

مرور جامع و تحلیل سیستم‌های هیبریدی بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا (UHPC):

از خواص مکانیکی تا کاربردهای سازه‌ای ترکیبی و طرح اختلاط بهینه در تولید کارگاهی و

پیش‌ساخته

مصطفی احمدی

دانشجوی دکتری تخصصی عمران - گرایش مدیریت ساخت

چکیده

بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا (Ultra-High Performance Concrete: UHPC) یکی از پیشرفته‌ترین دستاوردهای مهندسی مواد سیمانی در دهه‌های اخیر است که با اتکا به ریزساختار بسیار متراکم، نسبت آب به مواد سیمانی بسیار پایین، استفاده از فوق‌روان‌کننده‌های نسل جدید و تسلیح الیافی، توانسته است مرزهای متعارف مقاومت، دوام و شکل‌پذیری را جابه‌جا کند. این بتن معمولاً دارای مقاومت فشاری بیش از ۱۵۰ مگاپاسکال، دوام بسیار بالا در برابر نفوذ یون کلرید و چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب و رفتار مناسب پس از ترک‌خوردگی است. در پژوهش حاضر، با رویکردی مروری-تحلیلی، یافته‌های حاصل از ۱۰ منبع علمی منتخب شامل مطالعات مرجع در حوزه خواص مکانیکی، دوام، ریزساختار، طرح اختلاط، بهینه‌سازی چیدمان ذرات، کاربردهای مقاوم‌سازی و سامانه‌های سازه‌ای هیبریدی بررسی و یکپارچه‌سازی شده است. تمرکز اصلی مقاله بر چهار محور است:

(۱) تبیین مبانی نظری و مکانیزم‌های ریزساختاری UHPC

(۲) ارائه چارچوب طرح اختلاط بهینه با تفکیک شرایط تولید کارگاهی/بچینگ پلنت محلی و تولید صنعتی/پیش‌ساخته

(۳) تحلیل ظرفیت‌های سازه‌ای هیبریدی شامل سیستم‌های NC-UHPC، Steel-UHPC و Timber-UHPC

(۴) بررسی امکان بومی‌سازی این فناوری در ایران با تأکید بر ظرفیت‌های معدنی و صنعتی استان کرمان

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که بهینه‌سازی چگالی چیدمان ذرات بر اساس مدل‌های بسته‌بندی، استفاده از مواد پوزولانی بسیار ریزدانه نظیر دوده سیلیسی و کنترل دقیق نسبت آب به بایندر عوامل اصلی در دستیابی به مقاومت‌های بسیار بالا و دوام ممتاز هستند. همچنین، استفاده هدفمند از UHPC در سیستم‌های هیبریدی، راهبردی مؤثر برای بهره‌برداری اقتصادی از قابلیت‌های این ماده در پروژه‌های عمرانی است. در نهایت، مقاله حاضر با ارائه جمع‌بندی فنی و بومی، می‌تواند مبنایی برای توسعه تحقیق، طراحی و کاربرد اجرایی UHPC در پروژه‌های زیرساختی و ساختمانی کشور باشد.

واژه‌های کلیدی: بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا، UHPC، چیدمان ذرات، طرح اختلاط، سیستم‌های هیبریدی، دوام، پیش‌ساخته، بومی‌سازی.

۱. مقدمه

بتن به عنوان پرکاربردترین مصالح ساختمانی جهان، علی‌رغم مزایای فراوان، همواره با محدودیت‌هایی نظیر مقاومت کششی پایین، گسترش سریع ترک، تخلخل موئینه و آسیب‌پذیری در برابر عوامل مخرب محیطی روبه‌رو بوده است. همین نارسایی‌ها سبب شد که طی چند دهه گذشته، روند توسعه بتن‌های با مقاومت بالا (HSC)، بتن‌های با عملکرد بالا (HPC) و در نهایت بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا (UHPC) شتاب گیرد. UHPC به‌طور کلی به خانواده‌ای از مواد سیمانی اطلاق می‌شود که علاوه بر مقاومت فشاری بسیار زیاد، دارای ریزساختار فشرده، نفوذپذیری بسیار اندک، و در بسیاری از موارد، ظرفیت کششی و خمشی بهبود یافته به واسطه الیاف هستند. (Wang et al., 2019; Ultra-High-Performance Concrete, 2014)

