Quarterly Journal of Defense Technology Engineering Imam Ali University

Spring 2025, Vol. 41

Original Research

Ultra High-Performance Concrete Under Impact & Explosion Conditions: A Comprehensive Review

Amir Hosein Hadjian Shahri [1] , Amir Mahdi Heidari Tafreshi [2 *]

1 PhD Candidate of School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2 Assistant Professor of Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Imam Ali University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Received: 2025.04.06

Accepted: 2025.05.10

Published: 2025.06.04

Keyword:

Ultra High-Performance Concrete
Impact Resistance
Ballistic Performance
Protective Structures

***Corresponding Author:**

Amir Mahdi Heidari Tafreshi

Email:
heidari.amirmahdi@gmail.com

ABSTRACT

Ultra High-Performance Concrete has emerged as a revolutionary construction material with exceptional mechanical properties and durability characteristics, making it particularly suitable for structures subjected to dynamic loading conditions such as impact and blast events. This comprehensive review synthesizes current research on the behavior of UHPC under impact conditions, examining material composition, fiber reinforcement, aggregate characteristics, projectile interactions, and composite structural performance. The analysis reveals that UHPC's superior impact resistance stems from its dense microstructure, optimized particle packing, and effective fiber reinforcement system. Key factors influencing ballistic performance include fiber type and content, aggregate hardness, and the use of hybrid fiber combinations. On this subject, volume percentage of 2% with short and long steel fibers which bridges micro and macro cracks with basalt and corrugated aggregates showed adequate performance. Practical applications in protective structures and defense engineering are discussed, along with emerging research directions for improving cost-effectiveness and sustainability while maintaining exceptional impact resistance.

فصل نامه مهندسی فناوری‌های دفاعی دانشگاه افسری امام علی (ع)

بهار 1404 ، دوره 41

مقاله پژوهشی

بررسی جامع رفتاری بتن‌های با عملکرد فوق‌العاده بالا در برابر شرایط ضربه و انفجار

امیر حسین حاجیان شهری[1]، امیر مهدی حیدری تفرشی[2]*

[1] دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده‌ی مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[2] استادیار دانشکده مهندسی و پرواز، گروه مهندسی عمران، دانشگاه امام علی علیه السلام، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: 1404/01/16

پذیرش مقاله: 1404/02/20

انتشار مقاله: 1404/03/14

کلید واژگان:

بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا

مقاومت ضربه‌ای

عملکرد در برابر پرتابه

سازه‌های محافظتی

***نویسنده مسئول**

امیرمهدی حیدری تفرشی

پست الکترونیکی:

heidari.amirmahdi@gmail.com

چکیده

بتن با عملکرد فوق العاده بالا به عنوان یک ماده ساختمانی نو ظهور است که دارای خواص مکانیکی و ویژگی‌های دوام استثنایی می‌باشد و آن را به ویژه برای سازه‌هایی که تحت شرایط بارگذاری دینامیکی مانند ضربه و انفجار قرار می‌گیرند، مناسب می‌سازد. در این مقاله‌ی مروری، تحقیقات فعلی در مورد رفتار UHPC تحت شرایط ضربه مطالعه شده و ترکیب مواد ماتریس بتنی، الیاف تقویت‌کننده، ویژگی‌های سنگدانه، اندرکنش با پرتابه‌ها و عملکرد سازه‌ای مرکب مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مقاومت فوق‌العاده UHPC در برابر ضربه، ناشی از ریزساختار متراکم، چیدمان بهینه ذرات و سیستم مؤثر باربری به کمک الیاف تقویت‌کننده‌ی آن است. عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد پرتابه‌ها شامل نوع و درصد الیاف، سختی سنگدانه‌ها و استفاده از ترکیبات هیبریدی الیاف می‌باشد. در این رابطه استفاده از الیاف فولادی کوتاه و بلند به میزان 2% حجمی که اتصال ترک‌های ریز و درشت را برقرار می‌سازد در کنار سنگدانه‌های بازالتی و زبر عملکرد مناسبی نشان داده است. همچنین، در بخش پایانی کاربردهای عملی در سازه‌های محافظتی و مهندسی دفاعی در کنار مزایا و چالش‌های استفاده از این مصالح همراه با نیازهای تحقیقاتی نوظهور و شرایط عملیاتی برای بهبود مقرون‌به‌صرفه بودن و پایداری، در شرایطی که مقاومت استثنایی در برابر ضربه داشته باشند، ارائه شده است.

1 ـ مقدمه

بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا (UHPC) گامی مهم در پیشرفت فناوری مصالح سیمانی محسوب می‌شود که با دارا بودن خواص مکانیکی استثنایی، به ویژه برای سازه‌های نیازمند مقاومت بسیار بالا در برابر ضربه مناسب است. تهدیدات فزاینده تروریسم، درگیری‌های مسلحانه و انفجارهای غیرمترقبه، تقاضا برای مصالح ساختمانی با قابلیت تحمل بارهای ضربه‌ای با انرژی بالا را افزایش داده است که این امر موجب گسترش تحقیقات در زمینه‌ی عملکرد UHPC تحت شرایط بارگذاری دینامیکی شده است.

بتن‌های UHPC، از طریق چندین ویژگی کلیدی شامل مقاومت فشاری فوق‌العاده بالا (معمولاً بیش از 150 مگاپاسکال)، مقاومت کششی بهبودیافته (7 تا 25 مگاپاسکال)، دوام قابل توجه و ظرفیت جذب انرژی بالاتر عملکرد خود در برابر بارهای ضربه‌ای را از بتن معمولی متمایز می‌سازند. همچنین، مقاومت در برابر ضربه‌ی این مصالح ناشی از ریزساختار مهندسی‌شده دقیقی است که از طریق بهینه‌سازی ریزساختار متراکم ذرات و سنگدانه‌ها، نسبت آب به سیمان بسیار پایین (0.16 تا 0.25)، استفاده از پودرهای واکنش‌پذیر ریز مانند فوم سیلیس و افزودن الیاف برای افزایش شکل‌پذیری حاصل می‌شود (Fehling et al., 2004).

مقاومت در برابر ضربه‌ی UHPC به دلیل کاربردهای بالقوه آن در سازه‌های نظامی، موانع محافظتی، زیرساخت‌های حیاتی و سیستم‌های حمل‌ونقل آسیب‌پذیر در برابر بارهای دینامیکی، به موضوعی حائز اهمیت در تحقیقات تبدیل شده است. در مقایسه با بتن سنتی، UHPC عملکرد به مراتب بهتری در مقابله با نفوذ پرتابه‌ها و انفجار نشان می‌دهد که شامل ایجاد حفره‌های سطحی کوچک‌تر و کاهش عمق نفوذ در هنگام برخوردهای با سرعت بالا می‌شود. این بهبود عملکرد، ناشی از توانایی UHPC در توزیع انرژی ضربه از طریق مکانیزم‌های چندگانه‌ی ترک‌خوردگی ریز و مقاومت در برابر بیرون کشیده شدن الیاف به جای الگوی شکست ترد در بتن‌های با مقاومت معمولی است (Das & Nanthagopalan, 2024).

این مقاله‌ی مروری به طور نظام‌مند دانش فعلی درباره‌ی UHPC تحت شرایط ضربه را بررسی می‌کند و مباحث را در چند حوزه‌ی کلیدی سازماندهی می‌نماید: ترکیب مواد و تأثیر آن بر مقاومت ضربه‌ای، مکانیزم‌های باربری الیاف تقویتی، اندرکنش پرتابه‌ها، رفتار سازه‌ای مرکب، روش‌های مدلسازی پیش‌بینی‌کننده و کاربردهای عملی. این تحلیل، یافته‌های حاصل از مطالعات آزمایشگاهی، شبیه‌سازی‌های عددی و مدل‌های نظری را ترکیب می‌کند تا درک جامعی از عملکرد UHPC تحت بارگذاری‌های دینامیکی و ضربه‌ای ارائه نماید.

پیشرفت‌های اخیر در فناوری UHPC امکان توسعه طرح اختلاط‌های سفارشی برای سناریوهای خاص ضربه‌ای را فراهم کرده است. محققان پارامترهای مختلفی از جمله نوع و هندسه‌ی الیاف، ویژگی‌های سنگدانه، روش‌های عمل‌آوری و پیکربندی‌های کامپوزیتی با مواد دیگر مانند لایه‌های گرانیتی یا سرامیکی را مورد بررسی قرار داده‌اند. مطالعات مذکور نشان می‌دهند که مقاومت ضربه‌ای این مصالح را می‌توان از طریق بهینه‌سازی مواد به‌صورت قابل‌توجهی بهبود بخشید، به‌گونه‌ای که به سطوح عملکردی معادل یا حتی فراتر از مصالح سنگی طبیعی نظیر گرانیت با افزودن ویژگی‌های مثبت دیگری مانند کارایی بالا و شکل‌پذیری مناسب دست یافت.

علیرغم این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی در زمینه‌ی پذیرش گسترده‌ی UHPC برای کاربردهای مقاوم در برابر ضربه باقی مانده است. این چالش‌ها شامل هزینه‌ی نسبتاً بالای مواد، محدودیت در آیین‌نامه‌ها و استانداردهای

طراحی، و نیاز به مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر برای رفتار UHPC تحت سناریوهای مختلف ضربه می‌باشد. این مقاله‌ی مروری با هدف تلفیق دانش موجود، شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی و پیشنهاد جهت‌گیری‌های پژوهشی آینده برای مواجهه با این چالش‌ها نگاشته شده است. بخش‌های بعدی به بررسی عمیق‌تر جنبه‌های مواد UHPC مرتبط با عملکرد ضربه‌ای خواهد پرداخت، که با مطالعه‌ی روابط بین ترکیب و خواص حاکم بر رفتار دینامیکی آن آغاز می‌شود.

2 ـ طرح اختلاط مصالح و اثرات آن در مقاومت ضربه‌ای

مقاومت استثنایی UHPC در برابر ضربه، ناشی از ترکیب مهندسی‌شده‌ی آن است که به طور بنیادی با مخلوط‌های بتن معمولی متفاوت می‌باشد. این بخش به بررسی اجزای کلیدی UHPC و نقش ویژه هر یک در عملکرد ماده تحت شرایط بارگذاری دینامیکی می‌پردازد.

2 ـ 1 ـ ماده‌ی چسباننده و تراکم ذرات

سیستم چسباننده‌ی UHPC عموماً از سیمان پرتلند نوع چهار و یا پوزولانی در ترکیب با مقادیر قابل توجهی مواد مکمل سیمانی، به ویژه فوم سیلیسی تشکیل شده است. علت انتخاب این نوع سیمان ایجاد حرارت کمتر در حین فرآیند گیرش و ایجاد آسیب کمتر حین فرآیند گیرش اولیه‌ی سیمان است (Maten, 2011). محتوای سیمان در مخلوط‌های UHPC در محدوده 700 تا 1200 کیلوگرم بر مترمکعب قرار دارد که به میزان قابل توجهی بیشتر از بتن معمولی است، در حالی که افزودن فوم سیلیسی معمولاً 20 تا 30 درصد از وزن کل چسباننده را تشکیل می‌دهد (Aldred et al., 2006). برای انتخاب و سنجش مشخصات فوم سیلیسی مورد استفاده در بتن نیز استانداردهای آمریکایی (C1240-20, 2020) و آلمانی (DIN13263-1:2009, 2009) در این زمینه منتشر شده و در دسترس قرار گرفته است.

این سیستم چسباننده‌ی غنی، در ترکیب با نسبت آب به سیمان بسیار پایین (0.16 تا 0.25)، یک ریزساختار فوق العاده متراکم با تخلخل حداقلی ایجاد می‌نماید. چگالی تراکم ذرات در UHPC از طریق افزودن مواد ریز با دانه‌بندی مشخص و سلسله مراتبی بهینه می‌شود. پودر کوارتز یا سنگدانه‌ی مشابه با اندازه ذرات 1 تا 100 میکرومتر، فضای بین دانه‌های سیمان را پر می‌کند، در حالی که ذرات ریزتر فوم سیلیسی (0.1 تا 1 میکرومتر) فضاهای باقیمانده را با تبدیل به ترکیب مستحکم کلسیم ـ سیلیکات ـ هیدرات اشغال می‌نمایند. این آرایش سلسله‌مراتبی ذرات، ماده‌ای با نفوذپذیری فوق‌العاده کم و همگنی بسیار بالا ایجاد می‌کند که هر دو از عوامل حیاتی برای مقاومت در برابر ضربه و دوام بسیار بالای مصالح محسوب می‌شوند، چرا که از ایجاد مناطق ضعیف موضعی که ممکن است منجر به آغاز ترک‌خوردگی شود، جلوگیری می‌کنند. برای انتخاب دانه‌بندی ذرات روش‌های متنوعی وجود دارد که روش موسوم به پونتکه یکی از روش‌های متداول در این زمینه است (Pathania & Shukla, 2017).

تحقیقات اخیر، پارامتر «سطح کل ذرات سنگدانه» را به عنوان معیاری کلیدی برای پیش‌بینی عملکرد مکانیکی UHPC معرفی کرده‌اند. مطالعات نشان می‌دهند افزایش این پارامتر از 0 به 12380 مترمربع منجر به افزایش استحکام پیوستگی الیاف با مصالح به میزان 38%، افزایش مقاومت کششی محوری به میزان 75% و انرژی شکست کلی به میزان 63% می‌شود (Matiushin et al., 2024). این بهبودها مستقیماً با تقویت فصل

مشترک ماده‌ی زمینه ـ الیاف[1] و افزایش ظرفیت جذب انرژی، به ارتقای مقاومت ضربه‌ای کمک می‌کنند.

