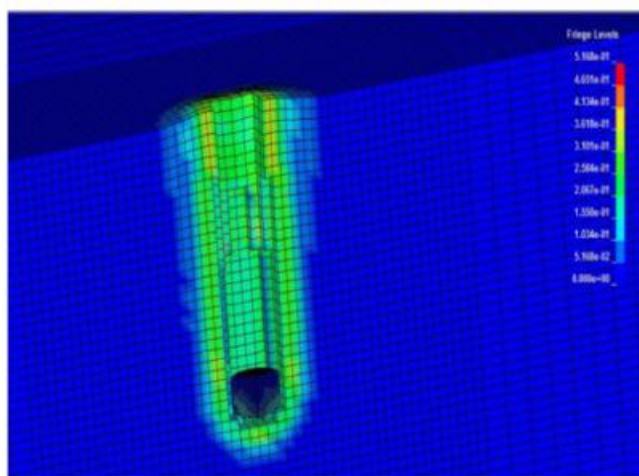
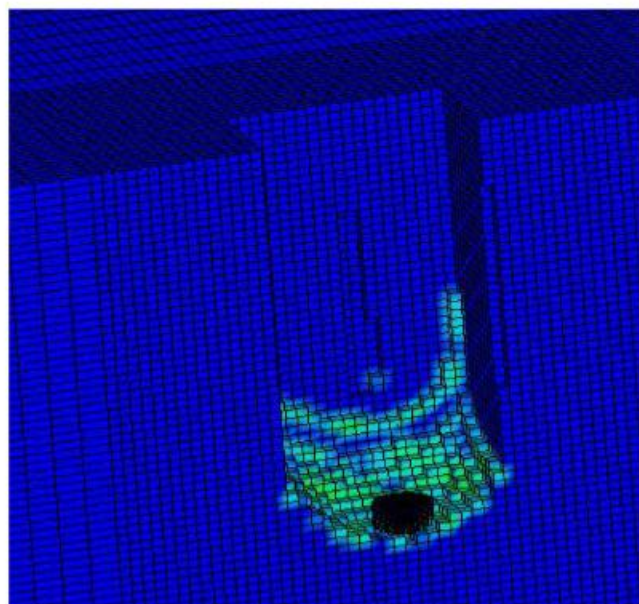
نمونه‌ها				مشخصات
$U_2-S$	$U_2-R$	$U_1-S$	$U_1-R$	
۱	۱	۱	۲	تعداد ضربه متناظر با مشاهده اولین ترک
۱۳	۹	۶	۵	تعداد ضربه در لحظه گسیختگی نهایی
۱۴	۱۷	۱۴/۵	۱۷/۵	پشت نمونه ( $D$ ، میلی‌متر)
۷/۷۵	۸	۸/۵	۱۲/۵	روی نمونه ( $d$ ، میلی‌متر)
۲۲	۲۶	۲۴	۴۷	تغییر مکان در ضربه آخر (میلی‌متر)

و  $S$  همراه نام نوع بتن‌ها به ترتیب نشان‌دهنده نوع تکیه‌گاه گیردار و ساده در هنگام انجام آزمایش است. لازم به ذکر است که آزمایش برای هر حالت بر روی دو پائل انجام شده است و نتایج ارائه‌شده، متوسط هر حالت هستند.

### ۳-۲- نتایج شبیه‌سازی عددی

در این شبیه‌سازی‌ها از مدل مصالح ارتجاعی-خمیری هیدرودینامیک و





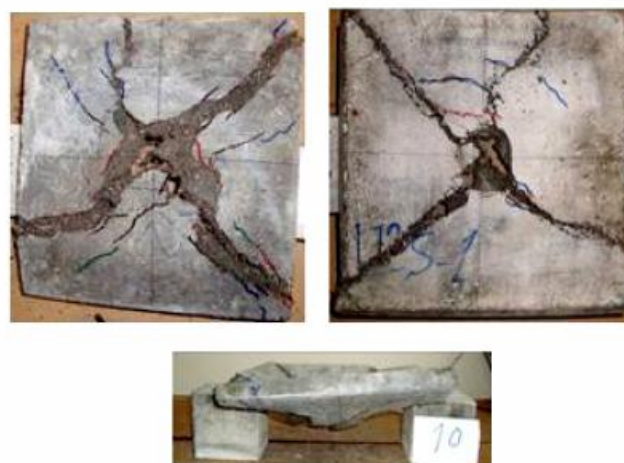
شکل ۱۱: مدل‌های شبیه‌سازی شده بعد از توقف پرتابه؛ (بالا) U1 و (پایین) U2

Fig. 11. Simulated models after projectile stop; (up) U1, (bottom) U2

جدول ۵: نتایج تغییرات قطر پرتابه بر میزان نفوذ و قطر حفره

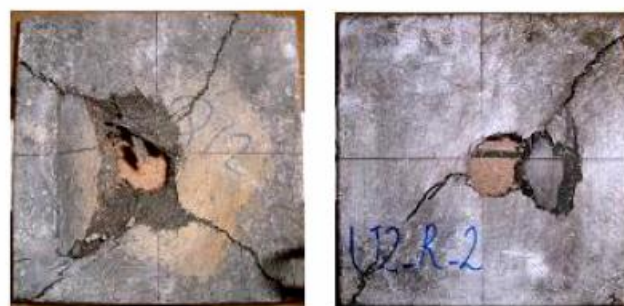
Table 5. Effects of variation of projectile diameter on the penetration depth and diameter of hole

عمق نفوذ (میلی‌متر) قطر حفره (میلی‌متر)		جرم پرتابه		قطر پرتابه (میلی‌متر)
$U_2$	$U_1$	$U_2$	$U_1$	
۱۶	۵۷	۷۵	۱۲۲/۵	۱۱/۶۸
۲۳/۲	۸۴	۸۴	۱۴۵	۱۷/۰۰
۳۱/۵۴	۹۲/۰۸	۹۰	۱۷۰	۲۹/۰۱
۴۵/۰۶	۱۱۱	۹۵	۱۹۰	۵۸/۵



شکل ۹: الگوی گسیختگی نهایی U2 بر روی تکیه‌گاه ساده بعد از ضربه دهم؛ (راست) وجه جلویی و (چپ) وجه پشتی

Fig. 9. Final failure pattern of U2 on the simple support after the tenth impact; (right) front face, (left) back face



شکل ۱۰: الگوی گسیختگی نهایی U2 بر روی تکیه‌گاه گیردار بعد از ضربه نهم؛ (راست) وجه جلویی و (چپ) وجه پشتی