مطالعات مروری نشان داده‌اند که UHPC معمولاً با حذف سنگدانه‌های درشت، کنترل دقیق دانه‌بندی اجزای پودری، استفاده از نسبت آب به بایندر بسیار پایین، و افزودن الیاف فولادی یا در برخی موارد الیاف کربنی تولید می‌شود. (Reda et al., 1999; Wang et al., 2019) چنین ساختاری سبب می‌شود مقاومت فشاری این ماده در محدوده‌ای حدود ۱۵۰ تا ۲۵۰ مگاپاسکال قرار گیرد و مقاومت کششی مستقیم و خمشی آن نیز نسبت به بتن معمولی جهش معناداری داشته باشد. (Ultra-High-Performance Concrete, 2014) افزون بر آن، دوام استثنایی در برابر کلرید، سیکل‌های یخ‌زدگی-ذوب و حملات محیطی، UHPC را به گزینه‌ای ممتاز برای سازه‌های دریایی، پل‌ها، قطعات پیش‌ساخته، اعضای تحت سایش و سامانه‌های مقاوم‌سازی تبدیل کرده است. (Alkaysi et al., 2016; Xue et al., 2020).

در سال‌های اخیر، رویکرد استفاده از UHPC در کل مقطع سازه، به دلیل هزینه بالای مواد اولیه و حساسیت زیاد فرایند تولید، جای خود را تا حدی به کاربردهای موضعی و هیبریدی داده است. در این رویکرد، از UHPC فقط در نواحی بحرانی سازه، لایه‌های رویه، ناحیه کششی، اتصالات، دک‌ها یا تقویت موضعی استفاده می‌شود و سایر بخش‌ها با مصالح متعارف‌تری مانند بتن معمولی، فولاد یا چوب ساخته می‌شوند. این راهبرد می‌تواند ضمن کنترل اقتصادی پروژه، مزایای عملکردی UHPC را نیز حفظ کند. (Zhu et al., 2020; Farzad et al., 2019; Xue et al., 2020)

از سوی دیگر، توسعه پایدار و کاهش ردپای کربن نیز به یکی از محورهای مهم پژوهش در UHPC تبدیل شده است. برخی مطالعات نشان داده‌اند که با جایگزینی بخشی از سیمان با موادی مانند خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی و پودر سنگ‌آهک، می‌توان مخلوط‌هایی با عملکرد مناسب و اثرات زیست‌محیطی کمتر طراحی کرد، مشروط بر آنکه بسته‌بندی ذرات و واکنش‌پذیری سامانه به‌درستی کنترل شود. (Yu et al., 20۱۵)

با توجه به ظرفیت‌های معدنی و صنعتی ایران، به‌ویژه در استان کرمان، امکان تولید بومی برخی اجزای تشکیل‌دهنده UHPC وجود دارد. از این‌رو، مقاله حاضر در پی آن است که با تلفیق داده‌های علمی استخراج‌شده از منابع معتبر، تصویری جامع، کاربردی و قابل استفاده برای جامعه مهندسی و پژوهشی کشور ارائه کند.

۲. مبانی نظری و مکانیزم‌های ریزساختاری UHPC

۲-۱. مفهوم عملکرد فوق‌العاده بالا

عملکرد فوق‌العاده در UHPC تنها به مقاومت فشاری بالا محدود نیست، بلکه مجموعه‌ای از ویژگی‌ها شامل تراکم ریزساختاری، نفوذپذیری بسیار پایین، مقاومت سایشی بالا و در صورت استفاده از الیاف، رفتار مناسب پس از ترک‌خوردگی را دربرمی‌گیرد. بر اساس مرورهای موجود، UHPC حاصل یک طراحی چندمقیاسی است که در آن از مقیاس نانو و میکرو برای بهبود ساختار خمیر سیمان تا مقیاس ماکرو برای کنترل ترک و انتقال تنش از طریق الیاف استفاده می‌شود. (Wang et al., ۲۰۱۹)