2 ـ 2 ـ ویژگی‌های سنگدانه‌ها

برخلاف بتن معمولی، در UHPC عموماً سنگدانه‌های درشت را حذف می‌کنند تا از ایجاد مناطق انتقال تنش ضعیف در فصل مشترک بین ماده‌ی چسباننده و سنگدانه‌ها جلوگیری و انتقال تنش بین ذرات به شکل یکواخت‌تری انجام پذیرد. برای رسیدن به این هدف از ماسه‌ی کوارتزی ریز با حداکثر اندازه‌ی ذرات بین 0/1 تا 2/5 میلی‌متر استفاده می‌شود (Shi et al., 2024). سختی و اندازه‌ی این سنگدانه‌های ریز تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت UHPC در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی دارد.

تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از سنگدانه‌های سخت‌تر مانند بازالت با دانه‌بندی 5 الی 10 میلیمتر می‌تواند عمق نفوذ در UHPC را تحت برخورد پرتابه‌های کوچک (گلوله) به میزان تقریبی 77% کاهش دهد (Peng et al., 2016). وو و همکاران نشان دادند که UHPC مبتنی بر سنگدانه‌های کوراندوم[2] مقاومت ضربه‌ای بهبودیافته‌ای دارد، که در آن سختی بافت کریستالی سنگدانه بر سایش جرمی پرتابه تأثیر می‌گذارد (Wu, Fang, Gong, et al., 2015). همچنین، رابطه‌ی مهمی بین اندازه‌ی سنگدانه و قطر پرتابه وجود دارد. آسیب به پرتابه‌ها زمانی رخ می‌دهد که اندازه سنگدانه حداقل 1.5 برابر قطر پرتابه باشد. برای پرتابه‌های نفوذکننده به زره با قطر 12 میلی‌متر، در یکی از تحقیقات حداکثر اندازه سنگدانه حدود 18 میلی‌متر به کار گرفته شده تا میزان نفوذ به حداقل مقدار ممکن برسد. بر اساس نتایج این تحقیق مشخص است که با برخورد پرتابه به سنگدانه کورندوم آسیب‌های شدیدی به پرتابه وارد شده که قادر به ادامه‌ی نفوذ در هدف بتنی نبوده است (Wu, Fang, Gong, et al., 2015).

میزان حجمی سنگدانه نیز نقش حیاتی در عملکرد ضربه‌ای UHPC ایفا می‌کند. افزایش میزان حجمی سنگدانه از 0 به 0/4 مترمکعب موجب افزایش مدول الاستیسیته به میزان تقریبی 40% و کاهش تقریباً 50 درصدی کرنش نهایی جمع‌شدگی می‌شود. این تغییرات به بهبود سختی و جلوگیری از ایجاد ترک‌های ناشی از انقباض اولیه و ثانویه و در نهایت مقاومت ضربه‌ای مصالح کمک می‌کنند (Matiushin et al., 2024).

2 ـ 3 ـ الیاف تقویتی

الیاف فولادی شاید مهم‌ترین جزء برای ارتقای مقاومت ضربه‌ای UHPC محسوب شوند. این الیاف عملکردهای چندگانه‌ای به صورت اتصال ترک‌های ریز و درشت، بهبود قابلیت انتقال تنش، و افزایش ظرفیت جذب انرژی از طریق مکانیزم‌های بیرون‌کشیدگی الیاف دارند (Li et al., 2023).

پرکاربردترین الیاف برای UHPC مقاوم در برابر ضربه، الیاف فولادی مستقیم با طول 13 تا 15 میلی‌متر و قطر 0/16 تا 0/20 میلی‌متر هستند که معمولاً با درصد حجمی بهینه‌ی 2% استفاده می‌شوند. ترکیبات متفاوت الیاف نتایج امیدبخشی نشان داده‌اند، به‌طوری که مخلوط‌های حاوی هر دو نوع الیاف کوتاه (6 میلی‌متر) و بلند (13 میلی‌متر) در مقاومت در برابر ضربه اثراتی هم‌افزا از خود نشان می‌دهند. مخلوط S1L1.5 (6 میلی‌متر- 1% و 13 میلی‌متر- 1.5%) در مقایسه با مخلوط‌های حاوی تنها الیاف بلند (L2.5) یا تنها الیاف کوتاه (S2.5) به

---

[1] Matrix – Fiber Interface
[2] Corundum Aggregates

ترتیب 20.1% و 65.2% انرژی شکست بالاتری نشان داده است (Das & Nanthagopalan, 2024).

هندسه‌ی الیاف نیز بر عملکرد ضربه‌ای تأثیرگذار است. الیاف فولادی موجدار با طول 22 میلی‌متر و قطر 0/3 میلی‌متر، ویژگی‌های پیوند عالی با ماتریس UHPC نشان داده‌اند. موج‌دار بودن، لنگرگیری مکانیکی را افزایش می‌دهد و نیاز به انرژی بیشتری برای بیرون‌کشیدن الیاف در هنگام ضربه ایجاد می‌کند (Matiushin et al., 2024). همچنین، الیاف با پوشش برنج برای بررسی پتانسیل افزایش پیوند ماده‌ی زمینه ـ الیاف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سختی بافت کریستالی برنج در مقیاس موهس[1] در حدود 3 الی 4 است. این سختی برای فولاد و دانه‌بندی ماسه‌ای درون بافت UHPC در حدود 6 الی 7 است. بنابراین، استفاده از پوشش برنجی می‌تواند خراش‌هایی را در سطح برنج ایجاد نموده و پیوستگی بسیار مناسبی را در بافت بتن نسبت به الیاف فولادی ایجاد نماید (Wille & Naaman, 2013).

2 ـ 4 ـ نسبت آب به سیمان و فوق‌روان کننده‌ها

نسبت آب به سیمان (w/c) بسیار پایین در UHPC که معمولاً در محدوده 0/16 تا 0/25 قرار دارد، سهم قابل توجهی در ایجاد ریزساختار متراکم و مقاومت بالا دارد. این نسبت‌های پایین آب به چسباننده از طریق استفاده از کاهنده‌های آب (فوق‌روان‌کننده‌ها) با دوزهای 1 تا 8 درصد وزنی سیمان امکان‌پذیر شده‌اند (Li et al., 2023).

تخلخل کاهش‌یافته‌ی ناشی از نسبت‌های پایین آب به سیمان، نفوذپذیری ماده را کاهش داده و انتقال رطوبت و تخریب احتمالی ناشی از قرارگیری در معرض عوامل محیطی مخرب پس از آسیب ضربه‌ای را محدود می‌کند. با این حال، نسبت‌های بسیار پایین آب به سیمان همچنین باعث افزایش جمع‌شدگی خودبه‌خودی[2] می‌شوند که در صورت عدم کنترل مناسب از طریق عمل‌آوری یا افزودنی‌های کاهنده‌ی جمع‌شدگی، می‌تواند منجر به ایجاد ترک‌های ریز شود (Shi et al., 2024). این نوع انقباض در اثر انجام فرآیند هیدراسیون شیمیایی بین سیمان و آب شکل می‌گیرد. طی این فرآیند، محصول کلسیم ـ سیلیکات ـ هیدرات تولید شده حجم کمتری نسبت به میزان آب و سیمان داشته که باعث ایجاد تنش‌هایی کششی در ریزساختار مصالح در مقیاس نانو می‌شود. مقدار این انقباض نیز به میزان تقریبی 500 الی 1500 میکروکرنش می‌باشد که نسبت به بتن معمولی بسیار بیشتر است. استفاده از الیاف به کنترل این انقباض کمک شایانی می‌نماید (Moman et al., 2025).

2 ـ 5 ـ روش‌های عمل‌آوری

ویژگی‌های مکانیکی UHPC را می‌توان از طریق روش‌های خاص عمل‌آوری بهبود بخشید. تحقیقات نشان داده‌اند که عملیات حرارتی در دمای 60 الی 90 درجه سانتی‌گراد به مدت 48 الی 72 ساعت، به‌طور قابل‌توجهی خواص وابسته به زمان ماده را بهبود می‌بخشد که منجر به کاهش کرنش خزشی و ارتقای عملکرد بلندمدت می‌شود (Graybeal, 2019). البته بایستی توجه داشت که فرآیند عمل‌آوری بایستی پس از اتمام گیرش اولیه به مدت حداقل 12 ساعت پس از قالب‌ریزی انجام گیرد تا منجر به ایجاد ضعف مقاومتی و کرنش‌های شدید در مصالح نشود (Kang et al., 2017). در کاربردهای ضربه‌ای، چنین روش‌های عملیاتی می‌توانند به بهینه‌سازی

---

[1] Mohs Hardness Scale
[2] Autogenous Shrinkage

فصل مشترک ماده‌ی زمینه ـ الیاف و کاهش مناطق ضعف احتمالی در ریزساختار کمک کنند.

عمل‌آوری با بخار معمولاً برای تسریع رشد مقاومت در UHPC به کار می‌رود، به‌طوری که مطالعات نشان می‌دهند این روش می‌تواند مقاومت فشاری را نسبت به عمل‌آوری مرطوب استاندارد، 15 تا 20 درصد افزایش دهد. با این حال، در کاربردهای عملی باید نیازهای انرژی و هزینه‌های مرتبط با چنین روش‌های عملیاتی مدنظر قرار گیرند (Kim, 2018).

روش‌های عمل‌آوری دیگری نیز در گذشته برای این مصالح تحت فشار بالای حین عمل‌آوری به میزان 50 مگاپاسکال و دمای شدید 250 الی 400 درجه سانتیگراد استفاده شده که منجر به تولید نمونه‌های UHPC با مقاومت فشاری به میزان 600 الی 800 مگاپاسکال شده است (Richard & Cheyrezy, 1995). استفاده از این روش منجر به تولید نمونه‌هایی بسیار مقاوم خواهد شد اما بایستی توجه داشت که هزینه‌ی این روش عمل‌آوری بسیار بالا بوده و تنها در موارد خاصی توجیه اقتصادی خواهد داشت.

در جدول 1 محدوده‌ی درصدهای وزنی ترکیبات مختلف مورد استفاده در UHPC و مقایسه‌ی آن با بتن معمولی گزارش شده است. در UHPC در موارد خاصی برای افزایش تاب‌آوری در برابر ضربه از سنگدانه‌های درشت با سختی زیاد استفاده می‌شود. در غیر این صورت به صورت معمول سنگدانه‌های طرح اختلاط ریزدانه خواهد بود.

جدول 1 ـ مقایسه‌ی مواد اولیه‌ی تشکیل دهنده‌ی UHPC در مقایسه با بتن معمولی (Abbas et al., 2016)

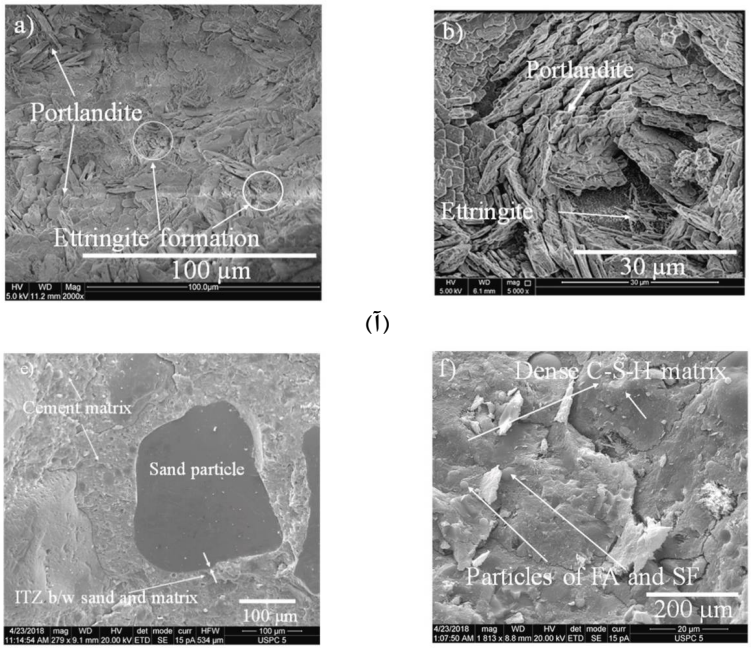
مواد اولیه	جزء	محدوده‌ی UHPC (درصد وزنی)	محدوده‌ی بتن معمولی (درصد وزنی)
مواد سیمانی	سیمان	25 ـ 40	10 ـ 16
	فوم سیلیس	5 ـ 12	ـ
	پودر کوارتز	7 ـ 14	ـ
سنگدانه	ماسه	32 ـ 45	25 ـ 32
	شن[1]	ـ	40 ـ 50
روان‌کننده	ـ	0/5 ـ 3	ـ
آب	ـ	4 ـ 10	6 ـ 8
الیاف فولادی	ـ	0 ـ 8	ـ

[1] به طور معمول شن در UHPC کاربردی ندارد اما در برخی تحقیقات به جای بخشی از ماسه، شن‌های بازالتی یا کوراندوم با سختی بالا استفاده شده‌اند.