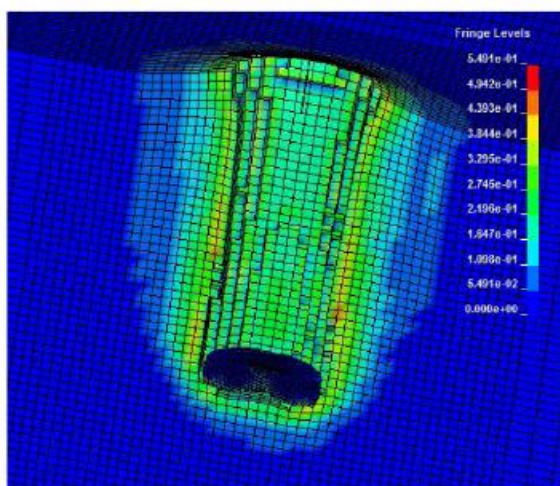
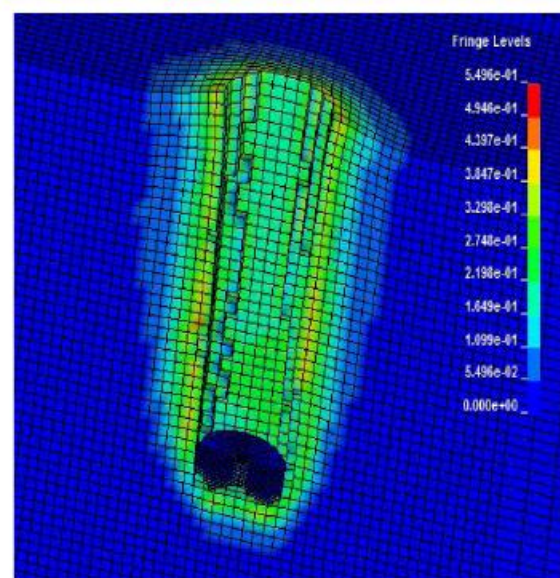
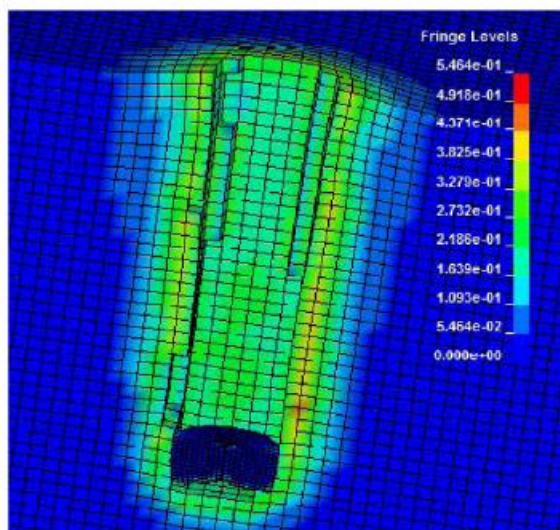
Fig. 10. Final failure pattern of U2 on the rigid support after the ninth impact; (right) front face, (left) back face

جدول ۴: نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برای بتن‌های فوق‌توانمند با یک درصد و دو درصد الیاف

Table 4. Results of numerical simulation for ultra-high performance concretes by 1% and 2% fibers

$U_2$	$U_1$	کد نمونه
۸۰۰	۸۰۰	سرعت برخورد (متر بر ثانیه)
۱۶	۵۷	قطر حفره (میلی‌متر)
۴۰	۵۷	قطر ناحیه Spall (میلی‌متر)
۷۵	۱۲۲/۵	عمق نفوذ (میلی‌متر)





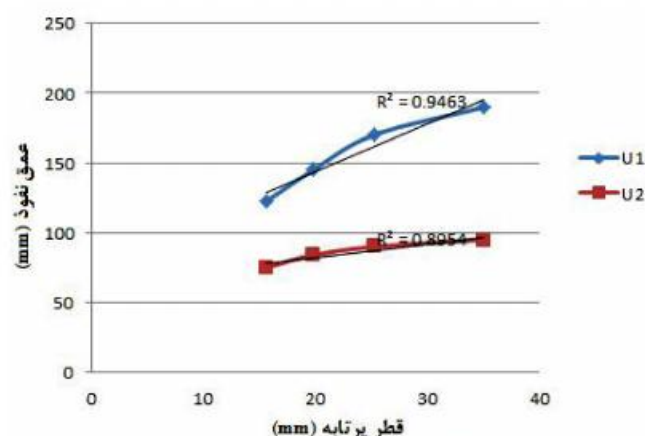
شکل ۱۴: نمونه U2 بعد از برخورد پرتابه برای مقادیر مختلف  $d$ : بالا) ۱۹/۸ میلی‌متر؛ وسط) ۲۵/۲ میلی‌متر؛ پایین) ۳۵/۰ میلی‌متر

Fig. 14. Specimen U2 after impact of projectile

شده است. همچنین در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نمودار تغییرات عمق نفوذ و قطر حفره در مقابل قطر پرتابه نشان داده شده است. در شکل ۱۴ تصاویر مربوط به نمونه U2 در لحظه توقف پرتابه در هدف نمایش داده شده است.

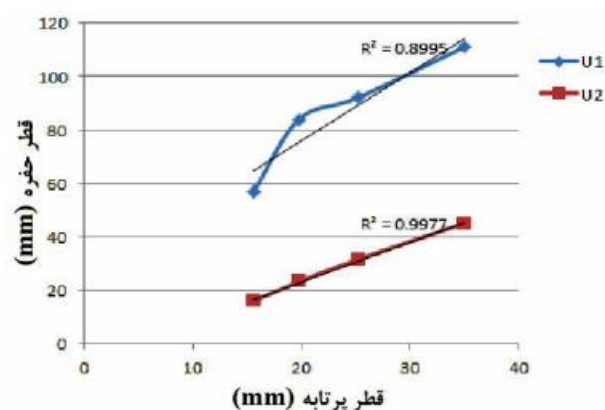
همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و همچنین جدول ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش قطر پرتابه و متناسب با آن جرم پرتابه، میزان نفوذ و قطر حفره ایجاد شده در سطح نمونه افزایش می‌یابد. این موضوع در تطابق با این دید کلی در مسائل ضربه و نفوذ است که با افزایش جرم ضربه‌زننده، میزان نفوذ در هدف افزایش می‌یابد. خاطر نشان می‌شود که در اکثر روابط تجربی که توسط گروه‌ها از جمله کمیته دفاع ملی آمریکا (۱۹۴۳ تا ۱۹۴۵ میلادی) و توسط محققان از جمله فورستال<sup>۱</sup> (۱۹۹۴ میلادی) [۱۳] طی سال‌های بعد از ۱۹۴۰ میلادی استخراج شده است، میزان نفوذ به مؤلفه‌هایی مانند زاویه

<sup>۱</sup> M. J. Forrestal et al.