۲-۲. تئوری چیدمان فشرده ذرات

یکی از مبانی اساسی در طراحی UHPC، بهینه‌سازی چگالی چیدمان ذرات است. در این رویکرد، توزیع اندازه ذرات به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که فضاهای خالی بین ذرات بزرگ‌تر، با ذرات ریزتر پر شود و نیاز به آب آزاد کاهش یابد. مدل اصلاح‌شده آندریاسن و اندرسن، یکی از شناخته‌شده‌ترین مدل‌ها برای این منظور است و در طراحی مخلوط‌های UHPC و E-UHPC به‌کار رفته است. (Yu et al., ۲۰۱۵) رابطه کلی این مدل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P(d) = \{d^q - d_{\min}^q\} / \{d_{\max}^q - d_{\min}^q\}$$

که در آن $P(d)$ درصد تجمعی ذرات کوچک‌تر از قطر (d) ، و (q) ضریب توزیع است. برای مخلوط‌های با سهم زیاد ذرات ریز، مقدار (q) معمولاً در بازه‌ای حدود ۰.۲۳ تا ۰.۲۸ انتخاب می‌شود. مطالعات مبتنی بر D-optimal design نیز نشان داده‌اند که بهینه‌سازی هم‌زمان مقادیر سیمان، دوده سیلیسی، فیلر معدنی و ماسه سیلیسی می‌تواند چگالی بسته‌بندی را افزایش داده و در نتیجه مقاومت فشاری و کارایی مخلوط را ارتقا دهد. (Bajaber & Hakeem, ۲۰۲۱)

۲-۳. نقش دوده سیلیسی و واکنش پوزولانی

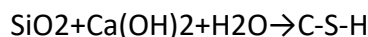
دوده سیلیسی به دلیل اندازه بسیار کوچک ذرات و سطح ویژه بالا، دو نقش مهم در UHPC دارد:

۱. پر کردن حفرات ریز و بهبود فیزیکی ساختار

۲. واکنش پوزولانی با هیدروکسید کلسیم و تولید ژل C-S-H ثانویه

این پدیده موجب کاهش فازهای ضعیف، متراکم شدن ناحیه انتقال بین‌سطحی (ITZ) و ارتقای مقاومت و دوام می‌شود. (Wang et al., ۲۰۱۹)

واکنش کلی پوزولانی را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:



۲-۴. نسبت آب به بایندر و نقش فوق‌روان‌کننده

در UHPC نسبت آب به مواد سیمانی معمولاً بسیار پایین و در حدود ۰.۱۴ تا ۰.۲۰ است. چنین نسبت کمی موجب افزایش تراکم و کاهش تخلخل موئینه می‌شود، اما در عین حال روانی مخلوط را با چالش جدی مواجه می‌کند. از این‌رو، استفاده از فوق‌روان‌کننده‌های پلی‌کربوکسیلات اتر (PCE) برای ایجاد پراکندگی ذرات سیمان و جلوگیری از کلوخه‌شدن، کاملاً ضروری است. (Wang et al., ۲۰۱۹; Bajaber & Hakeem, ۲۰۲۱)

۲-۵. نقش الیاف در رفتار کششی و خمشی

یکی از تفاوت‌های اساسی UHPC با بتن‌های متعارف، حضور الیاف با مقاومت بالا در ماتریس متراکم است. این الیاف، به‌ویژه الیاف فولادی مستقیم یا قلاب‌دار، با مهار گسترش ترک و انتقال تنش پس از ترک‌خوردگی، موجب افزایش مقاومت کششی، مقاومت خمشی و انرژی شکست می‌شوند. مطالعات اولیه نیز نشان داده‌اند که استفاده از الیاف کربنی می‌تواند مقاومت‌های بسیار بالا در سنن اولیه ایجاد کند. (Reda et al., ۱۹۹۹) در سامانه‌های امروزی، الیاف فولادی بیشترین کاربرد را دارند و رفتار شبه‌چقرمه و گاه سخت‌شوندگی کرنشی را فراهم می‌کنند. (Ultra-High-Performance Concrete, ۲۰۱۴)