به صورت خلاصه، مقاومت ضربه‌ای UHPC ناشی از ترکیب متعادل و حساب‌شده‌ی مواد تشکیل‌دهنده و شرایط عمل‌آوری آن است. بخش بعدی بررسی خواهد کرد که چگونه این ویژگی‌های ماده به مکانیزم‌های خاص مقاومت در برابر بارگذاری دینامیکی و ضربه‌ی پرتابه می‌انجامد.

در شکل 1، ریزساختار بتن معمولی و UHPC ارائه شده است. بر اساس این شکل مشخص است که با

افزودن فوم سیلیس در طرح اختلاط UHPC، پیوستگی ماده‌ی زمینه و شیره‌ی بتن به اجزای درون آن بسیار بهتر از بتن معمولی خواهد بود. همچنین، با کاهش فضاهای خالی درون بافت بتن، مشخصات نفوذپذیری و دوام UHPC مزیت بسیار بیشتری در مقایسه با بتن معمولی خواهد داشت (Sohail et al., 2021).



شکل 1ـ مقایسه‌ی ریزساختار و بافت کریستالی (آ) بتن معمولی و (ب) UHPC (Sohail et al., 2021)

3ـ مکانیزم‌های مقاوم‌سازی الیاف

استفاده از الیاف، به ویژه الیاف فولادی، UHPC را از ماده‌ای شکننده به کامپوزیتی شکل‌پذیر با ظرفیت جذب انرژی چشم‌گیر تبدیل می‌کند. این بخش به تحلیل مکانیزم‌هایی می‌پردازد که از طریق آن‌ها تقویت الیافی، عملکرد UHPC را تحت شرایط بارگذاری ضربه‌ای بهبود می‌بخشد.

3ـ1ـ اتصال ترک‌ها و توزیع تنش

الیاف فولادی در UHPC عمدتاً با متصل نمودن ترک‌ها در مقیاس‌های ریز و درشت عمل می‌کنند و امکان توزیع مجدد تنش و جلوگیری از شکست فاجعه‌بار تحت بارهای ضربه‌ای را فراهم می‌آورند. در شرایط بارگذاری ایستا، ترک‌های ریز به آرامی به ترک‌های درشت تبدیل می‌شوند، اما تحت بارگذاری ضربه‌ای دینامیکی، ترک‌های ریز متعددی به طور همزمان قبل از ایجاد شکست‌های بزرگ‌تر تشکیل می‌شود. این پدیده‌ی ترک‌خوردگی توزیع‌شده، انرژی قابل‌توجهی جذب می‌کند که به مقاومت فشاری دینامیکی بالای UHPC کمک شایانی می‌نماید (Li & Deng, 2021).

الیاف کوتاه (با طول 6 میلی‌متر) به ویژه در اتصال ترک‌های ریز مؤثر هستند، زیرا تعداد بالاتری داشته و توزیع بهتری در حجم معینی دارند، در حالی که الیاف بلند (13-15 میلی‌متر) عملکرد بهتری در اتصال

ترک‌های درشت از طریق طول لنگرگیری بیشتر را فراهم می‌کنند. ترکیب هیبریدی الیاف کوتاه و بلند اثر هم‌افزایی ایجاد می‌کند که مقاومت کلی UHPC در برابر ترک را افزایش می‌دهد. تحقیقات نشان می‌دهد که سیستم‌های هیبریدی الیاف فولادی خواص مکانیکی ایستا و دینامیک بالاتری نسبت به سیستم‌های با یک مدل الیاف ارائه می‌دهند (Wu et al., 2017).

3 ـ 2 ـ رفتار ناحیه‌ی اتصالی ماده‌ی زمینه ـ الیاف

استحکام پیوند بین الیاف فولادی و ماده‌ی زمینه‌ی UHPC تأثیر به سزایی بر مقاومت ضربه‌ای دارد. فصل مشترک قوی‌تر بین الیاف و ماده‌ی زمینه، انتقال تنش مؤثرتر و جذب انرژی بیشتر در هنگام بیرون کشیده شدن الیاف را ممکن می‌سازد. مطالعات نشان داده‌اند که استحکام پیوند می‌تواند تا 1.38 برابر از طریق بهینه‌سازی مقدار و اندازه ذرات سنگدانه افزایش یابد، که توسط پارامتر سطح کل ذرات سنگدانه منعکس می‌شود (Matiushin et al., 2024).

الیاف فولادی موجدار به دلیل لنگرگیری مکانیکی بهبودیافته، پتانسیل خاصی برای کاربردهای ضربه‌ای نشان می‌دهند. نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که با افزایش پارامتر سطح کل ذرات سنگدانه از 0 به 12380 متر مربع، انرژی بیرون کشیده شدن الیاف موجدار به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد، که توسط خراش‌های بیشتر بر سطح الیاف پس از خارج شدن از ماده‌ی زمینه مشهود است. این رفتار پیوندی بهبودیافته مستقیماً منجر به عملکرد بهتر ضربه‌ای از طریق اتلاف انرژی بیشتر در هنگام بیرون کشیده شدن الیاف می‌شود (Matiushin et al., 2024).

الیاف فولادی ریز (با قطر 0/2 میلی‌متر) نشان داده‌اند که تأثیر مفیدی بر رفتار ترک‌خوردگی چندگانه و سخت‌شدگی کرنشی UHPC به ویژه در سیستم‌های الیاف هیبریدی دارند. این الیاف ریز به کنترل گسترش ترک‌های ریز کمک می‌کنند، که برای حفظ یکپارچگی ساختاری در مراحل اولیه بارگذاری ضربه‌ای حیاتی است (Das et al., 2023).

3 ـ 3 ـ مقدار بهینه‌ی الیاف

اگرچه تقویت با الیاف مقاومت ضربه‌ای UHPC را به میزان چشمگیری بهبود می‌بخشد، اما محتوای الیاف بیش از حد می‌تواند منجر به ایجاد مشکلاتی از قبیل کارایی پایین و خوشه‌ای شدن الیاف شود. در ادبیات فنی و تحقیقات متفاوت، مقدار الیاف به میزان 2 درصد حجمی به عنوان محتوای بهینه الیاف فولادی برای UHPC مقاوم در برابر ضربه است. فراتر از این آستانه، در شرایط اختلاط معمول، الیاف اضافی بازدهی کاهش‌یافته‌ای در مقاومت در برابر نفوذ نشان داده و ممکن است سایر خواص ماده را به خطر بیندازند (Teng et al., 2020).

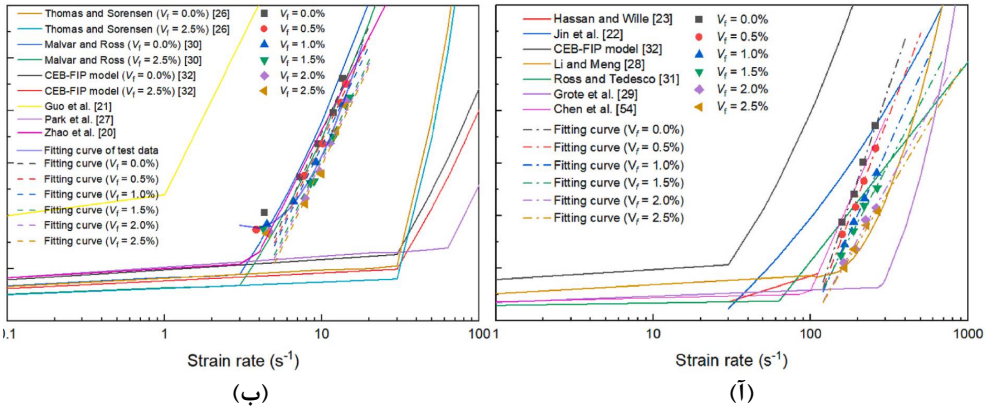
مطالعه‌ی رادوسلاو نشان داد که محتوای الیاف بیش از 2 درصد در مخلوط هیچ اثر مثبت اضافی بر عمق نفوذ یا قطر دهانه تحت تأثیر پرتابه نداشت. با این حال، محتوای الیاف بر الگوهای آسیب تأثیر می‌گذارد. محتوای بالاتر الیاف منجر به حجم دهانه‌های کوچکتر می‌شود و آسیب‌های پراکندگی ذرات و پوسته‌پوسته شدن ناحیه‌ی پشتی برخورد را کاهش می‌دهد، حتی زمانی که عمق نفوذ نسبتاً بدون تغییر باقی می‌ماند (Sovják et al., 2015).

تحقیقات دیگری نیز در ادبیات فنی انجام گرفته که با استفاده از الیاف کوتاه 6 میلیمتری (3% حجمی) و متوسط 13 میلیمتری (3% حجمی) به میزان 6% حجمی توانسته‌اند در دال‌های 70 میلیمتری عمق نفوذ را به

میزان 50% نسبت به دو درصد الیاف کاهش دهند. اما این میزان الیاف هزینه‌ی ساخت نمونه‌ها را به شدت افزایش خواهد داد. همچنین، برای ساخت این طرح اختلاط با توجه به مشکل عدم پخش مناسب الیاف نیاز به استفاده از روش‌های قالب‌گیری و اختلاط مرحله‌ای است که خود باعث ایجاد مشکل در ساخت و اجرا در مقیاس وسیع خواهد شد (Mina et al., 2021).

3 ـ 4 ـ رفتار دینامیکی در نرخ کرنش‌های بالا

سیستم تقویت الیافی UHPC حساسیت به نرخ کرنش از خود نشان می‌دهد، به این معنی که عملکرد آن تحت نرخ‌های کرنش بالا در حدود 200 کرنش/ثانیه که مشخصه‌ی اصلی رویدادها و بارگذاری‌های ضربه‌ای بر روی سازه‌ها است، بهبود می‌یابد. مقاومت کششی دینامیکی و مقاومت باقیمانده در ناحیه‌ی پس از قله‌ی تنش، در مقایسه با شرایط بارگذاری ایستا به میزان قابل توجهی حتی پس از ایجاد ترک‌خوردگی در ماده‌ی زمینه افزایش می‌یابد (Yang et al., 2022). وی و همکاران عملکرد ضربه‌ای (انرژی پایین و نرخ کرنش متوسط) UHPCتحت آزمایش چکش سقوط با الیاف فولادی هیبریدی را ارزیابی کردند و دریافتند که ظرفیت جذب انرژی تحت بارگذاری دینامیکی از آنچه در آزمایش‌های ایستا مشاهده شده بود، فراتر رفت (Wei et al., 2021). این رفتار سخت‌شوندگی نرخ کرنش، UHPC تقویت‌شده با الیاف را به ویژه برای کاربردهای مقاوم در برابر ضربه و انفجار مناسب می‌سازد. در یکی از تحقیقات نشان داده شده که با افزودن 1/5% الیاف به UHPC میزان جذب انرژی ضربه‌ای در نرخ کرنش بالا به میزان 4/3 برابر افزایش یافته است (He et al., 2024).



شکل 2 ـ مقایسه‌ی ضریب رفتار وابسته به کرنش برای حداکثر تنش (آ) فشاری و (ب) کششی (Yang et al., 2022)

در شکل 2، ضریب افزایش مقاومت برای رفتار وابسته به کرنش در فشار و کشش تک محوری نمایش داده شده است. علت اصلی اختلاف این ضریب در مراجع مختلف به اختلاف در نوع الیاف (قلاب‌دار، ساده و ...) و طرح اختلاط مورد استفاده نسبت داده شده است.

3 ـ 5 ـ جنس الیاف

در حالی که الیاف فولادی صاف بیشترین سهم را در تحقیقات و کاربردها دارند، انواع دیگر الیاف نیز برای UHPCمقاوم در برابر ضربه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند:

1 ـ الیاف فولادی با پوشش برنج: این الیاف در برابر خوردگی مقاومت بالایی داشته و به علت اختلاف سختی سنگدانه و پوشش برنج پیوند بسیار خوبی با ماده‌ی زمینه‌ی UHPC ایجاد می‌کند (Wille & Naaman, 2013).

2 ـ الیاف غیرفلزی: الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA) و پلی‌اتیلن (PE) به عنوان جایگزین‌های بالقوه برای فولاد مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، به ویژه در کاربردهایی که شفافیت الکترومغناطیسی یا مقاومت در برابر خوردگی اولویت بالایی دارند (Dehghanpour et al., 2022).

3 ـ الیاف آلیاژهای حافظه‌دار: تحقیقات نوظهور به بررسی الیافی پرداخته که می‌توانند در پاسخ به تنش یا تغییر دما تغییر شکل دهند و به طور بالقوه قابلیت خودترمیمی پس از آسیب ضربه‌ای را ارائه می‌کنند (Tabrizikahou et al., 2024).

با این حال، الیاف فولادی به دلیل سختی بالا، استحکام و ویژگی‌های پیوند با ماتریس سیمانی، همچنان مؤثرترین گزینه برای مقاومت در برابر ضربه می‌باشد. ترکیب خواص مکانیکی مناسب و هزینه نسبتاً پایین، الیاف فولادی را به گزینه ترجیحی برای اکثر کاربردهای طرح اختلاط سازه‌های محافظتی تبدیل کرده است.