شکل ۱۲: تأثیر تغییرات قطر پرتابه بر میزان نفوذ

Fig. 12. Effects of variation of projectile diameter on the penetration depth



شکل ۱۳: تأثیر تغییرات قطر پرتابه بر میزان قطر حفره

Fig. 13. Effects of variation of projectile diameter on diameter of hole



همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۱ میلادی، بهترین عملکرد می‌تواند ترکیب الیاف ماکرو و میکرو باشد [۱۴].

از آنجایی که بتن فوق‌توانمند معمولاً شامل درشت‌دانه نمی‌شود، بنابراین ابعاد الیاف اولین تأثیر را در روانی بتن دارد. از این‌رو، تنها الیاف بسیار ویژه‌ای در این بتن کارایی خواهند داشت. با توجه به این‌که این نوع الیاف فولادی تنها در تعداد بسیار معدودی از کشورها تولید می‌شوند، بنابراین وارد کردن آن از خارج از کشور اجتناب‌ناپذیر است.

در تحقیقات مربوط به این مقاله (که در بخش‌های قبل ذکر شده است)، از نوعی میکرو الیاف فولادی استفاده شده که از کشور آلمان و شرکت STRATEC وارد شده است. مشخصات این الیاف در بخش ۲-۱ ذکر شد. این نوع الیاف در ساخت بتن‌های فوق‌توانمند در کشور آلمان کاربرد بسیار فراوانی دارد. در کشور ایران، شرکت صنایع مقتولی زنجان الیاف فولادی با طول ۵۰ میلی‌متر و قطر ۰/۸ میلی‌متر (نوعی ماکرو الیاف یا الیاف مقتولی) تولید می‌کند که مقاومت کششی آن کمتر از ۱۰۰۰ مگاپاسکال است. اطلاعاتی در ارتباط با کاربرد این الیاف در بتن فوق‌توانمند در دسترس نیست.

با توجه به هزینه بالای میکرو الیاف فولادی وارداتی، تأثیر استفاده از دو نوع الیاف مذکور بر مقاومت و شکل‌پذیری بتن فوق‌توانمند به منظور بررسی امکان جایگزینی آن‌ها با ماکرو الیاف تولید داخل مورد مطالعه قرار گرفت. این دو نوع الیاف که در شکل ۱۶ نشان داده شده‌اند، به لحاظ مشخصات شکلی و ابعادی و نیز مقاومتی متفاوت هستند. این مطالعه با ساخت بتن‌های فوق‌توانمند با ۸ نوع طرح اختلاط متشکل از دو نوع الیاف فولادی مذکور، دو مقدار مختلف درصد الیاف (یک و دو درصد حجمی) و دو نوع سنگدانه و با انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی به روش برزیلی، مقاومت برشی، مدول الاستیسیته و منحنی تنش-کرنش فشاری انجام شد.

سنگ‌دانه‌های مورد استفاده شامل سنگ‌دانه سخت بازالتی منطقه دلیجان و نیز سنگ‌دانه بازالتی مهاباد است. آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های بتنی دارای هر یک از دو نوع سنگ‌دانه مذکور انجام شد. با توجه به این‌که روند تغییرات مقاومت فشاری با تغییرات نوع و مقدار الیاف در نمونه‌های حاوی هر یک از دو نوع سنگ‌دانه یکسان بود، سایر آزمایش‌ها فقط بر روی نمونه‌های حاوی سنگ‌دانه بازالتی مهاباد صورت گرفت. در جدول ۶ ارزیابی مکانیکی سنگ‌دانه‌ها خلاصه شده است.

سیمان مورد استفاده از نوع پرتلند معمولی تیپ ۱ است. طرح اختلاط‌های نهایی برای بتن‌های فوق‌توانمند با یک و دو درصد الیاف، مطابق با جدول ۷ است.

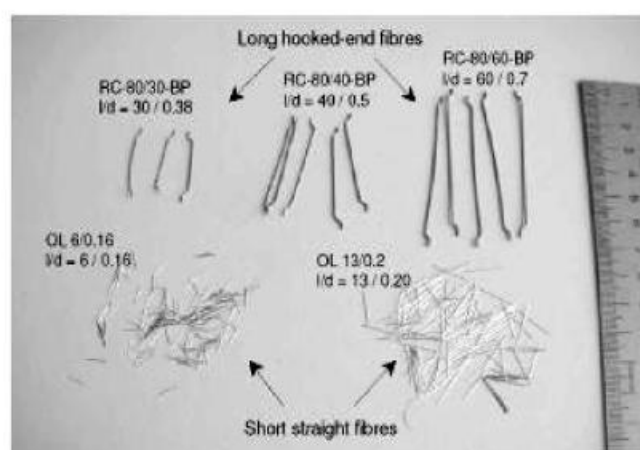
نمونه‌ها پس از باز شدن از قالب، به مدت ۷۲ ساعت داخل حوضچه آب گرم با دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد و پس از این زمان به مدت ۱۲ ساعت در آون با حرارت خشک ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس به مدت ۲۸

برخورد پرتابه، شکل دماغه پرتابه، نسبت طول به قطر پرتابه ( $L/D$ )، سرعت برخورد پرتابه، جرم پرتابه، ضخامت و مقاومت هدف بتنی بستگی دارد که در این میان، نسبت عکس عمق نفوذ با قطر پرتابه (البته به ازای جرم ثابت) مشاهده می‌شود که این مشخصه پرتابه در برخی روابط دارای توانی بزرگتر از یک است. قابل ذکر است که روابط تجربی ارائه شده برای محدوده مشخصی از بتن‌های با مقاومت معمولی و مقاومت بالا استخراج شده‌اند و دربرگیرنده بتن‌های فوق‌توانمند نیستند. همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است، در محدوده قطرهای بررسی شده می‌توان یک رابطه خطی بین افزایش قطر پرتابه و افزایش در عمق نفوذ و قطر حفره را با تقریب خوبی در نظر گرفت.

#### ۴- مطالعه تأثیر مشخصات الیاف فولادی

الیاف مورد استفاده در بتن فوق‌توانمند معمولاً کوتاه، نرم و مستقیم هستند. این در حالی است که الیاف قالب‌دار معمولاً در بتن توانمند و یا معمولی استفاده می‌شوند. نمونه‌هایی از این الیاف در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

برای ساخت بتن فوق‌توانمند، الیاف با قطر ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر و طول ۳ تا ۲۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدول الاستیسیته الیاف فولادی در حدود ۲۰۰ گیگاپاسکال، مقاومت کششی آن‌ها بین ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ مگاپاسکال و تغییر شکل آن‌ها در هنگام گسیختگی ۳ تا ۴ درصد است. مؤلفه‌های مؤثر در عملکرد الیاف شامل مقاومت، سختی، شکل هندسی، نسبت طول به قطر و چسبندگی فیزیکی و شیمیایی بتن و الیاف است. کارهای تحقیقاتی محدودی بر روی تأثیر ماکرو الیاف بر خصوصیات بتن فوق‌توانمند صورت گرفته است. با این حال، به نظر می‌رسد که استفاده از میکرو الیاف در بتن فوق‌توانمند ضروری است. بر اساس گزارش کیم و



شکل ۱۵: مثال‌هایی از انواع الیاف فلزی استفاده شده در بتن‌های الیافی و فوق‌توانمند

Fig. 15. Some types of steel fibers used in fiber reinforced and ultra-high performance concretes

<sup>1</sup> Kim et al.