۳. روش پژوهش

این پژوهش از نوع مروری-تحلیلی است و بر پایه ادغام ساختارمند یافته‌های استخراج‌شده از ۱۰ منبع علمی منتخب انجام شده است. منابع بررسی‌شده شامل مطالعات مروری، آزمایشگاهی، طرح اختلاط، دوام، تقویت سازه‌ای، کاربرد در پل‌ها و سیستم‌های هیبریدی هستند. رویکرد تحلیل در این مقاله بر چهار محور استوار بوده است:

۱. استخراج مفاهیم بنیادین UHPC شامل ریزساختار، هیدراسیون، دوام و مکانیزم‌های تقویت الیافی
 ۲. مقایسه و جمع‌بندی طرح‌های اختلاط با تمرکز بر تفاوت‌های تولید کارگاهی و صنعتی
 ۳. تحلیل کاربردهای سازه‌ای و هیبریدی در اعضای بتن‌آرمه، پل‌ها و سامانه‌های مرکب
 ۴. ارائه چارچوب بومی‌سازی با توجه به زنجیره تأمین و ظرفیت‌های صنعتی ایران
- در تنظیم متن نهایی، تلاش شده است ساختار و زبان مقاله منطبق با الگوی مقالات علمی-پژوهشی و کنفرانسی فارسی باشد و در عین حال، از منظر فنی و تخصصی نیز برای جامعه مهندسی بتن قابل اتکا باشد.

۴. طرح اختلاط و راهبردهای تولید UHPC

۴-۱. ملاحظات عمومی طرح اختلاط

طراحی UHPC برخلاف بتن معمولی، صرفاً بر نسبت آب به سیمان مبتنی نیست، بلکه تابع هم‌زمانی از چگالی بسته‌بندی ذرات، واکنش‌پذیری بایندر، دوز فوق‌روان‌کننده، نوع عمل‌آوری و مقدار الیاف است. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از روش D-optimal design در انتخاب نسبت اجزای پودری، روشی کارآمد برای رسیدن به مخلوطی با مقاومت بالا و تراکم مناسب است. (Bajaber & Hakeem, ۲۰۲۱) همچنین در مطالعه مشابه (Abbas M. L. Nehdi, ۲۰۱۹) نیز تأکید شده است که packing density بالا، نقش تعیین‌کننده در مقاومت فشاری و یکنواختی مخلوط دارد.

۴-۲. چارچوب پیشنهادی برای تولید کارگاهی

در شرایط کارگاهی، دسترسی به اتاق بخار، کنترل دقیق دما، تجهیزات فوق‌پیشرفته اختلاط و پایش صنعتی معمولاً محدود است. از این‌رو، طرح اختلاط کارگاهی باید با وجود حفظ کیفیت، از نظر اجرایی نیز واقع‌بینانه باشد. یک چارچوب پیشنهادی برای تولید کارگاهی می‌تواند شامل اجزای زیر باشد:

- سیمان پرتلند پرمقاومت: حدود ۷۵۰ تا ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب

- دوده سیلیسی: حدود ۱۴۰ تا ۱۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب

- فیلر معدنی یا پودر سنگ‌آهک/کوارتز: حدود ۱۲۰ تا ۱۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب

- ماسه سیلیسی ریزدانه: حدود ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب

- آب: حدود ۱۴۵ تا ۱۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب

- فوق‌روان‌کننده PCE: متناسب با کارایی موردنیاز، حدود ۲.۵ تا ۴ درصد وزن بایندر

- الیاف فولادی: حدود ۱ تا ۱.۵ درصد حجمی

چنین طرحی در صورت کنترل صحیح اختلاط و عمل‌آوری مرطوب، قابلیت دستیابی به مقاومت فشاری بالا را بدون الزام به فرایندهای پیچیده صنعتی دارد.