اثربخشی تقویت الیافی در UHPC تحت بارگذاری ضربه‌ای را می‌توان از طریق سه مکانیزم اصلی جذب انرژی خلاصه کرد: (1) تغییر شکل کشسان سیستم ماده‌ی زمینه ـ الیاف در حین بارگذاری اولیه، (2) اتلاف انرژی از طریق تشکیل ترک‌های ریز متعدد و پل زدن الیاف کوتاه بین آن‌ها، و (3) بیرون کشیده شدن الیاف بلند در فاز پس از قله‌ی بارگذاری. این مکانیزم‌ها به صورت موازی عمل نموده و مقاومتی استثنایی در برابر ضربه را تأمین می‌نمایند.

بخش بعدی به بررسی اندرکنش این مصالح با پرتابه‌های مختلف و سرعت‌های متفاوت خواهد پرداخت و بر مکانیک نفوذ و الگوهای آسیب در UHPC تحت تأثیر پرتابه‌ها تمرکز خواهد کرد.

4 ـ اندرکنش با پرتابه‌ها

درک اندرکنش بین پرتابه‌ها و اهداف UHPC برای طراحی سازه‌های محافظتی ضروری است. این بخش به بررسی مکانیسم‌های نفوذ، الگوهای آسیب و عوامل مؤثر بر مقاومت بالیستیکی UHPC می‌پردازد.

4 ـ 1 ـ مکانیسم‌های نفوذ

هنگامی که یک پرتابه به UHPC برخورد می‌کند، چندین فاز متمایز از اندرکنش به صورت تماس اولیه و انتشار موج ضربه، تشکیل دهانه، نفوذ تونلی و سوراخ شدگی (در موارد با انرژی کافی) و کنده‌شدن بتن در سطح مقابل رخ می‌دهد. ویژگی‌ها و مشخصات ریزساختار متراکم UHPC این مکانیسم‌های نفوذ را در مقایسه با بتن با مقاومت معمولی به چند روش کلیدی تغییر می‌دهد:

1 ـ تشکیل دهانه: اهداف UHPC در مقایسه با اهداف گرانیتی تحت شرایط ضربهd مشابه، دهانه‌های سطحی کوچکتری نشان می‌دهند، اگرچه عمق نفوذ در UHPC ممکن است کمی بیشتر از گرانیت باشد (Ning et al., 2023). این موضوع نشان‌دهنده مقاومت بالاتر UHPC در برابر پراکندگی و خردشدگی

سطحی است.

2 ـ فاز نفوذ تونلی: ماده‌ی زمینه‌ی همگن و تقویت‌شده با الیاف UHPC در مقایسه با بتن معمولی، مقاومت یکنواخت‌تری در طول نفوذ پرتابه ارائه می‌دهد. الیاف به حفظ یکپارچگی ساختاری حتی پس از آسیب قابل‌توجه ماتریس کمک نموده و قطر تونل ایجاد شده تقریبا ثابت باقی خواهد ماند (Li et al., 2023).

3 ـ حد سوراخ شدگی: مطالعات با استفاده از پرتابه‌های نفوذکننده به زره 7.62 x 51 میلی‌متر، حد سوراخ شدگی را برای UHPC در ضخامت‌های 85 میلی‌متر در سرعت 843 متر بر ثانیه و 95 میلی‌متر در سرعت 926 متر بر ثانیه گزارش کرده‌اند. این مقادیر نشان‌دهنده بهبود قابل‌توجهی در مقایسه با بتن معمولی است (Das & Nanthagopalan, 2024).

4 ـ 2 ـ ویژگی‌های پرتابه و تأثیرات آن

ماهیت پرتابه تأثیر قابل‌توجهی بر پاسخ UHPC به ضربه دارد. برخی از این ویژگی‌ها را به صورت زیر می‌توان مورد بررسی قرار داد.

1 ـ شکل نوک: در بتن با مقاومت معمولی، پرتابه‌های مخروطی 18% نفوذ عمیق‌تری نسبت به پرتابه‌های نیمکره‌ای ایجاد می‌کنند. با این حال، در UHPC تأثیر شکل نوک کمتر مشهود است و تفاوت در عمق نفوذ معمولاً کمتر از 5% است . این نشان می‌دهد که مقاومت UHPC در مقایسه با بتن معمولی حساسیت کمتری به هندسه پرتابه دارد (Kim et al., 2021).

2 ـ جنس پرتابه: پرتابه‌های تغییرشکل‌پذیر (مانند آنهایی که هسته سربی دارند) در مقایسه با پرتابه‌های تغییرشکل‌ناپذیر در مواد پایه سیمانی، 23 تا 88% کاهش عمق نفوذ نشان می‌دهند. در مورد UHPCبه‌طور خاص، پرتابه‌های تغییرشکل‌پذیر 15 تا 50% نفوذ کم‌عمق‌تری در مقایسه با بتن‌های با عملکرد بالا (HPC) نشان می‌دهند (F. Zhang et al., 2020). این رفتار ناشی از جذب شدن بخشی از انرژی جنبشی پرتابه در درون خود به صورت انرژی کرنشی الاستیک و غیرالاستیک در پرتابه‌های شکل‌پذیر است.

3 ـ اندازه‌ی پرتابه: برای پرتابه‌های نفوذکننده به زره، تحقیقات نشان می‌دهد که اندازه‌ی سنگدانه باید حداقل 1.5 برابر قطر پرتابه باشد تا مقاومت مؤثر ایجاد شود. برای پرتابه‌ای با قطر 12 میلی‌متر، این امر حداکثر اندازه سنگدانه را حدود 18 میلی‌متر پیشنهاد می‌کند (Wu, Fang, Gong, et al., 2015).

4 ـ طول پرتابه: پرتابه‌های بلند (تا 450 میلی‌متر) در برابر اهداف بتنی آزمایش شده‌اند، اما داده‌های محدودی برای UHPC وجود دارد. طول زیاد پرتابه‌ها در برخورد با اهداف بتنی می‌تواند سبب جذب انرژی در مودهای دورانی صلب پرتابه و همچنین، ارتعاشات الاستیک و غیرالاستیک محوری آن شود (Rajput et al., 2018). با این وجود، تا کنون تحقیقات کمی در این حوزه انجام شده و بررسی اثرات این ویژگی پرتابه نیاز به انجام تحقیقات بیشتری دارد.

4 ـ 3 ـ تأثیرات سرعت و زاویه

سرعت و زاویه‌ی برخورد تأثیر قابل توجهی بر نتایج نفوذ دارند:

1 ـ تأثیرات سرعت: با افزایش سرعت پرتابه، هم عمق نفوذ و هم قطر دهانه در اهداف UHPC

افزایش می‌یابد. این پدیده با توجه به افزایش انرژی جنبشی پرتابه در برخورد با سطح هدف ایجاد می‌شود. با این حال، نرخ افزایش عمق نفوذ با توجه به سرعت پرتابه کمتر از بتن معمولی است که نشان‌دهنده مقاومت بالاتر UHPC در سرعت‌های بیشتر است (Park et al., 2023).

2 ـ تأثیرات زاویه: هرچه زاویه‌ی برخورد بیشتر یا سرعت پرتابه کمتر باشد، انحراف پرتابه آسان‌تر است. برخوردهای مایل معمولاً آسیب موضعی‌تری با عمق نفوذ کاهش‌یافته در مقایسه با برخوردهای عمودی در سرعت‌های مشابه ایجاد می‌کنند. علت این پدیده در این نکته نهفته است که حداکثر تنش در حالت برخورد قائم پرتابه به سطح هدف در آن ایجاد خواهد شد (Das & Nanthagopalan, 2024; Ning et al., 2023).

4 ـ 4 ـ تأثیرات دما

عملکرد UHPC تحت تأثیر دماهای شدید به ویژه برای کاربردهای نظامی و هوافضا مرتبط است.

1 ـ دماهای زیر صفر: در دماهای کرایوژنیک[1]، با اعمال چرخه‌های ذوب و یخ به نمونه‌ی UHPC پیوستگی بین الیاف و ماده‌ی زمینه پس از 8 چرخه به میزان قابل توجهی بر اساس عکس‌های میکروسکوپی کاهش یافته است. میزان جذب انرژی نمونه‌ها نیز با توجه به ضعف در ریزساختار با افزایش چرخه‌ها کاهش یافته است. البته، الیاف به حفظ شکل‌پذیری حتی در دماهای پایین کمک می‌کنند و رفتاری ترد و شکننده از خود نشان نمی‌دهند (Chi et al., 2025). در یکی دیگر از تحقیقات نشان داده شده که سختی پس از ترک خوردگی، مقاومت کششی و انرژی شکست افزایش قابل توجهی در دماهای بسیار پایین در حدود 170 درجه سانتیگراد زیر صفر در مقایسه با بتن معمولی از خود نشان داده است. از طرفی، مقاومت فشاری UHPC تحت دماهای پایین تغییر چندانی نداشته است (Kim et al., 2017). در دمای 30 درجه سانتیگراد زیر صفر نیز تحت بارهای ضربه‌ای نشان داده شده که عمق نفوذ و میزان خرابی کاهش یافته است (Das & Nanthagopalan, 2024).

2 ـ دماهای بالا: در یکی از تحقیقات که به این منظور صورت گرفته نشان داده شده که انجام آزمایش مقاومت فشاری، خمشی و پیوستگی میان ماده‌ی زمینه ـ الیاف با افزایش دما تا حدود 500 درجه‌ی سانتیگراد و سپس رساندن نمونه به دمای اتاق به ترتیب 20%، 15% و 30% کاهش یافته است (Chen et al., 2021). البته در دماهای بالاتر از 600 درجه سانتیگراد، با تخریب ریزساختار نمونه‌ها مقاومت پیوستگی الیاف بیش از 60% کاهش می‌یابد (Y. Zhang et al., 2020). در یکی دیگر از مقالات نشان داده شده که استفاده از الیاف پلیمری (0/5%) به همراه الیاف فلزی (1/5%) به علت ایجاد مسیری برای انتقال بخارات داخل ریزساختار UHPC میزان خرابی در نمونه‌ها را در دماهای بالای 300 درجه سانتیگراد کاهش داده و از شدت کاهش مقاومت فشاری و مدول الاستیک کاسته است (Sumitomo et al., 2024).

---

[1] Cryogenic Temperatures

4 ـ 5 ـ ظرفیت تحمل چندین ضربه

ملاحظه‌ی مهم برای سازه‌های محافظتی، توانایی تحمل چندین ضربه است. اگرچه داده‌های محدودی به طور خاص برای UHPC وجود دارد، ریزساختار متراکم و تقویت الیافی آن ظرفیت بهتری نسبت به بتن معمولی برای تحمل چندین ضربه فراهم می‌کند .کاهش ترک‌خوردگی و پراکندگی در UHPC به حفظ یکپارچگی ساختاری پس از ضربه‌ی اولیه کمک می‌کند، اگرچه این حوزه نیاز به بررسی‌های تجربی بیشتری دارد. با این وجود در تحقیقی که از سنگدانه‌های کوراندوم و الیاف بازالتی (1%) و فولادی (3%) در UHPC استفاده نموده نشان داده شده که عمق نفوذ برخوردهای دوم و سوم نسبت به نمونه‌های UHPC معمول با الیاف فولادی و بازالتی در حدود 10% کاهش یافته است (Lai et al., 2018).

اندرکنش بین پرتابه‌ها و UHPC شامل مکانیزم‌های پیچیده‌ای است که به ویژگی‌های مواد و شرایط ضربه بستگی دارد. بخش بعدی به بررسی عملکرد UHPC در پیکربندی‌های مرکب با مواد دیگر می‌پردازد که اغلب محافظت بهتری نسبت به UHPC به تنهایی ارائه می‌دهد.

5 ـ سازه‌های مرکب با UHPC برای مقاومت ضربه‌ای بهبودیافته

در حالی که UHPC به عنوان یک ماده مستقل مقاومت ضربه‌ای بالایی از خود نشان می‌دهد، عملکرد آن را می‌توان از طریق پیکربندی‌های مرکب با مواد دیگر بهبود داد. این بخش به بررسی رویکردهای مختلف مرکب و تأثیر آن‌ها در برابر نفوذ پرتابه و بارهای انفجاری می‌پردازد.

5 ـ 1 ـ سیستم مرکب UHPC ـ گرانیت

مطالعات مقایسه‌ای بین اهداف UHPC و گرانیت نشان‌دهنده ویژگی‌های عملکردی مکمل تحت تأثیر پرتابه است. در حالی که گرانیت مقاومت کمی بهتر در برابر عمق نفوذ نشان می‌دهد، UHPC عملکرد بهتری در به حداقل رساندن دهانه‌های سطحی دارد. این امر منجر به توسعه سازه‌های مرکب UHPC ـ گرانیت شده است که نقاط قوت هر دو ماده را ترکیب می‌کند. طراحی سازه‌ی مرکب UHPC ـ گرانیت برای کاربردهای ضد نفوذ امیدوارکننده است، زیرا سختی طبیعی گرانیت را با قابلیت جذب انرژی UHPC ترکیب می‌کند (Ning et al., 2023).