جدول ۷: طرح اختلاط نهایی بتن فوق توانمند و خصوصیات بتن تازه

Table (7): Final mixing plan of the ultra-high performance concrete and specifications of the fresh concrete

$U_2$	$U_1$	کد نمونه
۱۰۵۰	۱۰۵۰	سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)
۳۵۰	۳۵۰	دوده سیلیس (کیلوگرم بر متر مکعب)
۲۲۴	۲۲۴	آب (کیلوگرم بر متر مکعب)
۴۲	۴۲	فوق روان ساز (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱۵۶	۷۸	الیاف (کیلوگرم بر متر مکعب)
۶۷۸	۶۷۸	سنگدانه (کیلوگرم بر متر مکعب)
۰/۱۶	۰/۱۶	نسبت آب به سیمان
۲۴۲۵	۲۴۲۴	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)

در جدول های ۸ و ۹ خلاصه و مقایسه شده اند.

آزمایش های تعیین مقاومت خمشی بتن مطابق با استاندارد ASTM-C78 بر روی نمونه های منشوری تهیه شده برای آزمون انجام شد و نتایج آن، در جدول ۱۰ خلاصه و مقایسه شده است. شکل ۱۷ شکست نمونه مسلح به ماکرو الیاف فولادی را پس از انجام آزمایش خمشی نشان می دهد.

نتایج آزمایش های تعیین مقاومت کششی به روش برزلی مطابق با استاندارد ASTM-C496 در جدول ۱۱ خلاصه و مقایسه شده اند.

نتایج آزمایش های تعیین مقاومت برشی مستقیم در جدول ۱۲ خلاصه و مقایسه شده اند. شکل ۱۶ نحوه انجام آزمایش برش مستقیم را نشان می دهد. شکل ۱۹ انجام آزمایش تعیین مدول الاستیسیته بتن و منحنی تنش- کرنش را نشان می دهد.

در شکل های ۲۰ و ۲۱ منحنی های تنش-کرنش فشاری برای بتن های حاوی هر دو نوع الیاف به ترتیب به میزان ۱ و ۲ درصد حجمی مقایسه شده اند.

در جدول ۱۳ سطوح زیر نمودارهای تنش-کرنش تا کرنش ۰/۰۲ درصد



شکل ۱۶: ماکرو الیاف تولید شرکت صنایع مفتولی زنجان (بالا) و میکرو الیاف تولید شرکت STRATEC آلمان (پایین)

Fig 16. Macro-fibers produced by ZANJAN wire industries Co. (up) and micro-fibers fibers produced by GERMANY STRATEC Co. (bottom)

روز در دمای معمولی آب ۲۱ درجه سانتی گراد نگهداری شدند؛ به طوری که در این چرخه عمل آوری، فرایند افزایش و کاهش دمای عمل آوری به صورت تدریجی صورت گرفت.

آزمایش های مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM-C39 انجام شد. نتایج آزمایش های مقاومت فشاری بر روی نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتی متری در مدت ۲۸ روز و تحت شرایط عمل آوری (که پیش تر ذکر شد).

جدول ۶: ارزیابی مکانیکی سنگدانه مورد استفاده

Table 6. Mechanical analysis of the used aggregate

نوع سنگدانه	شاخص سختی سنگ با استفاده از مقیاس موس			چگالی و درصد جذب آب			مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)		درصد افت وزنی در برابر سرما و گداز
	سختی	بافت	رنگ	چگالی خشک	چگالی اشباع	درصد جذب آب	خشک	اشباع	
مهلباد رسوبی	۶/۵	ریز بلور	زنگ	۲/۵۵۸	۲/۱	۵/۴	۱۴۳۲	۱۲۲۴	۰/۴
دلیمان رسوبی	۶/۷	ریز بلور	زنگ	۲/۶۶	۲/۰۵	۵/۳۵	۱۴۷۸	۱۲۴۸	۰/۳۵

جدول ۸: تأثیر نوع و مقدار الیاف بر مقاومت فشاری (بتن با سنگدانه دلجان)

Table 8. Effects of type and amount of fibers on compressive strength (the concrete by DELIJAN aggregate)

درصد افزایش مقاومت	میانگین مقاومت فشاری سه نمونه (مگا پاسکال)		نوع الیاف
	با دو درصد الیاف	با یک درصد الیاف	
۸/۷	۱۸۴/۶۰	۱۶۹/۸۰	میکرو الیاف
۷/۸	۱۶۴/۹۰	≈ ۱۵۳	ماکرو الیاف
-	۱۱/۹	۱۱	درصد افزایش مقاومت بتن با میکرو الیاف نسبت به بتن با ماکرو الیاف

جدول ۹: تأثیر نوع و مقدار الیاف بر مقاومت فشاری (بتن با سنگدانه مهاباد)

Table 9. Effects of type and amount of fibers on compressive strength (the concrete by MAHABAD aggregate)

درصد افزایش مقاومت	میانگین مقاومت فشاری سه نمونه (مگا پاسکال)		نوع الیاف
	با دو درصد الیاف	با یک درصد الیاف	
۷/۶	۱۸۳/۶۰	۱۷۰/۷۰	میکرو الیاف
۱۰/۳	۱۶۶/۴۰	۱۵۰/۸۰	ماکرو الیاف
-	۱۰/۳	۱۳/۲	درصد افزایش مقاومت بتن با میکرو الیاف نسبت به بتن با ماکرو الیاف

جدول ۱۰: تأثیر نوع و مقدار الیاف بر مقاومت خمشی (بتن با سنگدانه مهاباد)

Table 10. Effects of type and amount of fibers on bending strength (the concrete by MAHABAD aggregate)

درصد افزایش مقاومت	میانگین مقاومت فشاری سه نمونه (مگا پاسکال)		نوع الیاف
	با دو درصد الیاف	با یک درصد الیاف	
۱۶/۲	۲۰/۸	۱۷/۹	میکرو الیاف
۱۶/۴	۱۸/۵	۱۵/۹	ماکرو الیاف
-	۱۲/۴	۱۲/۶	درصد افزایش مقاومت بتن با میکرو الیاف نسبت به بتن با ماکرو الیاف