۴-۳. چارچوب پیشنهادی برای تولید صنعتی و پیش‌ساخته

در واحدهای پیش‌ساخته، به دلیل دسترسی به سیستم‌های دقیق توزین، میکسرهای توان‌بالا، اتاق بخار و کنترل فرآیند، امکان طراحی مخلوط‌های متراکم‌تر و پرمقاومت‌تر وجود دارد. در این حالت می‌توان از:

- عیار سیمان بالاتر

- دوده سیلیسی و پودر کوارتز ریزتر

- نسبت آب به بایندر کمتر

- الیاف بیشتر

- عمل‌آوری حرارتی کنترل شده

استفاده کرد. برخی مطالعات گزارش کرده‌اند که با این رویکرد و عمل‌آوری مناسب، مقاومت‌های فشاری بسیار بالا، حتی در محدوده بیش از ۱۸۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال، قابل دستیابی است. (Reda et al., ۱۹۹۹; Bajaber & Hakeem, ۲۰۲۱)

۴-۴. UHPC دوستدار محیط زیست

یکی از محورهای مهم توسعه UHPC، کاهش مصرف سیمان و کاهش اثرات زیست‌محیطی آن است. Yu و همکاران نشان دادند که با بهره‌گیری از مدل بسته‌بندی ذرات و جایگزینی بخشی از سیمان با خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBS) و پودر سنگ‌آهک، می‌توان مخلوط‌هایی با عملکرد مناسب و انتشار CO₂ کمتر توسعه داد. بر اساس یافته‌های گزارش شده، مخلوط‌های حاوی GGBS عملکرد متعادلی از نظر مقاومت و پایداری زیست‌محیطی ارائه داده‌اند. (Yu et al., ۲۰۱۵)

۵. خواص مکانیکی UHPC

۵-۱. مقاومت فشاری

مقاومت فشاری UHPC تابعی از چگالی بسته‌بندی، کیفیت خمیر سیمان، عمل‌آوری و نوع الیاف است. در منابع مروری، دامنه‌ای حدود ۱۵۰ تا ۲۵۰ مگاپاسکال برای این بتن گزارش شده است (Ultra-High-Performance Concrete, ۲۰۱۴). برخی پژوهش‌ها نیز به مقاومت‌های حدود ۲۴۰ مگاپاسکال در سنین پایین و تحت شرایط عمل‌آوری خاص اشاره کرده‌اند (Reda et al., ۱۹۹۹).

مطالعه Bajaber & Hakeem (۲۰۲۱) نشان می‌دهد که با طراحی آماری و بهینه‌سازی چگالی ذرات، رشد مقاومت اولیه و نهایی بسیار قابل توجه است و ساختار متراکم حاصل، نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به مقاومت‌های بالا دارد.

۵-۲. مقاومت کششی و خمشی

بر خلاف بتن معمولی که پس از ایجاد ترک، افت شدید مقاومت را تجربه می‌کند، UHPC مسلح به الیاف رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. در این بتن، پس از ترک اول، انتقال تنش به الیاف صورت گرفته و در صورت کافی بودن چسبندگی و طول مهاری، ترک‌های متعدد ریز ایجاد می‌شود. این رفتار سبب افزایش مقاومت خمشی و انرژی جذب‌شده تا شکست می‌شود. (Wang et al., ۲۰۱۹).

در برخی مرورها، مقاومت کششی مستقیم UHPC در حدود ۱۰ تا ۲۰ مگاپاسکال و مقاومت خمشی در حدود ۱۵ تا ۴۰ مگاپاسکال گزارش شده است که بسته به مقدار و نوع الیاف، نوع ماتریس و شرایط بارگذاری متغیر است. (Concrete, ۲۰۱۴)

۵-۳. اثر عمل‌آوری

عمل‌آوری حرارتی یکی از عوامل کلیدی در افزایش مقاومت و تسریع واکنش‌های هیدراسیون و پوزولانی در UHPC است. مطالعات اولیه نشان داده‌اند که عمل‌آوری با آب داغ یا بخار می‌تواند منجر به رشد چشمگیر مقاومت فشاری شود. (Reda et al., ۱۹۹۹) در عین حال، از منظر اجرایی، در پروژه‌های کارگاهی، توسعه مخلوط‌هایی که بدون نیاز به عمل‌آوری حرارتی شدید نیز عملکرد مطلوبی داشته باشند، اهمیت فراوان دارد.