5 ـ 2 ـ پیکربندی‌های چندلایه‌ی UHPC

سیستم‌های چندلایه‌ی UHPC برای پتانسیل بهبود مقاومت ضربه‌ای از طریق جذب انرژی متوالی مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

1 ـ تقویت UHPC با مش فولادی: تقویت UHPC با مش فولادی و میلگردها اثرات مثبتی بر مقاومت ضربه‌ای نشان داده‌است، اگرچه فاصله و پیکربندی بهینه نیاز به مطالعه بیشتری دارد. مش فولادی با فاصله‌ی کم، اثر محصورکنندگی و عمل غشایی ایجاد می‌کند که عملکرد ضربه‌ای را بهبود می‌بخشد (Das & Nanthagopalan, 2024). همچنین، مش‌بندی فولادی متراکم در برخورد با پرتابه‌های کوچک می‌تواند مانعی بزرگ در برابر حرکت انواع پرتابه درون سطح هدف ایجاد نماید (Ning et al., 2023).

2 ـ لایه‌بندی UHPC و کامپوزیت‌های سرامیکی: در یکی از تحقیقات که به این منظور صورت گرفته، عمق نفوذ برای گلوله‌ی صلب به طول 180 میلیمتر و جرم تقریبی 630 گرم اندازه‌گیری شده است. در نمونه‌ی بتن معمولی میزان نفوذ 285 میلیمتر بوده است. عمق نفوذ در نمونه‌ی UHPC نیز به میزان 180

میلیمتر بوده است. در ترکیب این نمونه با فولاد ضد زره به ضخامت 5 و 10 میلیمتر عمق نفوذ به ترتیب برابر 165 میلیمتر و 105 میلیمتر بوده است. در ترکیب با سرامیک از جنس SiC به ضخامت‌های 6 و 11 میلیمتر این عمق نفوذ به میزان 145 میلیمتر و 65 میلیمتر رسیده است. در ترکیب ورق فولادی به ضخامت 5 میلیمتر و سرامیک به میزان 6 میلیمتر نیز عمق نفوذ 120 میلیمتر بوده است. این بررسی به وضوح نشان می‌دهد که استفاده از چندین لایه و ساخت مصالح مرکب می‌تواند عمق نفوذ پرتابه‌ها را به شدت نسبت به نمونه‌ی UHPC کاهش دهد (Zhai et al., 2021).

3 ـ لایه‌بندی UHPC به صورت گرادیانی: در این نوع از لایه‌ی محافظتی سطح جبهه‌ی برخورد و سطح پشتی آن با خواص متفاوتی ساخته و قالب‌گیری می‌شود. در یکی از تحقیقات روشی برای ساخت UHPC به صورت دو لایه پیشنهاد شده که الیاف در قسمت پشتی و سنگدانه‌ها در جبهه‌ی برخورد قرار داده شده و سپس شیره‌ی بتن به درون قالب تزریق شده است. این آرایش مقاومت فشاری مناسبی را در جبهه‌ی برخورد و مقاومت کششی مناسبی را در قسمت پشتی تامین می نماید (Li, Sluijsmans, et al., 2020). در تحقیق دیگری که لایه‌ی محافظتی به صورت چندلایه طراحی و آزمایش بر روی نمونه‌ها صورت گرفته نشان داده شده که بسته به سرعت برخوردهای متفاوت 500، 700 و 900 متر بر ثانیه عمق نفوذ به ترتیب به میزان تقریبی 4%، 17% و 25% نسبت به نمونه‌ی تک‌لایه کاهش یافته است که نشان می‌دهد می‌توان از لایه‌بندی گرادیانی برای کاهش عمق نفوذ پرتابه‌ها بهره‌گیری نمود (Lv et al., 2023).

5 ـ 3 ـ رفتار فصل مشترک در سیستم‌های مرکب

عملکرد سیستم‌های مرکب UHPC به شدت به رفتار فصل مشترک بین مواد مختلف بستگی دارد. چندین عامل بر اثربخشی کامپوزیت تأثیر می‌گذارند:

1 ـ استحکام پیوند: پیوند کافی بین UHPC و سایر اجزا برای انتقال تنش و عمل مرکب ضروری است. آماده‌سازی سطح و ایجاد مکانیزم قفل مکانیکی بین لایه‌ها به صورت بالقوه می‌تواند پیوند را بهبود ببخشد. در یکی از تحقیقات نشان داده شده که سطح ناهموار طبیعی بین دو لایه‌ی بتن معمولی و UHPC می‌تواند اثرات قفل مکانیکی بسیار قدرتمندتری را نسبت به حالت شیارهای منظم یا سطح صاف ایجاد نماید (Haruna et al., 2024).

2 ـ تطابق امپدانس: امپدانس آکوستیک بین لایه‌ها بر انتشار موج تنش در هنگام ضربه تأثیر می‌گذارد. تغییر تدریجی در خواص آکوستیکی مواد می‌تواند به کاهش اثرات بازتاب موج که ممکن است باعث لایه‌لایه شدن مصالح شود، کمک کند (Lv et al., 2023).

3 ـ سازگاری آسیب: مواد مختلف در کامپوزیت باید پیشرفت آسیب سازگاری را نشان دهند تا از شکست زودرس در فصل مشترک جلوگیری شود. همچنین، رعایت این معیار در طراحی کامپوزیت سبب جلوگیری از خرابی یک لایه به صورت کلی قبل از ایجاد خرابی در لایه‌های دیگر می‌شود (Ning et al., 2023).

5 ـ 4 ـ ملاحظات عملی برای سازه‌های مرکب

در حالی که سیستم‌های مرکب UHPC مزایای عملکردی ارائه می‌دهند، چندین ملاحظه‌ی عملی در رابطه با آن‌ها باید مورد توجه قرار گیرد:

1 ـ قابلیت ساخت: سیستم‌های مرکب باید پیچیدگی ساخت معقولی را حفظ کنند تا اجرای میدانی را تسهیل کنند.

2 ـ مقرون‌به‌صرفه بودن: عملکرد بهبودیافته باید هزینه‌های اضافی مواد و ساخت را توجیه کند.

3 ـ قابلیت تعمیر: عناصر مرکب آسیب‌دیده باید امکان استراتژی‌های تعمیر عملی را برای حفظ قابلیت‌های محافظتی فراهم کنند.

4 ـ دوام: عملکرد بلندمدت تحت شرایط محیطی باید تضمین شود، به ویژه برای فصل مشترک بین مواد مختلف.

سازه‌های مرکب UHPC نشان‌دهنده‌ی مسیری امیدوارکننده برای سیستم‌های محافظتی پیشرفته هستند که ویژگی‌های منحصر به فرد UHPC را با مواد دیگر ترکیب می‌کنند تا مقاومت ضربه‌ای برتر حاصل شود. بخش بعدی به بررسی روش‌های عددی و تحلیلی برای پیش‌بینی رفتار UHPC تحت بارگذاری ضربه‌ای می‌پردازد که برای طراحی کارآمد سازه‌های محافظتی ضروری است.

6 ـ کمی‌سازی رفتار UHPC تحت بارگذاری ضربه‌ای

پیشبینی دقیق پاسخ UHPC به بارگذاری ضربه‌ای برای طراحی کارآمد سازه‌های محافظتی ضروری است. این بخش به بررسی روش‌های فعلی مدلسازی، محدودیت‌های آن‌ها و تکنیک‌های نوظهور برای شبیه‌سازی رفتار پیچیده‌ی UHPC تحت شرایط دینامیکی می‌پردازد.

6 ـ 1 ـ روش‌های تجربی

فرمول‌های تجربی سنتی برای پیش‌بینی عمق نفوذ پرتابه‌ها در بتن معمولی توسعه داده شده‌اند. یکی از روابط ابتدایی در این زمینه رابطه‌ی پتری[1] (رابطه‌ی (1)) است که تنها ضریب ثابتی بر مبنای نوع سطح هدف (بلوک بتنی، بتن آرمه، دال بتنی و ...) و مشخصات پرتابه (سرعت، جرم و سطح مقطع) توسعه داده شده است. با گذشت زمان روابط دیگری توسط موسسه تحقیقات پرتابه‌ها (رابطه‌ی (2)) و سازمان نظامی مهندسین (رابطه‌ی (3)) توسعه داده شد که مشخصه‌ی فشاری بتن معمولی نیز در روابط وارد شد (Kennedy, 1976). پس از آن به جهت تامین ایمنی تاسیسات هسته‌ای روابط دیگری توسط موسسه‌ی دفاع ملی آمریکا توسعه داده شد و پس از آن محققین فراوانی با ایجاد تغییراتی در این روابط، روابط پیشنهادی خود را ادائه نمودند (Li et al., 2005).

$$\frac{x}{d} = k\frac{M}{d^3}\log_{10}\left(1+\frac{V_0^2}{19974}\right) \qquad \textbf{(1)}$$

$$\frac{x}{d} = \frac{1.33\times10^{-3}}{\sqrt{f_c}}\left(\frac{M}{d^3}\right)d^{0.2}V_0^{1.33} \qquad \textbf{(2)}$$

$$\frac{x}{d} = \frac{3.5\times10^{-4}}{\sqrt{f_c}}\left(\frac{M}{d^3}\right)d^{0.215}V_0^{1.5}+0.5 \qquad \textbf{(3)}$$

در روابط بالا، k ضریب ثابت وابسته به نوع سطح هدف (بتن غیر مسلح $6/35\times10^{-4}$، بتن مسلح معمول $3/38\times10^{-4}$ و بتن مسلح ویژه با اتصال میلگردهای سطح و پشت برخورد $2/26\times10^{-4}$)، f_c مشخصه‌ی فشاری بتن بر حسب پاسکال، M جرم پرتابه بر حسب کیلوگرم، d قطر پرتابه بر حسب متر، V_0 سرعت پرتابه در لحظه‌ی

[1] Petry's Formula

برخورد بر حسب متر بر ثانیه و x میزان نفوذ پرتابه در سطح هدف بر حسب متر می‌باشد. این روابط در برآورد عمق نفوذ در UHPC دارای دقت مناسبی نیستند. چندین محدودیت کلیدی برای اعمال این روابط در UHPC شناسایی شده است (Das & Nanthagopalan, 2024):

1 ـ اکثر روش‌های تجربی تنها مقاومت فشاری تک محوری را به عنوان پارامتر ماده در نظر می‌گیرند (در رابطه‌ی پتری حتی این عامل نیز تاثیری ندارد) و ویژگی‌های منحصر به فرد UHPC مانند تقویت الیافی و خواص کششی بهبود یافته را نادیده می‌گیرند.

2 ـ فرمول‌های موجود اغلب عمق نفوذ در UHPC را بیش از حد پیش‌بینی می‌کنند، زیرا مکانیسم‌های بهبودیافته‌ی جذب انرژی ماده مانند ظرفیت کششی بالا و مکانیزم ترک خوردگی بهینه در UHPC را در نظر نمی‌گیرند.

3 ـ اصلاحات ایجاد شده بر روی فرمول‌های ابتدایی به جای تکیه بر نتایج آزمایشگاهی یا تجربی عمدتاً بر اساس داده‌های حاصل از روش‌های تحلیلی، نیمه‌تحلیلی و یا شبیه‌سازی‌های عددی توسعه یافته‌اند .

وو و همکاران گزارش کردند که عمق نفوذ در UHPC زمانی که مقاومت فشاری از 90 مگاپاسکال فراتر می‌رود، کاهش قابل توجهی نشان نمی‌دهد، که بیانگر آن است مقاومت مشخصه‌ی فشاری به تنهایی برای ارزیابی عمق نفوذ مناسب نیست (Wu, Fang, Chen, et al., 2015). بنابراین، با توجه به تعدد پارامترهای تاثیرگذار در تعیین عمق نفوذ در UHPC، شبکه‌های عصبی به علت امکان وارد نمودن پارامترهای متعدد توسعه داده شده‌اند تا بتوان عمق نفوذ را بر اساس ورودی‌های آزمایش‌های تجربی و تحلیل‌های عددی با دقت بیشتری تعیین نمود.

6 ـ 2 ـ روش‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

مدل‌های ANN آموزش دیده با داده‌های آزمایشگاهی یا مدل‌های عددی کالیبره شده بر اساس نتایج آزمایشگاهی می‌توانند چندین پارامتر ماده را به طور همزمان از جمله مشخصات الیاف و خواص کششی مصالح در نظر بگیرند. حسینی و دالوند اثربخشی ANN را برای تخمین نفوذ پرتابه‌های فولادی با دماغه‌ی نوک‌تیز از میان اهداف بتنی با استفاده از 70 نقطه داده (46 برای آموزش و 24 برای آزمایش) نشان دادند. مدل آموزش‌دیده‌ی آن‌ها دقت بسیار بالاتری نسبت به روش‌های رگرسیونی و روابط تجربی موجود ارائه داده است (Hosseini & Dalvand, 2015). در تحقیق دیگری داس و همکاران با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین توانستند عمق نفوذ پرتابه در UHPC مسلح به الیاف فولادی را با دقت بسیار بالایی نسبت به روابط تجربی تخمین بزنند (Das et al., 2024). در پژوهش بعدی توسط داس و نانتاگوپالان 7 پارامتر اصلی شامل انرژی برخورد، قطر و شکل دماغه‌ی پرتابه به عنوان مشخصات پرتابه و مشخصه‌ی فشاری UHPC، میزان و نسبت ابعادی الیاف و همچنین ضخامت سطح هدف به عنوان مشخصات سطح هدف برخورد به عنوان پارامترهای ورودی شبکه عصبی در نظر گرفته شده و خروجی آن به صورت عمق نفوذ پرتابه در نظر گرفته شده که دقت مدل آموزش دیده با خطای مجذور به میزان تقریبی 12% به دست آمده است (Das & Nanthagopalan, 2024). در ادامه، در یکی از پژوهش‌های اخیر توسط خان و همکاران مدلی از شبکه‌ی عصبی بر مبنای یادگیری

عمیق[1] پیشنهاد شده که دقت مدل داس را افزایش داده و نتایج تخمین عمق نفوذ را بر اساس همین پارامترها و در نظر گرفتن داده‌های مصنوعی حاصل از تحلیل مدل‌های عددی کالیبره شده بهبود داده است (Khan et al., 2025). با این وجود مشکل اصلی این روش‌ها توسعه‌ی پایگاه‌های داده‌ی آزمایشگاهی جامع برای آموزش مدل‌های ANN قابل اعتماد بسیار مهم است، زیرا کمبود داده در حال حاضر کاربرد گسترده آن‌ها را محدود و اعتماد به نتایج تولیدی توسط آن‌ها را با مشکل روبه‌رو می‌کند.