جدول ۱۱: تأثیر نوع و مقدار الیاف بر مقاومت کششی برزیلی (بتن با سنگدانه مهاباد)

Table 11. Effects of type and amount of fibers on Brazilian tensile strength (the concrete by MAHABAD aggregate)

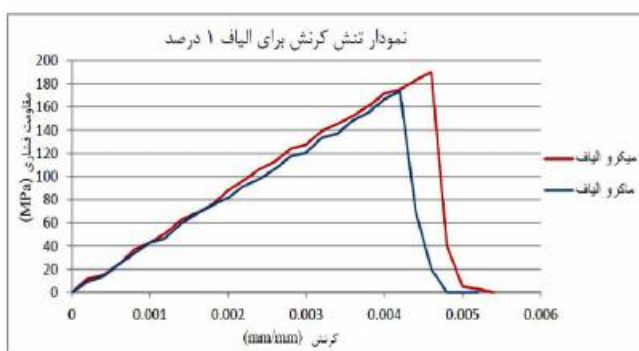
درصد افزایش مقاومت	میانگین مقاومت فشاری سه نمونه (مگا پاسکال)		نوع الیاف
	با دو درصد الیاف	با یک درصد الیاف	
۲۰/۳	۱۵/۴	۱۲/۸	میکرو الیاف
۲۰/۴	۱۳/۶	۱۱/۳	ماکرو الیاف
-	۱۳/۲	۱۳/۳	درصد افزایش مقاومت بتن با میکرو الیاف نسبت به بتن با ماکرو الیاف





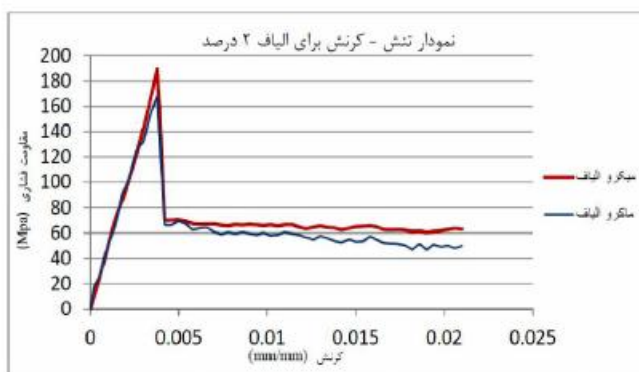
شکل ۱۹: آزمایش تعیین رفتار تنش-کرنش بتن

Fig. 19. The test to determination of stress-strain curve of the concrete



شکل ۲۰: مقایسه منحنی تنش-کرنش فشاری برای بتن‌های حاوی هر دو نوع الیاف به میزان ۱ درصد حجمی

Fig. 20. Comparison of the compressive stress-strain curves for the concretes by 1% Volumetric of the two types of fibers



شکل ۲۱: مقایسه منحنی تنش-کرنش فشاری برای بتن‌های حاوی هر دو نوع الیاف به میزان ۲ درصد حجمی

Fig. 21. Comparison of the compressive stress-strain curves for the concretes by 2% Volumetric of the two types of fibers



شکل ۱۷: حالت شکست خمشی؛ (بالا) نمونه مسلح به ماکرو الیاف فولادی و (پایین) نمونه مسلح به میکرو الیاف فولادی

Fig. 17. Mode of bending failure; (up) The specimen reinforced by steel macro-fibers, (bottom) The specimen reinforced by steel micro-fibers



شکل ۱۸: نحوه انجام آزمایش برش مستقیم

Fig. 18. Method of the direct shear test

جدول ۱۲: تأثیر نوع و مقدار الیاف بر مقاومت برش مستقیم (بتن با سنگدانه مهآباد)

Table 12. Effects of type and amount of fibers on direct shear strength (the concrete by MAHABAD aggregate)

درصد افزایش مقاومت	میانگین مقاومت فشاری سه نمونه (مگا پاسکال)		نوع الیاف
	با دو درصد الیاف	با یک درصد الیاف	
۲/۳	۵۳/۱	۵۱/۹	میکرو الیاف
۳/۹	۴۷/۶	۴۵/۸	ماکرو الیاف
-	۱۱/۶	۱۳/۳	درصد افزایش مقاومت بتن با میکرو الیاف نسبت به بتن با ماکرو الیاف

جدول ۱۳: تأثیر نوع و مقدار الیاف بر میزان جذب انرژی بتن (بتن با سنگدانه مهآباد)

Table 13. Effects of type and amount of fibers on the energy absorption of concrete (the concrete by MAHABAD aggregate)

درصد افزایش مقاومت	میانگین مقاومت فشاری سه نمونه (مگا پاسکال)		نوع الیاف
	با دو درصد الیاف	با یک درصد الیاف	
۱۶۹	۱/۳۰	۰/۴۸۳	میکرو الیاف
۱۹۰	۱/۱۴	۰/۳۹۳	ماکرو الیاف
-	۱۴	۲۳	درصد افزایش مقاومت بتن با میکرو الیاف نسبت به بتن با ماکرو الیاف

ضربه بیشتری را نسبت به نمونه‌های با یک درصد الیاف می‌توانند متحمل شوند. با توجه به مقاومت فشاری تقریباً یکسان دو نمونه، علت تحمل تعداد ضربه بیشتر در هنگام گسیختگی برای نمونه با ۲ درصد الیاف مربوط به جذب انرژی بیشتر و تنش جدایشی بزرگ‌تر در این نوع بتن و آن هم به دلیل داشتن میزان الیاف بیشتر است. همچنین نمونه‌هایی که بر روی تکیه‌گاه ساده قرار می‌گیرند، دارای میزان تحمل تعداد ضربه بیشتری نسبت به نمونه‌های تحت شرایط تکیه‌گاه گیردار هستند. علت این امر، به صلبیت بیشتر تکیه‌گاه گیردار نسبت به تکیه‌گاه ساده برمی‌گردد؛ به نحوی که سبب شده است تا تمامی انرژی وارده از طریق وزنه افتان در تکیه‌گاه گیردار به پانل منتقل شود. اما مقداری از این انرژی در تکیه‌گاه ساده به صورت دوران به دلیل آزاد بودن دوران در لبه‌ها مستهلک شده است. در نتیجه برای گسیختگی کامل، انرژی بیشتری لازم است که این انرژی با تعداد ضربه‌های چکش رابطه مستقیم دارد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که نمونه با ۲ درصد الیاف تحت شرایط تکیه‌گاهی گیردار تعداد ضربه‌های تقریباً مشابهی را در لحظه گسیختگی نهایی نسبت به حالت تکیه‌گاه ساده تحمل کرده است؛ اما آسیب به مراتب کم‌تری را نیز متحمل شده است. علت این امر این است که تکیه‌گاه گیردار برای یک مصالح همگن و با مقاومت فشاری و کششی یکسان و حالت رفتار خمشی موجب توزیع لنگرها و نیروها و دور شدن از تمرکز لنگر در میان دهانه به سمت توزیع لنگر در تکیه‌گاه‌ها می‌شود. افزایش الیاف سبب می‌گردد تا حالت رفتاری عضو از حالت برش پانچ به حالت خمشی تبدیل شود و بنابراین، اثر تکیه‌گاه گیردار

(که معرف میزان جذب انرژی بتن است)، برای بتن‌های با دو نوع و مقادیر ۱ و ۲ درصد حجمی الیاف خلاصه و مقایسه شده‌اند.