۶. دوام UHPC

۶-۱. نفوذپذیری بسیار پایین

یکی از مهم‌ترین مزایای UHPC، مقاومت آن در برابر نفوذ عوامل مخرب است. ریزساختار متراکم و نبود مسیرهای پیوسته موئینه، نفوذ آب، یون کلرید و گازها را به شدت محدود می‌کند. Alkaysi و همکاران گزارش کرده‌اند که عملکرد UHPC در برابر نفوذ کلرید بسیار مطلوب بوده و بار عبوری در آزمون‌های الکتریکی، در رده بسیار ناچیز قرار می‌گیرد. (Alkaysi et al., ۲۰۱۶)

۶-۲. مقاومت در برابر یخ‌زدگی-ذوب

نتایج گزارش‌شده از مطالعه (Alkaysi et al., ۲۰۱۶) نشان می‌دهد که UHPC حتی در برابر سیکل‌های مکرر یخ‌زدگی-ذوب نیز عملکرد بسیار مناسبی دارد و افت محسوس در خواص دینامیکی یا جرم نمونه مشاهده نمی‌شود. علت اصلی این رفتار، تراکم زیاد و فقدان آب آزاد مؤثر در شبکه موئینه است.

۶-۳. دوام به عنوان مزیت راهبردی در زیرساخت‌ها

با توجه به هزینه اولیه بالاتر UHPC، دوام فوق‌العاده آن می‌تواند از طریق کاهش هزینه‌های نگهداری، ترمیم و توقف بهره‌برداری، توجیه اقتصادی مناسبی ایجاد کند. این موضوع به‌ویژه در پل‌ها، عرشه‌ها، قطعات پیش‌ساخته و محیط‌های حاوی کلرید یا سایش شدید اهمیت بیشتری دارد. (Xue et al., ۲۰۲۰).

۷. کاربردهای سازه‌ای و سیستم‌های هیبریدی

۷-۱. UHPC در پل‌ها و زیرساخت‌های حمل‌ونقل

مطالعه Xue و همکاران نشان می‌دهد که UHPC در اجزای مختلف پل نظیر دک، تیر، لینک‌اسلب، ستون و نواحی اتصال، ظرفیت قابل توجهی برای افزایش دوام، کاهش ابعاد مقطع و افزایش عمر بهره‌برداری دارد. با این حال، هزینه و پیچیدگی تولید، کاربرد آن را به سمت استفاده هدفمند و موضعی سوق داده است. (Xue et al., ۲۰۲۰)

۲-۷. تقویت خمشی اعضای بتن آرمه

Zhu و همکاران به بررسی کاربرد UHPC در تقویت خمشی تیرها و دال‌های بتن آرمه پرداخته‌اند. نتایج مرور آن‌ها نشان می‌دهد که لایه‌های UHPC می‌توانند ظرفیت خمشی، سختی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی اعضای RC را به‌طور معناداری افزایش دهند. این موضوع به‌ویژه در مقاوم‌سازی سازه‌های موجود، پل‌ها و دال‌های فرسوده اهمیت دارد. (Zhu et al., ۲۰۲۰)

۳-۷. سیستم هیبریدی بتن معمولی-UHPC

در این سامانه، بخش اصلی عضو از بتن معمولی ساخته می‌شود و UHPC تنها در نواحی بحرانی مانند رویه، ناحیه کششی، لایه مقاوم‌سازی یا سطح در معرض خوردگی و سایش به‌کار می‌رود. مزیت اصلی این راهبرد، بهره‌گیری از عملکرد ممتاز UHPC با کنترل هزینه است.