6 ـ 3 ـ مدلسازی المان محدود

در مطالعه‌ی رفتار ضربه‌ای UHPC، تحلیل المان محدود به ابزاری ارزشمند تبدیل شده است. جهت انجام شبیه‌سازی‌های عددی کدهای نرم‌افزاری متعددی هم چون LSDYNA، AUTODYN، ABAQUS و ... همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی برای هر دو پارامتر عمق نفوذ و قطر دهانه در اهداف UHPC نشان داده‌اند. این موضوع رویکرد را برای مطالعات پارامتریک مقاومت در برابر ضربه معتبر می‌سازد. در یکی از تحقیقات ابتدایی که توسط رودوسلاو توسط AUTODYN به این منظور انجام گرفته، عمق نفوذ و قطر چاله‌ی ایجاد شده در جبهه‌ی برخورد گلوله‌های شلیک شده، با خطای تقریبی 20% به دست آمده است (Sovják et al., 2015). در پژوهش دیگری که به کمک LSDYNA برای ارزیابی برخورد پرتابه بر سیستم مرکب گرانیت ـ UHPC (Ning et al., 2023) و یا برخورد چندگانه با سطح هدف (Lai et al., 2018) انجام گرفته دقت عددی بسیار مناسبی برای عمق نفوذ نسبت به نتایج آزمایش با خطای حدودی 10% مشاهده شده که به وضوح نشان می‌دهد استفاده از کدهای عددی موجود می‌تواند دقت بسیار مناسبی را در ارزیابی عمق نفوذ ارائه دهد.

مدل‌های المان محدود امکان بررسی سیستماتیک عواملی مانند سرعت ضربه، زاویه و نسبت تقویت بر عمق نفوذ را فراهم می‌کنند. بایستی توجه نمود که انجام چنین تحلیل‌هایی به صورت آزمایشگاهی بسیار پرهزینه و زمانبر خواهد بود. در صورتی که در استفاده از مدل‌های عددی کالیبره شده می‌توان حالت‌های دیگری را بسته به تغییر شرایط مرزی شبیه‌سازی نموده و نتایج آن را ارزیابی و بررسی نمود. همچنین، مدل‌های سازه‌ای پیشرفته می‌توانند روند پیشرفت آسیب در UHPC، از جمله ترک‌خوردگی ریز توزیع شده و اثرات بیرون کشیده شدن الیاف را شبیه‌سازی کنند. این شبیه‌سازی‌ها می‌تواند به صورت مدل‌سازی محیط ماتریس بتنی به صورت اجزای جدا از یکدیگر انجام گیرد تا بتوان اثرات مختلف را در ماتریس بتنی همچون جهت الیاف، اندازه‌ی سنگدانه‌ها و سختی آن‌ها را در شبیه‌سازی‌ها توسط مدل‌سازی چند مقیاسی یا مدل‌سازی مستقیم اجزا مورد بررسی قرار داد (Wang et al., 2024).

مزیت دیگر تحلیل المان محدود به ویژه برای مطالعه پیکربندی‌های مرکب پیچیده مفید است و بهینه‌سازی ضخامت لایه‌ها از نظر ارائه‌ی مشخصات امپدانسی و خواص مقاومتی مناسب را قبل از نمونه‌سازی فیزیکی امکان‌پذیر می‌سازد (Li, Sluijsmans, et al., 2020).

6 ـ 4 ـ مدل‌های ماده برای UHPC

توسعه مدل‌های دقیق ماده برای UHPC تحت بارگذاری ضربه‌ای چالش‌های متعددی دارد. مدل‌های عددی این مصالح به طور معمول بر اساس داده‌های آزمایشگاهی کالیبره می‌شود. همان گونه که در بخش‌های قبلی

[1] Deep Learning

توضیح داده شد، رفتار مکانیکی این مواد وابسته به نرخ کرنش وارده بر آن است. بنابراین، تست‌های معمول مشخصه‌های فشاری، کششی و خمشی تنها برای شرایط بارگذاری استاتیکی مناسب بوده و در شرایط بارگذاری دینامیکی شدید مانند برخورد پرتابه‌ها انجام تست‌ها توسط دستگاه میله‌ی فشار مجزای هاپکینسون[1] (SHPB) بایستی انجام پذیرد (He et al., 2024). البته نتایج این دستگاه نیز شرایط تنش تک محوری وارد بر مصالح را ارزیابی می‌نماید. البته با ایجاد تغییراتی در این دستگاه می‌توان رفتار مکانیکی مصالح را تحت تنش‌های دو یا سه محوری نیز ارزیابی نمود (Zhao et al., 2022). همچنین، دستگاه دیگری در این زمینه در یکی از پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفته که رفتار UHPC در محیط خاک و یا آب تحت تنش‌های استاتیکی محصورکننده را ارزیابی نماید (Zhang et al., 2021).

این مدل‌ها رفتار ماده را در مقیاس ماکرو به عنوان نمونه در نظر می‌گیرد. طی سال‌های اخیر عوامل دیگری در رفتار ماده به صورت ناهمسانگردی[2] (وابسته به جهت‌گیری الیاف در هندسه‌ی سه‌بعدی مواد)، تکامل آسیب[3] (انتقال از رفتار پیوسته به ناپیوسته با ایجاد ترک‌ها) و رفتار فصل مشترک (اندرکنش میان ماده‌ی زمینه و الیاف) نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند تا بر اساس آن‌ها بتوان مدل‌های دقیق‌تری از رفتار مکانیکی UHPC استخراج و در شبیه‌سازی‌ها از آن‌ها استفاده نمود. شبیه‌سازی مجموعه‌ی این رفتارها نیاز به مدل‌سازی در چند مقیاس متفاوت دارد. محدوده‌ی اصلی مورد توجه در رفتار را می‌توان به صورت اجزای جدا از یکدیگر (الیاف، سنگدانه و ماده‌ی زمینه) مدل‌سازی نمود. انجام این شبیه‌سازی نیاز به حجم محاسباتی بسیار بالایی داشته و محدودیتی بسیار جدی را ایجاد می‌نماید. از این رو نواحی کناری و با اهمیت کمتر را به صورت المان‌های در مقیاس ماکرو مدل‌سازی نموده و بر این اساس می‌توان حجم محاسبات را به صورت قابل توجهی کاهش داد (El Helou, 2016).

7 ـ کاربردهای عملی و چالش‌های پیاده‌سازی

مقاومت استثنایی UHPC در برابر ضربه منجر به کاربرد فزاینده‌ی آن در سازه‌های محافظتی و زیرساخت‌های حیاتی شده است. این بخش به بررسی کاربردهای فعلی، چالش‌های پیاده‌سازی و ملاحظات هزینه ـ فایده‌ی UHPC در طراحی مقاوم در برابر ضربه می‌پردازد.

7 ـ 1 ـ سازه‌های نظامی و محافظتی

مقاومت بسیار بالا و عملکرد مناسب بالیستیکی UHPC این مواد را به ویژه برای کاربردهای نظامی ذکر شده مناسب می‌سازد.

1 ـ موانع محافظتی UHPC: در دیوارهای مقاوم در برابر انفجار، موانع وسایل نقلیه و پناهگاه‌های محافظتی که مقاومت در برابر نفوذ انواع پرتابه (گلوله، ریزپرنده و ...) و خردشدگی حیاتی است، استفاده می‌شود.

2 ـ استحکامات: تأسیسات نظامی از UHPC برای سنگرها و سازه‌های دفاعی تقویت‌شده که باید در برابر ضربات پرانرژی (انواع موشک) مقاومت کنند، استفاده می‌کنند.

---

[1] Split Hopkinson Pressure Bar
[2] Anisotropy
[3] Damage Progression

3 ـ سازه‌های دریایی: کشتی‌ها و سکوهای فراساحلی نظامی که در معرض تهدیدات انفجاری هستند، از ترکیب مقاومت ضربه‌ای و دوام UHPC در محیط‌های دریایی بهره می‌برند.

کائو و همکاران مقاومت این مصالح را به صورت چند لایه در برابر گلوله‌های 7/62 میلیمتری مورد بررسی قرار داده و موثر بودن آن را در محافظت از سازه‌های نظامی به اثبات رسانیده‌اند (Cao et al., 2020). همچنین، در پژوهش دیگری توسط لی و همکاران پارامترهای موثر در طراحی لایه‌ی حفاظتی در برابر گلوله‌های 7/62 میلیمتری مورد ارزیابی قرار گرفته که نشان می‌دهد با در نظر گرفتن حداقل 100 میلیمتر لایه‌ی حفاظتی با دو درصد الیاف فولادی مستقیم می‌توان از عبور گلوله جلوگیری نموده و عمق نفوذ آن را بدون تخریب سطح پشتی به حداقل ممکن در حدود 60 میلیمتر رساند (Li, Brouwers, et al., 2020).

7 ـ 2 ـ حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی

مصالح UHPC در کاربردهای غیرنظامی که از مقاومت ضربه‌ای بهره می‌برند نیز به کارگیری می‌شود. این تاسیسات می‌تواند شامل ساختمان‌های دولتی که حفاظت از آن‌ها در برابر تهدیدات امنیتی و تروریستی حائز اهمیت است، باشد. همچنین، مراکز حمل و نقل و پل‌های مهم نیز می‌تواند ذیل این طبقه‌بندی قرار گیرد. این سازه‌ها در طول عمر خود ممکن است در معرض تهدیدات متفاوتی واقع شوند که مصالح UHPC با طراحی مناسب بر اساس خواص مکانیکی مورد نیاز می‌تواند در حفاظت از آن‌ها نقشی موثر را ایفا نماید (Abbas et al., 2016).

این مصالح دارای دوام بسیار بالایی در برابر نفوذ انواع یون کلرید و سولفات بوده و از این رو می‌توانند سبب افزایش طول عمر سازه‌هایی حساس مانند رآکتورهای هسته‌ای و پل‌ها و سازه‌های مهم دیگری که در محیط‌های نامناسب ساخته می‌شوند، باشند (Li et al., 2023). بر اساس گزارش‌های منتشره توسط موسسه‌ی فدرال بزرگراه‌های آمریکا نفوذپذیری این مواد در حالتی که با بخار عمل‌آوری شوند بسیار ناچیز بوده و پیش‌بینی شده عمر این مصالح در شرایط نامناسب به علت ریزساختار بسیار متراکم و نفوذپذیری بسیار پایین آن به بالای 100 سال برسد (Benjamin, 2006).

7 ـ 3 ـ چالش‌های پیاده‌سازی

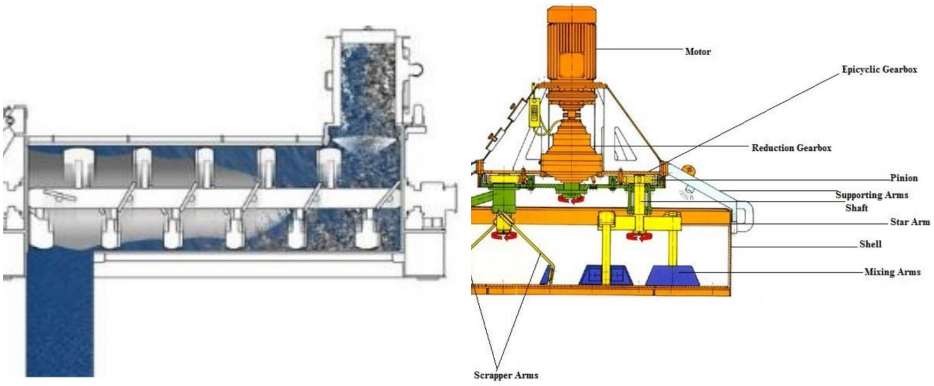
علیرغم مزایایی که در قسمت‌های قبل به آن‌ها اشاره شد، چندین چالش پذیرش گسترده‌ی UHPC را برای کاربردهای مقاوم در برابر ضربه محدود می‌کند.