##### ۵- بحث

با توجه به گسترش روزافزون کاربرد بتن‌های با مقاومت بالای الیافی، ارزیابی عملکردی این نوع بتن تحت بارگذاری‌های مختلف و بهینه‌سازی برای 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. این پژوهش با رویکرد تأمین ملاحظات پدافند غیرعامل در حوزه تهدیدات ضربه‌ای انجام شده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، هدف از این تحقیق بررسی رفتار ضربه‌ای بتن فوق‌توانمند مسلح‌شده با الیاف فولادی تحت برخورد پرتابه با سرعت پایین و بالا به ترتیب به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی است. اگرچه تحقیقات در دسترس محدودی بر روی عملکرد ضربه‌ای بتن‌های با مقاومت بالای الیافی موجود است، اما نظر به تفاوت اجزای بکار رفته و طرح اختلاط استفاده‌شده برای ساخت بتن‌های مورد نظر و همچنین مشخصات مکانیکی متفاوت، شناسایی رفتار ضربه‌ای بتن‌های فوق‌توانمند ساخته‌شده ضرورت خود را بیشتر نشان می‌دهد.

##### ۵-۱- تحلیل و تفسیر نتایج آزمون سقوط وزنه

همان‌گونه که در شکل‌های ۷ تا ۱۰ مشاهده می‌شود، نمونه‌های بتن فوق‌توانمند با ۲ درصد الیاف (U2) در هر دو حالت شرایط تکیه‌گاهی، تعداد



### ۵-۳- تحلیل و تفسیر نتایج بررسی تأثیر مشخصات لیاف

با بررسی جدول‌های ۸ الی ۱۳ می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

در ارتباط با هر دو نوع لیاف میکرو و ماکرو، افزایش لیاف از ۱ به ۲ درصد حجمی سبب افزایش مقاومت‌های فشاری، خمشی، کششی و برشی به ترتیب در حدود ۸/۵، ۱۶/۳، ۲۰/۳ و ۳ درصد شده است؛ در حالی که ظرفیت جذب انرژی (سطح زیر منحنی تنش-کرنش) بتن حاوی این دو نوع لیاف را در حدود ۱۸۰ درصد افزایش داده است. بنابراین، تأثیر افزایش لیاف بر ظرفیت جذب انرژی و شکل‌پذیری بتن بسیار با اهمیت‌تر از تأثیر این افزایش بر مقاومت بتن است.

استفاده از میکرو لیاف به جای ماکرو لیاف سبب افزایش مقاومت‌های فشاری، خمشی، کششی و برشی به ترتیب در حدود ۱۱/۶، ۱۲/۵، ۱۳/۳ و ۱۲/۵ درصد شده است و ظرفیت جذب انرژی (سطح زیر منحنی تنش-کرنش) را نیز برای بتن با ۱ درصد لیاف به میزان ۲۳ درصد و برای بتن با ۲ درصد لیاف به میزان ۱۴ درصد افزایش داده است. بنابراین، تأثیر جایگزینی نوع لیاف بر ظرفیت جذب انرژی و شکل‌پذیری بتن برابر با اهمیت تأثیر این جایگزینی بر مقاومت بتن است.

بتن فوق‌توانمند حاوی درصد کمتر لیاف تا حدی ترد است؛ به طوری که نمونه‌های این نوع بتن بلافاصله پس از رسیدن به بیشینه تنش، به سرعت با کرنش کمتری دچار گسیختگی نسبتاً ترد می‌شوند. اما در نمونه‌های با ۲ درصد لیاف، منحنی پس از رسیدن به بیشینه تنش در حدود دو سوم تنش بیشینه افت می‌کند و سپس با تحمل کرنش بسیار، با شیب ملایم و با حالت شکل‌پذیرتر به گسیختگی می‌رسد. بیشینه کرنش قابل تحمل در نمونه‌های با ۲ درصد لیاف، در حدود ۴ برابر نمونه‌های با ۱ درصد لیاف است.

نمونه‌های حاوی میکرو لیاف پس از رسیدن به بیشینه مقاومت خود و ایجاد گسیختگی، انسجام و شکل ظاهری خود را حفظ می‌کنند. در این صورت، بتن از هم نمی‌پاشد و لیاف از بتن جدا نمی‌شوند. در حالی که با وجود آن‌که گسیختگی نمونه‌های حاوی ماکرو لیاف شکل‌پذیر است و نمونه تکه‌تکه نمی‌شود و از هم نمی‌پاشد، اما همراه با خرد شدن نسبی نمونه و جدا شدن و بیرون زدن لیاف از بتن است. به عبارت دیگر، چسبندگی لیاف با بتن مناسب نیست. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از میکرو لیاف، ایمنی بسیار بیشتری را پس از خرابی سازه (در اثر اعمال بار شدیدتر از بار طراحی بر سازه) فراهم می‌نماید و برای سازه‌هایی که در معرض خطرهای بارهای احتمالی بزرگ‌تر از بار طراحی قرار دارند، استفاده از میکرو لیاف توجیه بالایی دارد.

خرد شدن بتن حاوی ماکرو لیاف و جدا شدن لیاف از بتن در هنگام گسیختگی نشان می‌دهد که این نوع بتن نسبت به بتن حاوی میکرو لیاف در برابر بارهای ضربه‌ای، رفتار مناسب و ایمنی را از خود نشان نمی‌دهد.

### ۶- نتیجه‌گیری

نمونه‌های بتن فوق‌توانمند با ۲ درصد لیاف در هر شرایط تکیه‌گاهی،

در توزیع لنگرها و نیروها بیشتر نمایان شده و میزان خرابی و بازشدگی عضو در لحظه گسیختگی نهایی در حالت تکیه‌گاه گیردار کمتر از حالت تکیه‌گاه ساده می‌شود. از این‌رو، این‌طور پیش‌بینی می‌شود که ممکن است در درصدهای بالاتر میزان لیاف علاوه‌بر تشکیل شکل گسیختگی مطلوب‌تر برای پانل‌های تحت شرایط تکیه‌گاهی گیردار، نزدیک شدن تعداد ضربه‌های قابل تحمل برای هر دو شرایط تکیه‌گاهی نیز مشاهده شود.