Farzad و همکاران در مطالعه خود بر پیوستگی بین بتن معمولی و لایه UHPC تأکید کرده‌اند و نشان داده‌اند که آماده‌سازی مناسب سطح، شرایط عمل‌آوری و کیفیت فصل مشترک، در رفتار مرکب و مقاومت چسبندگی نقش تعیین‌کننده دارد. (Farzad et al., ۲۰۱۹)

۴-۷. سیستم هیبریدی فولاد-UHPC

در عرشه‌های فولادی اورتوتروپیک و برخی سازه‌های مرکب، استفاده از لایه نازک UHPC بر روی صفحات فولادی می‌تواند سختی موضعی را افزایش داده، پاسخ خستگی را بهبود بخشد و وزن مرده سیستم را نسبت به راه‌حل‌های سنتی کاهش دهد. (Wang et al., ۲۰۱۹; Xue et al., ۲۰۲۰)

۵-۷. سیستم هیبریدی چوب-UHPC

در سازه‌های پایدار و نوین، ترکیب اعضای چوبی با لایه‌های UHPC نیز به‌عنوان یک رویکرد نوظهور مطرح شده است. در این سامانه، UHPC می‌تواند نقش دال فشاری یا لایه مقاوم را ایفا کند و از طریق اتصال مناسب، سختی و ظرفیت خمشی عضو مرکب را افزایش دهد. هرچند این حوزه نسبت به بتن و فولاد کمتر توسعه یافته، اما از منظر مهندسی پایدار و کاهش تغییرشکل‌های بلندمدت، قابل توجه است.

۸. بومی‌سازی فناوری UHPC در ایران با تأکید بر استان کرمان

۸-۱. ظرفیت‌های مواد اولیه

برای توسعه UHPC در ایران، شناخت و بهره‌برداری از منابع داخلی اهمیت بنیادی دارد. استان کرمان با برخورداری از منابع معدنی، صنایع فولاد، معادن سیلیس و ظرفیت فراآوری مواد معدنی، می‌تواند بخشی از زنجیره تأمین UHPC را پشتیبانی کند. تأمین ماسه سیلیسی با دانه‌بندی کنترل‌شده، پودر سنگ‌آهک میکرونیزه، و حتی برخی مواد جایگزین سیمان از جمله ظرفیت‌های مهم این منطقه است.

۸-۲. امکان استفاده از مواد مکمل سیمانی

با توجه به نتایج (Yu et al. ۲۰۱۵)، جایگزینی بخشی از سیمان با موادی نظیر سرباره و پودر سنگ‌آهک می‌تواند برای توسعه مخلوط‌های اقتصادی‌تر و پایدارتر در ایران نیز مورد توجه قرار گیرد. این موضوع در شرایطی که هزینه سیمان و ردپای کربنی ساخت‌وساز اهمیت فزاینده‌ای یافته، از منظر سیاست‌گذاری صنعتی نیز معنادار است.

۸-۳. چالش‌های اجرایی

مهم‌ترین چالش‌ها در مسیر توسعه UHPC در کشور عبارت‌اند از:

- قیمت نسبتاً بالای الیاف فولادی با کیفیت مناسب
- محدودیت دانش فنی اجرایی در کارگاه‌ها
- نبود دستورالعمل‌ها و آیین‌نامه‌های بومی برای طراحی و کنترل کیفیت
- حساسیت بالای مخلوط به خطاهای اجرایی و تغییرات مواد

۸-۴. راهبردهای پیشنهادی

برای غلبه بر چالش‌ها، پیشنهاد می‌شود:

۱. تولید آزمایشی و نیمه‌صنعتی UHPC در مقیاس منطقه‌ای توسعه یابد
۲. مطالعات دانشگاهی و صنعتی بر مبنای مواد اولیه داخلی انجام شود
۳. دستورالعمل‌های اجرایی و کنترل کیفیت بومی تدوین گردد
۴. از UHPC ابتدا در کاربردهای موضعی، ترمیمی و قطعات پیش‌ساخته با ارزش افزوده بالا استفاده شود

۹. نتیجه‌گیری

بر پایه جمع‌بندی یافته‌های ۱۰ منبع علمی بررسی شده، می‌توان نتایج زیر را ارائه کرد:

۱. UHPC یک ماده سیمانی پیشرفته با عملکرد چندبعدی است که نه تنها از نظر مقاومت فشاری، بلکه از منظر دوام، ریزساختار، مقاومت کششی و ظرفیت کاربرد در سامانه‌های مرکب، برتری معناداری نسبت به بتن‌های متعارف دارد.