1 ـ هزینه اولیه‌ی بالا: هزینه‌ی مواد UHPC به طور معمول بسیار بیشتر از بتن معمولی است که عمدتاً به دلیل محتوای سیمان بالا، افزودنی‌های ویژه (فوم سیلیس، کاهنده‌ی آب و ...) و الیاف فولادی است. بایستی توجه نمود که الیاف فولادی و سنگدانه‌های ریزدانه به تنهایی می‌توانند به ترتیب نزدیک به 40% و 27% از کل هزینه‌ی مواد اولیه را تشکیل دهند. همچنین، بسته به منطقه‌ی جغرافیایی و در دسترس بودن مصالح اولیه، هزینه‌ی مواد تشکیل‌دهنده می‌تواند بین 5 الی 20 برابر بتن معمولی باشد (Kim, 2018).

2 ـ محدودیت آیین‌نامه‌های طراحی: برای طراحی مقاطع سازه‌ای بر اساس این مواد برای پل‌ها گزارش‌هایی توسط سازمان فدرال بزرگراه‌های آمریکا تدوین شده است (Russell et al., 2013). همچنین، گزارشی مقدماتی نیز توسط انجمن بتن آمریکا منتشر شده که برای سازه‌های معمول در

محدوده‌ی بارگذاری استاتیکی و لرزه‌ای می‌توان از آن‌ها استفاده نمود (ACI239R-18, 2018). با این وجود، امروزه عدم وجود دستورالعمل‌های طراحی پذیرفته‌شده برای انجام محاسبات ظرفیت UHPC در سناریوهای ضربه، عدم اطمینان برای مهندسان ایجاد می‌کند و موانع تأیید را افزایش می‌دهد.

3 ـ تجربه پیمانکاران: این مصالح به صورت معمول به صورت پیش‌ساخته در کارخانه تهیه و در محل پروژه اجرا می‌شود. به همین منظور گزارشی در رابطه با نحوه‌ی اجرای پل‌ها به کمک قطعات پیش‌ساخته منتشر شده است (Graybeal, 2019). با این وجود استفاده از این مصالح طی سال‌های اخیر انجام گرفته و هنوز در بسیاری از مناطق دنیا با توجه به نیاز به تجهیزات اختلاط متفاوت (میکسرهای سیاره‌ای یا پیوسته به علت ویسکوزیته‌ی بالای طرح اختلاط و انجام اختلاط طی چندین مرحله) و نیاز به احداث تاسیسات جدید توسط پیمانکاران (Christ et al., 2023) برای ساخت ملات با کیفیت و قابل قبول، مورد پذیرش عمومی قرار نگرفته است.



(ب) (آ)

شکل 3 ـ میکسرهای (آ) سیاره‌ای و (ب) پیوسته جهت انجام صحیح فرآیند اختلاط ترکیبات UHPC

4 ـ کنترل کیفیت: امروزه کشورهای مختلفی از جمله چین، آمریکا، فرانسه، آلمان و ... استانداردهایی را برای کنترل خواص فوم سیلیس، الیاف تقویتی، سیمان و ... ارائه کرده‌اند. اما با این وجود نیاز است تا برای تولید یک محصول با کیفیت یکنواخت، مواد اولیه دارای کیفیت یکسانی باشند تا بتوان محصول نهایی قابل اطمینانی تولید نمود (Abbas et al., 2016).

5 ـ ملاحظات تعمیر و نگهداری: اگرچه این مصالح دارای خواص دوام بسیار عالی در مقایسه با بتن معمولی است اما بایستی توجه داشت که تا کنون مطالعات چندانی بر روی تعمیر و نگهداری این سازه‌ها صورت نگرفته است. بنابراین، در صورت ایجاد اشکال و ایراد در این مصالح، مرجع و استانداردی وجود ندارد که بتوان بر اساس آن عمل نمود (Abbas et al., 2016).

7 ـ 4 ـ تحلیل هزینه ـ فایده

هنگام ارزیابی UHPC برای کاربردهای مقاوم در برابر ضربه، چندین عامل در صرفه‌جویی در هزینه‌های اولیه و جاری بایستی در نظر گرفته شود. استحکام بالای این مصالح سبب کاهش ابعاد مقاطع سازه و در

نتیجه‌ی آن کاهش ابعاد کلی سازه خواهد شد. در یکی از بازطراحی‌های صورت گرفته بر اساس این مصالح برای یک سازه‌ی پل وزن کلی سازه در حدود 30% کاهش یافته است (Eriksson, 2019). همچنین، با توجه به مشخصات دوام بالای مصالح و مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و یخ و نفوذ یون کلرید، در صورت عدم وجود مشکل خاصی حین مراحل تهیه مصالح و اجرا، سازه‌ها طول عمری بیش از 100 سال خواهند داشت که هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد (Abbas et al., 2016; Li et al., 2023).

علاوه بر موارد یاد شده استفاده از UHPC در سازه‌ها با توجه به نیاز به عمل‌آوری بخار برای رسیدن به خواص مقاومتی و دوام مناسب به صورت پیش‌ساخته تهیه خواهند شد که سبب کاهش نیروی کار مورد نیاز و افزایش سرعت اجرای پروژه‌ها به میزان قابل توجهی گشته و در هزینه‌ها از این طریق صرفه‌جویی خواهد شد (Kim, 2018). همچنین، استفاده از این مصالح خود نقش محافظتی داشته و در برخی موارد ممکن است نیازی به اجرای سازه‌ی محافظتی اضافی در اطراف سازه‌ی اصلی نباشد (Ning et al., 2023).

در حالی که چالش‌ها باقی مانده‌اند، تحقیقات مستمر و تجربیات میدانی به گسترش نقش UHPC در سازه‌های مقاوم در برابر ضربه ادامه می‌دهند. بخش پایانی یافته‌های کلیدی را خلاصه کرده و جهت‌هایی برای تحقیقات آینده در این زمینه را معرفی می‌کند.

8 ـ بحث و نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی UHPC تحت شرایط ضربه‌ای همچنان حوزه‌ای فعال و در حال تحول است. این بخش پایانی شکاف‌های کلیدی دانش را معرفی و جهت‌گیری‌های پژوهشی را شناسایی کرده و در عین حال، نتیجه‌گیری‌های اصلی از ادبیات موجود را خلاصه می‌کند.

8 ـ 1 ـ نیازهای پژوهشی کلیدی

چندین حوزه نیاز به بررسی بیشتر برای درک بهتر و پیشبرد کاربری UHPC برای مقاومت در برابر ضربه دارند.

1 ـ عملکرد چندضربه‌ای: اکثر مطالعات به بررسی تأثیرات پرتابه‌های منفرد می‌پردازند، اما سازه‌های محافظتی در شرایط تهدید اغلب با ضربات متعدد مواجه هستند. بنابراین، تحقیقات در مورد تجمع آسیب و ظرفیت باقیمانده پس از ضربه‌ی اولیه مورد نیاز است.

2 ـ دوام بلندمدت پس از ضربه: در حالی که دوام UHPC تحت شرایط ایستا به خوبی اثبات شده است، عملکرد آن پس از آسیب ناشی از ضربه، به ویژه در محیط‌های تهاجمی، نیاز به مطالعه‌ی بیشتری دارد.

3 ـ سیستم‌های الیاف هیبریدی: ترکیبات بهینه‌ی انواع مختلف الیاف از نظر جنس (فولادی، پلیمری، بازالتی، پارچه و ...)، هندسه (صاف، قلابدار، پیچانده و ...) و محتوا (درصد حجمی) برای سناریوهای تهدید خاص نیاز به انجام بررسی و تحلیل بیشتر دارد.

4 ـ توسعه‌ی پایدار: فرمولاسیون‌های پایدار UHPC با استفاده از محصولات جانبی معادن و صنایع یا مواد بازیافتی (شیشه، لاستیک، سنگدانه و ...) می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد در حالی که مقاومت در برابر ضربه حفظ شود. همچنین، تحقیق بر روی جایگزینی سیمان با مواد دیگری که ردپای کربن را کاهش داده می‌تواند سبب پذیرش عمومی این مواد در آینده شود.

5 ـ آزمایش‌های استاندارد: توسعه‌ی پروتکل‌های آزمایش ضربه‌ی یکنواخت امکان مقایسه‌ی بهتر بین مطالعات انجام گرفته و مواد با ترکیبات متفاوت را فراهم می‌کند.

6 ـ داده‌های عملکرد میدانی: مطالعات موردی بیشتر در دنیای واقعی بر اساس پرتابه‌های گوناگون و نظارت بلندمدت بر سازه‌های محافظتی UHPC می‌تواند یافته‌های آزمایشگاهی را تأیید و پایگاه داده‌ی مناسبی جهت کالیبراسیون روش‌های عددی تامین نماید..

7 ـ تکنیک‌های تعمیر: روش‌هایی برای بازسازی سازه‌های UHPC آسیب‌دیده‌ی ناشی از ضربه به ویژه برای سیستم‌های مرکب نیاز به توسعه دارد. همچنین، بایستی مطالعاتی بر روی روش‌هایی برای رفع مشکل در شرایطی که اجرا دچار مشکل شده و اشکالاتی در عملکرد سازه وجود داشته باشد، انجام گیرد.

8 ـ شرایط بارگذاری شدید: سازه‌های حساس که تحت خطر امنیتی و نظامی قرار می‌گیرند به طور معمول ممکن است قبل از وقوع برخورد تحت بارهای شدید (قرارگیری در معرض آتش، فعالیت لرزه‌ای، تصادم و ...) قرار گیرند که این حوزه‌ای بسیار مهم بوده و مطالعاتی بر روی آن صورت نگرفته است.

9 ـ توسعه‌ی مواد پیشرفته: انجام تحقیقات در زمینه‌ی استفاده از نانو مواد که ریزساختار بتن را اصلاح نموده و خواص مکانیکی آن را می‌تواند بهبود ببخشد. همچنین، استفاده از الیاف با آلیاژهای حافظه‌دار که خواص خودترمیمی در بتن ایجاد می‌کنند می‌تواند برای سازه‌های در معرض آسیب و محیط‌های مهاجم اهمیت بالایی داشته باشد.

8 ـ 2 ـ نتیجه‌گیری‌های اصلی

بر اساس مرور جامع ادبیات موجود، چندین نتیجه‌گیری کلیدی در مورد UHPC تحت شرایط ضربه‌ای می‌توان انجام داد:

1 ـ UHPC به طور مداوم در سناریوهای ضربه‌ای بهتر از بتن معمولی عمل می‌کند و قطر دهانه‌های کوچکتر، عمق نفوذ کاهش‌یافته و حداقل آسیب پراکندگی را نشان می‌دهد.

2 ـ الیاف فولادی، به ویژه با محتوای حجمی 2%، UHPC را از ماده‌ای با رفتار مکانیکی شکننده به کامپوزیتی شکل‌پذیر با ظرفیت جذب انرژی استثنایی تبدیل می‌کند. استفاده از پوشش برنج در این الیاف نیز پیوستگی ماده‌ی زمینه ـ الیاف را بهبود می‌بخشد.

3 ـ مقاومت در برابر ضربه را می‌توان از طریق انتخاب دقیق نوع و هندسه الیاف، سختی و اندازه سنگدانه و ترکیب چسباننده تنظیم کرد. استفاده از سنگدانه با سختی بافت کریستالی بیشتر جهت ایجاد آسیب در پرتابه، الیاف هیبریدی کوتاه و بلند برای کنترل ترک‌های ریز و درشت و میزان سیمان مناسب جهت افزایش مقاومت بیشینه می‌تواند مشخصات نفوذ پرتابه را به حداقل برساند.

4 ـ سیستم‌های مرکب شامل سرامیک، گرانیت، فولاد و ... در ترکیب با UHPC می‌تواند خواص بهتری را در مقابله با ضربه ارائه نماید.

5 ـ روش‌های تجربی در تعیین عمق نفوذ پرتابه‌ها برای UHPC دقت کافی نداشته و نیاز است تا برای تخمین عمق نفوذ پرتابه از روش‌های عددی پیشرفته شامل اجزا محدود و یا روش‌های یادگیری ماشین مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی و تجربی استفاده نمود.

6 ـ مواردی از قبیل هزینه‌ی اولیه‌ی بالا در مقایسه با بتن معمولی، عدم وجود آیین‌نامه‌های طراحی

توسعه‌یافته و تجربه‌ی محدود پیمانکاران در اجرا در حال حاضر پذیرش گسترده‌ی UHPC را با وجود مزایای عملکردی بسیار بیشتر در برابر ضربه، محدود نموده است.

7 ـ در نظر گرفتن اقتصاد پروژه بایستی با توجه به کل هزینه‌های چرخه‌ی حیات شامل هزینه‌های ساخت، اجرا، تعمیر و نگهداری و تعمیرات احتمالی در طول عمر سازه تعیین شده و در نهایت نقش محافظتی حیاتی UHPC نیز در پروژه در نظر گرفته شود.

همانطور که تحقیقات به رفع شکاف‌های دانش فعلی و چالش‌های پیاده‌سازی ادامه می‌دهد، UHPC آماده است تا نقش مهم‌تری در سازه‌های محافظتی در سراسر جهان ایفا کند. ترکیب منحصر به فرد استحکام، دوام و مقاومت استثنایی آن در برابر ضربه، فرصت‌های بی‌نظیری برای افزایش تاب‌آوری سازه‌ها در برابر بارهای دینامیکی عمدی (برخورد پرتابه، انفجار و ...) و تصادفی (زلزله، باد، تصادم و ...) ارائه می‌دهد.

9 ـ منابع

Abbas, S., Nehdi, M. L., & Saleem, M. A. (2016). Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges. International Journal of Concrete Structures and Materials, 10(3), 271-295. https://doi.org/10.1007/s40069-016-0157-4

ACI239R-18. (2018). Ultra-high-performance Concrete: An Emerging Technology Report (ACI 239R-18).

Aldred, J. M., Holland, T. C., Morgan, D. R., Roy, D. M., Bury, M. A., Hooton, R. D., Olek, J., Scali, M. J., Detwiler, R. J., & Jaber, T. M. (2006). Guide for the use of silica fume in concrete.

Benjamin, A. G. (2006). Material property characterization of ultra-high performance concrete (NO. FHWA-HRT-06-103) (NO. FHWA-HRT-06-103).

C1240-20, A. (2020). Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures. In C1240-20: ASTM International.

Cao, Y. Y. Y., Li, P. P., Brouwers, H. J. H., & Yu, Q. L. (2020). Resistance of multi-layered UHPFRC against in-service projectile: Experimental investigation and modelling prediction. Composite Structures, 244. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112295

Chen, Q., Zhu, Z., Ma, R., Jiang, Z., Zhang, Y., & Zhu, H. (2021). Insight into the Mechanical Performance of the UHPC Repaired Cementitious Composite System after Exposure to High Temperatures. Materials (Basel), 14(15). https://doi.org/10.3390/ma14154095

Chi, K., Li, J., Shao, R., & Wu, C. (2025). Experimental study on dynamic characterisation of ultra-high performance concrete (UHPC) after cryogenic freeze-thaw cycles. Cement and Concrete Composites, 160. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.106011

Christ, R., Pacheco, F., Ehrenbring, H. Z., Lopes, R. K., Tutikian, B. F., & Funke, G. B. N. (2023). Effect of type of mixer on rheological and mechanical behavior of ultra high-performance concrete. Structural Concrete, 24(3), 4276-4285. https://doi.org/10.1002/suco.202200258

Das, N., Darshan, B., & Nanthagopalan, P. (2024). Ballistic impact: predicting penetration depth in ultra-high-performance concrete targets. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, 177(4), 215-232. https://doi.org/10.1680/jcoma.23.00006

Das, N., & Nanthagopalan, P. (2024). Ballistic impact resistance of ultra-high-performance concrete (UHPC): A comprehensive experimental investigation and parametric analysis. International Journal of Impact Engineering, 187. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104912

Das, N., Ramagiri, B., & Nanthagopalan, P. (2023). Elucidation of Static Fracture Energy and Dynamic Tensile Performance of Hybrid Steel Fiber-Based Ultrahigh-Performance Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 35(9). https://doi.org/10.1061/jmcee7.Mteng-15614

Dehghanpour, H., Subasi, S., Guntepe, S., Emiroglu, M., & Marasli, M. (2022). Investigation of fracture mechanics, physical and dynamic properties of UHPCs containing PVA, glass and steel fibers. Construction and Building Materials, 328. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127079

DIN13263-1:2009. (2009). Silica fume for concrete - Part 1: Definitions, requirements and conformity criteria. In 13263-1:2009. Berlin, Germany: Beuth Verlag.

El Helou, R. G. (2016). Multiscale computational framework for analysis and design of ultra-high performance concrete structural components and systems.

Eriksson, V. (2019). Design of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete Bridges: A Comparative Study to Conventional Concrete Bridges Luleå University of Technology].

Fehling, E., Bunje, K., & Leutbecher, T. (2004, 2004). Design relevant properties of hardened ultra high performance concrete.

Graybeal, B. A. (2019). Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections (No: FHWA-HRT-19-011). In.

Haruna, S. I., Ibrahim, Y. E., Hassan, I. H., Al-Shawafi, A., & Zhu, H. (2024). Bond Strength Assessment of Normal Strength Concrete-Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concrete Using Repeated Drop-Weight Impact Test: Experimental and Machine Learning Technique. Materials (Basel), 17(12). https://doi.org/10.3390/ma17123032

He, H., Zhi, X., Fan, F., Song, Y., & Zhang, R. (2024). Strain-rate-dependent performance of alkali-activated binder-based ultra-high strength concrete. Journal of Building Engineering, 94. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109911

Hosseini, M., & Dalvand, A. (2015). Neural Network Approach for Estimation of Penetration Depth in Concrete Targets by Ogive-nose Steel Projectiles. Latin American Journal of Solids and Structures, 12(3), 492-506. https://doi.org/10.1590/1679-78251200

Kang, S. H., Lee, J. H., Hong, S. G., & Moon, J. (2017). Microstructural Investigation of Heat-Treated Ultra-High Performance Concrete for Optimum Production. Materials (Basel), 10(9). https://doi.org/10.3390/ma10091106

Kennedy, R. P. (1976). A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. Nuclear Engineering and Design, 37(2), 183-203. https://doi.org/10.1016/0029-5493(76)90015-7

Khan, M., Javed, M. F., Othman, N. A., Ur Rehman, S. K., & Ahmad, F. (2025). Predicting penetration depth in ultra-high-performance concrete targets under ballistic impact: An interpretable machine learning approach augmented by deep generative adversarial network. Results in Engineering, 25. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103909

Kim, M.-J., Kim, S., Lee, S.-K., Kim, J.-H., Lee, K., & Yoo, D.-Y. (2017). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at cryogenic temperatures. Construction and Building Materials, 157, 498-508. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.099

Kim, S., Hwang, H.-J., & Kang, T. H. K. (2021). Behavior of High-Strength and Ultrahigh-Performance Concrete Targets Subjected to Relatively Rigid Projectile Impact. Journal of Structural Engineering, 147(10). https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0003129

Kim, Y. J. (2018). Development of Cost-Effective Ultra-High Performance Concrete (UHPC) for Colorado's Sustainable Infrastructure (CDOT-2018-15).

Lai, J., Yang, H., Wang, H., Zheng, X., & Wang, Q. (2018). Properties and Modeling of Ultra-High-Performance Concrete Subjected to Multiple Bullet Impacts. Journal

of Materials in Civil Engineering, 30(10), 04018256. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002462

Li, J., & Deng, Z. (2021). Tensile Behavior of Hybrid Fiber-Reinforced Ultra-High-Performance Concrete. Frontiers in Materials, 8. https://doi.org/10.3389/fmats.2021.769579

Li, P. P., Brouwers, H. J. H., & Yu, Q. (2020). Influence of key design parameters of ultra-high performance fibre reinforced concrete on in-service bullet resistance. International Journal of Impact Engineering, 136, 103434. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103434

Li, P. P., Sluijsmans, M. J. C., Brouwers, H. J. H., & Yu, Q. L. (2020). Functionally graded ultra-high performance cementitious composite with enhanced impact properties. Composites Part B: Engineering, 183. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107680

Li, Q. M., Reid, S. R., Wen, H. M., & Telford, A. R. (2005). Local impact effects of hard missiles on concrete targets. International Journal of Impact Engineering, 32(1-4), 224-284. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.04.005

Li, Y., Zhang, G., Yang, J., Zhang, J., & Ding, Q. (2023). A review on damage mechanism of ultra-high performance concrete under loading and erosion. Materials Today Communications, 35. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106258

Lv, J., Ren, Z., & Huang, J. (2023). High-speed impact performance of a high-performance concrete with functionally gradient structure designs. Mechanics of Time-Dependent Materials, 27(2), 559-581. https://doi.org/10.1007/s11043-023-09606-y

Maten, R. N. t. (2011). Ultra high performance concrete in large span shell structures Delft University of Technology].

Matiushin, E., Sizyakov, I., Shvetsova, V., & Soloviev, V. (2024). The Properties and Behavior of Ultra-High-Performance Concrete: The Effects of Aggregate Volume Content and Particle Size. Buildings, 14(9). https://doi.org/10.3390/buildings14092891

Mina, A., Petrou, M., & Trezos, K. (2021). Resistance of an Optimized Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete to Projectile Impact. Buildings, 11(2), 63. https://doi.org/10.3390/buildings11020063

Moman, A. A., Sundar, D., Zeng, K., Tatar, J., Radlińska, A., & Rajabipour, F. (2025). Autogenous and drying shrinkage in Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) and the effectiveness of internal curing. Construction and Building Materials, 464. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140217

Ning, H., Ren, H., Wang, W., & Nie, X. (2023). Impact Resistance of Ultra-High-Performance Concrete Composite Structures. Materials (Basel), 16(23). https://doi.org/10.3390/ma16237456

Park, G.-K., Lee, M., Lee, N., Park, G.-J., & Kim, S.-W. (2023). Dynamic structural responses of high-performance fiber-reinforced cement composites panels subjected to high-velocity projectile impact loadings. Composite Structures, 306. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116581

Pathania, A., & Shukla, A. (2017). Development of Ultra High Strength Concrete Using Puntke Method of Particle Packing

Peng, Y., Wu, H., Fang, Q., Liu, J. Z., & Gong, Z. M. (2016). Impact resistance of basalt aggregated UHP-SFRC/fabric composite panel against small caliber arm.

International Journal of Impact Engineering, 88, 201-213. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.10.011

Rajput, A., Iqbal, M. A., & Gupta, N. K. (2018). Ballistic performances of concrete targets subjected to long projectile impact. Thin-Walled Structures, 126, 171-181. https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.01.021

Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. Cement and concrete research, 25(7), 1501-1511.

Russell, H. G., Graybeal, B. A., & Russell, H. G. (2013). Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community (No. FHWA-HRT-13-060).

Shi, C., Wu, Z., & Banthia, N. (2024). Ultra-High Performance Concrete: Design, Performance, and Application. CRC Press.

Sohail, M. G., Kahraman, R., Al Nuaimi, N., Gencturk, B., & Alnahhal, W. (2021). Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes. Journal of Building Engineering, 33. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101669

Sovják, R., Vavřiník, T., Zatloukal, J., Máca, P., Mičunek, T., & Frydrýn, M. (2015). Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets. International Journal of Impact Engineering, 76, 166-177. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.10.002

Sumitomo, G. S., Pimentel, L. L., Jacintho, A., & Forti, N. C. S. (2024). Study of Ultra-High Performance Concrete Mechanical Behavior under High Temperatures. Materials (Basel), 17(17). https://doi.org/10.3390/ma17174212

Tabrizikahou, A., Kuczma, M., Czaderski, C., & Shahverdi, M. (2024). From experimental testing to computational modeling: A review of shape memory alloy fiber-reinforced concrete composites. Composites Part B: Engineering, 281. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111530

Teng, L., Meng, W., & Khayat, K. H. (2020). Rheology control of ultra-high-performance concrete made with different fiber contents. Cement and concrete research, 138. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106222

Wang, X. Q., Chow, C. L., & Lau, D. (2024). Multiscale perspectives for advancing sustainability in fiber reinforced ultra-high performance concrete. npj Materials Sustainability, 2(1). https://doi.org/10.1038/s44296-024-00021-z

Wei, J., Li, J., Wu, C., Liu, Z.-x., & Li, J. (2021). Hybrid fibre reinforced ultra-high performance concrete beams under static and impact loads. Engineering Structures, 245. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112921

Wille, K., & Naaman, A. (2013). Effect of Ultra-High-Performance Concrete on Pullout Behavior of High-Strength Brass-Coated Straight Steel Fibers. ACI Materials Journal, 110, 451-461.

Wu, H., Fang, Q., Chen, X. W., Gong, Z. M., & Liu, J. Z. (2015). Projectile penetration of ultra-high performance cement based composites at 510–1320m/s. Construction and Building Materials, 74, 188-200. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.041

Wu, H., Fang, Q., Gong, J., Liu, J. Z., Zhang, J. H., & Gong, Z. M. (2015). Projectile impact resistance of corundum aggregated UHP-SFRC. International Journal of Impact Engineering, 84, 38-53. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.05.007

Wu, Z., Shi, C., He, W., & Wang, D. (2017). Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements.

Cement and Concrete Composites, 79, 148-157. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.010

Yang, S., Tang, Z., Zhong, W., Wang, S., Zhang, R., & Yao, X. (2022). Effects of steel fibers on the dynamic properties and failure process of ultra-high performance concrete. Journal of Building Engineering, 62. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105415

Zhai, Y. X., Wu, H., & Fang, Q. (2021). Impact resistance of armor steel/ceramic/UHPC layered composite targets against 30CrMnSiNi2A steel projectiles. International Journal of Impact Engineering, 154. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103888

Zhang, F., Poh, L. H., & Zhang, M.-H. (2020). Critical parameters for the penetration depth in cement-based materials subjected to small caliber non-deformable projectile impact. International Journal of Impact Engineering, 137. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103471

Zhang, L., Shan, J., Miao, C., Fan, C., Wang, P., & Xu, S. (2021). The cratering performance of concrete target under true triaxial confinements. International Journal of Mechanical Sciences, 210. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106714

Zhang, Y., Ju, J. W., Chen, Q., Yan, Z., Zhu, H., & Jiang, Z. (2020). Characterizing and analyzing the residual interfacial behavior of steel fibers embedded into cement-based matrices after exposure to high temperatures. Composites Part B: Engineering, 191. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107933

Zhao, G., Li, X., Xu, Y., & Xia, K. (2022). A modified triaxial split Hopkinson pressure bar (SHPB) system for quantifying the dynamic compressive response of porous rocks subjected to coupled hydraulic-mechanical loading. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 8(1). https://doi.org/10.1007/s40948-021-00335-5