### ۵-۲- تحلیل و تفسیر نتایج شبیه‌سازی عددی

اکثر محققان (مانند ونگ‌شاشا<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۱ میلادی [۱۵])، لی‌سیوچین<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۶ میلادی [۱۶] و غیره) بیان داشته‌اند که مقاومت فشاری عامل اصلی تأثیرگذار بر عمق نفوذ است. از این‌رو، در این سری از شبیه‌سازی‌ها (که مقاومت فشاری نهایی هر دو نوع بتن تقریباً یکسان است)، نتیجه می‌شود که در مدل ارتجاعی-خمیری علاوه‌بر نقطه بیشینه تنش، مقادیر تنش پسماند و طاقت نمونه بتنی نیز نقش حائز اهمیت را بر میزان عمق نفوذ ایفا می‌کنند؛ به طوری که بتن‌های فوق‌توانمند مورد بحث با داشتن اختلاف بیش از ۴۵ مگاپاسکال در مقاومت پسماند و اختلاف حدود دو برابری در سطح زیر منحنی، تفاوت ۶۳ درصدی را در عمق نفوذ نشان می‌دهند.

نتایج شبیه‌سازی عددی مطابق با جدول ۴ نشان می‌دهد که قطر حفره در نمونه با ۲ درصد لیاف فولادی، ۷۲ درصد کوچک‌تر از نمونه با ۱ درصد لیاف است. به نظر می‌رسد که قطر حفره از مقاومت کششی و میزان جذب انرژی نمونه‌ها تأثیر می‌پذیرد. نتایج آزمایشگاهی مطابق با جدول ۱، تنها اختلافی در حدود ۲/۲ مگاپاسکال (معادل با ۲۰ درصد) را بین مقاومت کششی نمونه‌ها نشان می‌دهد. اما از نمودارهای تنش-کرنش در شکل ۲ استنباط می‌شود که جذب انرژی نمونه با دو درصد، بسیار بیشتر از نمونه با یک درصد لیاف است. بنابراین، علت اصلی تفاوت در قطر حفره بدست‌آمده را می‌توان ناشی از تفاوت بارز دو هدف بتنی در میزان جذب انرژی دانست که در تطابق با نتایج آزمایشگاهی ونگ‌شاشا در سال ۲۰۱۱ میلادی است [۱۵].

بررسی عددی تغییرات قطر پرتابه در مقابل میزان نفوذ و قطر ورودی حفره بیش از آن‌که تأثیر افزایش جرم بر میزان نفوذ را نشان دهد، بیانگر اثرپذیری قابل توجه قطر حفره از قطر پرتابه است. به عنوان نمونه، برای نمونه U2 با افزایش ۱/۴۶، ۲/۴۸ و ۵ برابری جرم پرتابه تنها افزایش به ترتیب ۱۲، ۲۰ و ۲۷ درصدی عمق نفوذ را می‌توان مشاهده نمود. در مقابل، با رشد ۱/۲۷، ۱/۶۲ و ۲/۲۴ برابری قطر پرتابه به ترتیب افزایش ۴۵، ۹۷ و بیش از ۲۸۰ درصدی قطر حفره به وجود آمده در وجه رویی نمونه قابل مشاهده است. این نتیجه، مؤید روابط تجربی ارائه‌شده توسط محققان مبنی بر تأثیر نسبتی از جرم به قطر پرتابه بر مؤلفه‌های نفوذ است.

<sup>1</sup> W. Shasha

<sup>2</sup> L. S. Chin

کانتورهای کرنش حاصل از شبیه‌سازی عددی تحت بارگذاری یکسانی که در این تحقیق بر روی دو نوع بتن فوق‌توانمند اعمال شد، نشان داد که ناحیه تحت تأثیر ضربه برای نمونه با ۲ درصد الیاف نسبت به نمونه با ۱ درصد الیاف کوچک‌تر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در صورت استفاده از بتن فوق‌توانمند با درصد الیاف بیشتر در عمل نیز می‌توان شاهد ناحیه آسیب‌دیده کوچک‌تر و خفیف‌تری بود. از این‌رو، بر اساس این قاعده کلی که ساخت مطلوب‌تر هزینه‌های جانبی کم‌تری را به دنبال خواهد داشت، ممکن است بتن فوق‌توانمند مسلح شده با ۲ درصد الیاف نسبت به نوع با یک درصد الیاف تحت بارگذاری صورت گرفته مقرون به صرفه‌تر باشد.

- یکی از اهداف این تحقیق، تعیین عمق نفوذ در اهداف بتنی فوق‌توانمند مسلح شده با الیاف فولادی است. مطابق با نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی‌های عددی می‌توان انتظار آن را داشت که با فرض استفاده از پرتابه در محدوده مشخصات مذکور در این پژوهش، می‌توان شاهد نفوذ و متوقف شدن (عدم نفوذ کامل) پرتابه در بلوک‌های به ضخامت کمینه ۱۵ سانتی‌متر از هر دو نوع بتن فوق‌توانمند بود.

- اگرچه استفاده از ماکرو الیاف به جای میکرو الیاف مقادیر مقاومت و ظرفیت جذب انرژی بتن را تا حد نسبتاً کمی (در حدود ۱۲ تا ۲۰ درصد) کاهش می‌دهد و قیمت را بسیار کاهش می‌دهد، اما به لحاظ فنی و اقتصادی برای مسلح نمودن بتن در مقابل بارهای ضربه‌ای به دلیل خرد شدن بتن حاوی ماکرو الیاف و جدا شدن الیاف از بتن در هنگام گسیختگی توجیه ندارد. - با ثابت بودن سرعت برخورد، افزایش قطر پرتابه (که منجر به افزایش جرم آن می‌شود) سبب افزایش نیروی ضربه و در نتیجه افزایش عمق نفوذ و قطر حفره در بتن‌های فوق‌توانمند با هر دو مقدار درصد الیاف می‌شود. اما میزان این افزایش در بتن با یک درصد الیاف به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از بتن با ۲ درصد الیاف است.

### مراجع

- [1] M., Nili; V., Afrough-Sabet, An Experimental and Numerical Study on How Steel and Polypropylene Fibers Affect the Impact Resistance in Fiber-reinforced Concrete, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 46, pp. 62-73, 2009.
- [2] M., Trub; Numerical Modeling of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, *Institute of Structural Engineering Swiss Federal Institute of Technology*, 2011.
- [3] ACI Committee 544, State-of-the-Art Report on Fiber-reinforced Concrete, ACI Committee 544 Report 544.1R-96., *Detroit: American Concrete Institute*, 1996.
- [4] M. C., Nataraja; T. S., Nagaraj; S. B., Basavaraja; Reproportioning of Steel Fibre Reinforced Concrete Mixes and their Impact Resistance, *Cement Concrete Res.*, Vol. 35, No. 12, pp. 2350-2359, 2005.

بیش‌ترین مقاومت ضربه‌ای را از خود نشان می‌دهند. همچنین در حالت تکیه‌گاه ساده برای هر دو نوع نمونه با یک و ۲ درصد الیاف، ضربه‌های بیشتری تحمل می‌شود.

- صرف‌نظر از شرایط تکیه‌گاهی، تعداد ضربات لازم برای گسیختگی نهایی نیز با افزایش میزان الیاف افزایش می‌یابد. این موضوع بیانگر اهمیت الیاف در رفتار بتن‌های فوق‌توانمند است. الیاف‌ها می‌توانند انتشار ترک را به وسیله عمل پل‌زدن محدود کنند. از این‌رو، ترک‌ها در نمونه‌های با میزان الیاف بیشتر، باریک و متعدد هستند و پانل‌ها با حفظ انسجام کلی با تعداد ضربات بیشتری گسیخته می‌شوند.

- ترک‌های اولیه در نمونه‌ها در اکثر موارد به صورت ترک‌های خمشی است. اما الگوی گسیختگی نهایی پانل به صورت ترکیبی از گسیختگی خمشی و برش سوراخ‌کننده است که بیشترین تغییر شکل را در نقطه برخورد وزنه ایجاد می‌نماید.

- به طور کلی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها تصدیق‌کننده مطالب فنی موجود یعنی وابستگی عمق نفوذ به مقاومت نهایی و وابستگی قطر حفره به مقاومت کششی و چقرمگی (طاقت) هدف بتنی است.

- چقرمگی بتن در مدل مصالح الاستیک-پلاستیک هیدرودینامیک، نقش قابل ملاحظه‌ای را در تعیین مؤلفه‌های مقاومت ضربه‌ای دارد.

- با توجه به اینکه مدل مصالح ارتجاعی-خمیری هیدرودینامیک معیار فرسایش را در نظر می‌گیرد، بنابراین عملکرد خوبی را در تعیین قطر حفره نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که بر اساس تجربه بدست‌آمده باید گفت که این مدل مصالح به لحاظ عمق نفوذ رفتار بتن را ضعیف‌تر از رفتار واقعی مدل می‌کند. یکی از دلایل این ضعف ممکن است مربوط به نادیده گرفته شدن اثر نرخ کرنش در رفتار فشاری مصالح در مدلسازی با این مدل مصالح باشد.

- نظر به این که هر دو نوع بتن فوق‌توانمند بررسی شده در این مطالعه دارای طرح اختلاط مشابهی هستند و تنها در میزان الیاف اختلاف دارند و همچنین مقاومت فشاری تقریباً یکسانی را نیز نشان می‌دهند، بنابراین می‌توان گفت که وجود یا میزان الیاف تأثیر ناچیزی را بر مقاومت فشاری نهایی دارد. اما بر مقاومت کششی و مهم‌تر از آن مقاومت فشاری پسماند و کرنش‌پذیری بتن اثر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد که نتیجه آن، به صورت طاقت و جذب انرژی بیشتر بروز می‌یابد. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی صورت‌گرفته و مطالب فنی موجود، تأثیر طاقت هدف بر کاهش قطر حفره حاصل از برخورد و نفوذ پرتابه به مراتب (و بلکه به صورت کلی) دارای اهمیت بیشتری نسبت به مقاومت کششی هدف است.

- از آنجایی که بتن‌های فوق‌توانمند شبیه‌سازی شده مقاومت فشاری تقریباً یکسانی دارند، بنابراین هرگونه تفاوت رفتار ناشی از اختلاف میزان الیاف در آن‌ها است. همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، افزایش الیاف سبب افزایش قابل ملاحظه‌ای در طاقت نمونه به شکل افزایش کرنش‌پذیری و مقاومت پسماند در منحنی‌های تنش-کرنش کششی و فشاری می‌شود و در عمل نیز سطح تحمل آسیب را قبل از گسیختگی افزایش می‌دهد. از این‌رو،



- Plastic-Hydrodynamic Analysis of Crater Blasting in Steel Fiber Reinforced Concrete, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 52, No. 2, pp. 111-116, 2009.
- [12] Z. L., Wang; Y. C., Li; R. F., Shen; J. G., Wang; Numerical Study on Craters and Penetration of Concrete Slab by Ogive-nose Steel Projectile, *Comput. Geotech*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-9, 2007.
- [13] M. J., Forrestal; B. S., Altman et al.; Empirical Equation for Penetration Depth of Ogive-nose Projectiles into Concrete Targets, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 395-405, 1994.
- [14] D. J., Kim; S. H., Park; G. S., Ryu; K. T., Koh; Comparative Flexural Behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with Different Macro Fibers, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 4144-4155, 2011.
- [15] W. Shasha; Experimental and Numerical Studies on Behavior of Plain and Fiber-Reinforced High Strength Concrete Subjected to High Strain Rate Loadings, Ph.D. Thesis, *National University of Singapore*, 2011.
- [16] L. S., Chin; Finite Element Modeling of Hybrid-Fiber ECC Targets Subjected to Impact and Blast, *National University of Singapore*, 2006.
- [5] Farnam Y. "Experimental and numerical study of impact behavior of composite panels based on fiber reinforced high performance cementitious materials", Thesis of Master of Science in Civil Engineering, Tehran University, Iran, 2007.
- [6] T. L., Teng; Y. A., Chub; F. A., Chang, B. C., Shen, D. S., Cheng, Development and Validation of Numerical Model of Steel Fiber Reinforced Concrete for High-velocity Impact, *Computational Materials Science*, Vol. 42, pp. 90-99, 2008.
- [7] S., Abrate; Impact on Composite Materials and Structures, *Cambridge University Press*, 1998.
- [8] Leppänen, Concrete Structures Subject to Fragment Impacts, Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, *Chalmers University of Technology*, Goteborg, Sweden, 2004.
- [9] Z. L., Wang; J., Wu; J. G., Wang; Experimental and Numerical Analysis on Effect of Fibre Aspect Ratio on Mechanical Properties of SRFC, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 4, pp. 559-565, 2010.
- [10] J. O., Hallquist; LS-DYNA Theoretical Manual, *Livermore Software Technology Corporation*, CA, 2003.
- [11] Z. L., Wang; H., Konietzky; R. Y., Huang; Elastic-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

G., Dehghani Ashkezari, "Study of the Effects of Type and Amount of Steel Fibers and Diameter of Projectile on Behavior of UHPSFRC". *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(1) (2017) 101-117.

DOI: 10.22060/ceej.2016.865