۲. بهینه‌سازی چیدمان ذرات با استفاده از مدل‌هایی نظیر آندریاسن و اندرسن اصلاح شده و روش‌های آماری مانند D-optimal design، یکی از مؤثرترین راهکارها برای دستیابی به مخلوط‌های متراکم و پرمقاومت است. (Bajaber & Hakeem, ۲۰۲۱; Yu et al., ۲۰۱۵; file-۲۰۱۵.pdf)

۳. دوده سیلیسی، فوق‌روان‌کننده‌های PCE و الیاف فولادی سه رکن کلیدی در عملکرد UHPC هستند؛ این اجزا به ترتیب موجب تراکم ریزساختار، تأمین کارایی در نسبت آب پایین، و بهبود رفتار پس از ترک خوردگی می‌شوند. (Wang et al., ۲۰۱۹; Ultra-High-Performance Concrete, ۲۰۱۴)

۴. دوام UHPC در برابر نفوذ کلرید و چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب بسیار ممتاز است و این ویژگی، کاربرد آن را در زیرساخت‌ها، پل‌ها و محیط‌های مهاجم توجیه‌پذیر می‌سازد. (Alkaysi et al., ۲۰۱۶; Xue et al., ۲۰۲۰)

۵. کاربرد هیبریدی UHPC در ترکیب با بتن معمولی، فولاد و چوب، راهبردی اقتصادی و مهندسی برای استفاده هدفمند از این ماده است. در این میان، کیفیت فصل مشترک و پیوستگی بین مصالح، عامل کلیدی عملکرد سامانه مرکب است. (Farzad et al., ۲۰۱۹; Zhu et al., ۲۰۲۰)

۶. توسعه UHPC دوستدار محیط‌زیست با کاهش مصرف سیمان و استفاده از مواد مکمل سیمانی، مسیر ضروری آینده این فناوری است و قابلیت انطباق با شرایط صنعتی ایران را دارد. (Yu et al., ۲۰۱۵)

۷. استان کرمان و به‌طور کلی ایران از منظر منابع معدنی و صنعتی، ظرفیت مناسبی برای حرکت به سمت بومی‌سازی تدریجی UHPC دارند؛ با این حال، تحقق این هدف مستلزم پژوهش کاربردی، تولید آزمایشی، تدوین ضوابط اجرایی و سرمایه‌گذاری در زنجیره تأمین است.

منابع

- Alkaysi, M., El-Tawil, S., Liu, Z., & Hansen, W. (۲۰۱۶). Effects of silica fume and cement type on the durability and mechanical properties of ultra-high performance concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, ۱۲۰, ۱۷۲– ۱۸۲.
- Bajaber, M. A., & Hakeem, I. Y. (۲۰۲۱). UHPC mixture optimization using D-optimal design methodology for maximizing packing density and strength. *Journal of Building Engineering*, ۴۳, ۱۰۳۱۴۰.
- Farzad, M., et al. (۲۰۱۹). Study on bond strength between normal concrete substrate and UHPC overlay .
- Reda, M. M., et al. (۱۹۹۹). Ultra-high strength concrete with micro carbon fibers .
- Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). (۲۰۱۴). Review/report on mechanical properties, durability and mixture characteristics .
- Wang, D., Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Huang, Z., & Fang, Z. (۲۰۱۹). A review on ultra-high performance concrete (UHPC): Part II. Hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials*, ۲۲۴, ۵۱۵– ۵۲۹.
- Xue, J., Briseghella, B., Huang, F., Nuti, C., Tabatabai, H., & Chen, B. (۲۰۲۰). Review of ultra-high performance concrete in bridge engineering. *Construction and Building Materials* .
- Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (۲۰۱۵). Development of an eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC) with efficient particle packing optimization .
- Zhu, Y., et al. (۲۰۲۰). Review on flexural strengthening of reinforced concrete members using UHPC .
- S. Abbas^{۱)}, M. L. Nehdi^{۲)}, and M. A. Saleem^{۱)} Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges.