



بتن با کارایی بالا و بسیار بالا و کاربرد آنها در روسازی بتنی

مهدی اکبری^{1*}، بهرنگ روحانی²، حسام صباغیان²

1- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

خلاصه

بتن با کارایی بالا به عنوان یک ماده اختلاطی که در آن یک یا چند ویژگی خاص از طریق انتخاب دقیق مصالح و با نسبتبندی اجزاء آن، بهبود یافته است. بتن با کارایی بالا در زمره بتن‌های با نسبت آب به سیمان کم شناخته می‌شود. اگر چه اجزاء اساسی بتن با کارایی بالا با بتن‌های معمولی یکسان است اما به گونهای اصلاح می‌شود که منجر به یک مخلوط بتنی سخت با ریزساختار خیلی متراکم و دارای حفرات ریز می‌شود. این دو ویژگی منجر به ایجاد خصوصیتی متفاوت از لحاظ مقاومت مکانیکی، دوام بتن و جمعشدهگی بتن می‌شود که در نتیجه، بتن با کارایی بالا را تبدیل به ماده‌ای کاملاً متفاوت با بتن معمولی میکند. ریزساختار بسیار متراکم بتن با کارایی بالا از ورود رطوبت و نمکهای خورنده به بتن به شدت میکاهد؛ در نتیجه، بتن با کارایی بالا قادر به تحمل بارگذاریهای بیشتر می‌شود و در محیطهای خورنده بادوامتر است. با این وجود، معمولاً در طی فرآیند عملآوری بتنهای با نسبت آب به سیمان کم یا بتن دارای فوم سیلیکا، جمعشدهگی رخ میدهد و سپس جمعشدهگی شیمیایی رخ میدهد. کاهش حجم میکروسکوپی بتن سختشده ناشی از هیدراتاسیون سیمان، حرکت رطوبت از محیط خارجی، تغییر دما یا کرناسیون می‌باشد و به عنوان جمعشدهگی خودکار در بتن با کارایی بالا شناخته می‌شود. مطالعات بیانگر آن است که جمعشدهگی خودکار بتن با کارایی بالا، یکی از مهم ترین خصوصیات است که باید برای کنترل ترک مورد توجه باشد. همین امر بر اهمیت زمانبندی و درجه عملآوری بتن با کارایی بالا تأکید میکند. در این مقاله نکاتی در مورد کاربرد بتن با کارایی بالا در روسازی راهها و تأثیرات استفاده از مواد افزودنی مختلف به منظور کاهش سر و صدای ناشی از ترافیک و همچنین اطلاعاتی در خصوص کاربرد روسازی صلب با کارایی بالا در خطوط ویژه اتوبوس بیان شده است. به علاوه، مقایسه‌های بین روسازی بتن مسلح در زردار با کارایی بالا و بتن مسلح با الیاف فولادی با کارایی بالا صورت گرفته است.

کلمات کلیدی: بتن با کارایی بالا، روسازی بتنی، کاهش آلودگی صوتی، روسازی بتن مسلح

1. مقدمه

بتن به عنوان یک مصالح ساختمانی به طور گسترده در کشورهای جهان استفاده می‌شود. بتن معمولی که بر اساس مقاومت فشاری طبقه‌بندی می‌شود، بسیاری از نیازهای عملکردی را برآورده نمیکند زیرا با توجه به شرایط محیطی، زمان ساخت، کمبود انرژی، ظرفیت جذب

^{1*} Corresponding author

Email: akbari@semnan.ac.ir

سبزوار

انرژی، تعمیر و مقاومسازی و مواردی از این دست، دوام آن کاهش پیدا میکند اما بتن با کارایی بالا از نظر موارد فوق‌الذکر بسیار برتر از بتن معمولی است. با این حال، برای تولید چنین محصولی ممکن است روشهای و ابزارهای برای طرح اختلاط، اجرا و عملآوری مورد نیاز باشد. هرگاه عملکرد کلی بتن به طور قابلتوجهی بالاتر از بتن معمولی باشد، میتوان آن را در زمره بتنهای با کارایی بالا در نظر گرفت. به دلیل استحکام، دوام و مدول الاستیسیته بالای بتن با کارایی بالا، همواره میتواند به عنوان گزینه اول در ساخت روسازی تونلها، پلها و سازه‌های مرتفع در نظر گرفته شود. تمرکز روی استفاده از بتن با کارایی بالا بسیار زیاد شده است و از آن در توسعه زیرساختها، ساختمانها، سازههای صنعتی، سازههای هیدرولیکی، پلها و روسازی بزرگراهها بهره گرفته میشود. استفاده از بتن با کارایی بالا بر ویژگیهای محدود بتن مسلح معمولی در طراحی و ساخت غلبه کرده است.

امروزه در اکثر نقاط دنیا تحول عظیمی در تکنولوژی بتن برای دستیابی به بتنهای با مقاومت بالا پدید آمده است. گسترش در تغییر و تحول حملونقل بدون در نظر گرفتن نوع و مقاومت روسازی باعث تخریب راه میشود که در نتیجه، باید مقاومت روسازی را افزایش داد. مهمترین مشکلات روسازی بتنی را میتوان ترکخوردگی در سطح بتن و انحنای دال و همچنین سایش روسازی بر اثر عبور ترافیک نام برد. معمولاً به منظور افزایش باربری روسازی بتنی، ضخامت را افزایش می‌دهند. دالهای بتنی با توجه به ضخامت زیاد از سختی زیادی برخوردار میشوند که در اثر تغییرات دما در طی روز و با توجه به شدت تغییرات دمایی، ممکن است تحت تنشهای پیچشی و کششی قرار گیرند. کاربرد بتن با مقاومت بالا در راهسازی میتواند در کاهش ضخامت، افزایش 2 تا 3 برابری قدرت باربری و کاهش تنشهای فوق موثر باشد.

2. طبقه بندی انواع بتن

طبقه‌بندی مناسب بتن با توجه به سطوح مختلف الزامات عملکرد، مهندسان طراح را قادر می‌سازد معیارهای عملکردی مناسبی را برای کاربردهای مختلف و در شرایط محیطی مختلف انتخاب کنند. طبقه‌بندی انواع بتن به شرح زیر است [1]:

- بر اساس قدرت مشخصه، این طبقه‌بندی بر اساس استحکام مشخصه 28 روزه بتن و به شرح زیر است:
 - بتن معمولی: بتن با مقاومت فشاری 28 روزه در محدوده 10 تا 20 مگاپاسکال
 - بتن استاندارد: بتن با مقاومت فشاری 28 روزه در محدوده 25 تا 55 مگاپاسکال
 - بتن با کارایی بالا: بتن با مقاومت فشاری 28 روزه در محدوده 60 تا 100 مگاپاسکال
 - بتن با کارایی بسیار بالا: بتن با مقاومت فشاری 28 روزه در محدوده 100 تا 150 مگاپاسکال
 - بتن استثنایی: بتن با مقاومت فشاری 28 روزه بیش از 150 مگاپاسکال
- بر اساس دوام و قدرت هدف SHRP¹ بتن با کارایی بالا را به چهار دسته تفکیک کرده است
 - حداکثر نسبت آب به سیمان برابر 35/0
 - حداقل ضریب دوام 80 درصد
 - معیار حداقل قدرت

¹ Strategic Highway Research Program



3. مواد مصرفی در بتن با کارایی بالا

مواد و مصالح مصرفی در بتن با کارایی بالا شامل انواع آب، سیمان، سنگدانه و مواد افزودنی میشود.

3-1. سیمان

اولین انتخابی که هنگام ساخت بتن با کارایی بالا باید انجام شود، قطعاً سیمان است، حتی اگر از یک یا دو ماده سیمانی مکمل نیز استفاده شود. زیرا عملکرد سیمان از نظر رئولوژی و استحکام به عنوان قدرت جامع هدفمند تبدیل به یک موضوع مهم میشود. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان نقش مهمی در افزایش قدرت و کنترل رئولوژی بتن تازه ایفا میکند.

سیمان مصرفی در بتن با کارایی بالا باید تا حد امکان دارای کمی ترکیبات آلومینات (C3A) باشد زیرا هرچه این مقدار پایینتر باشد، کنترل رئولوژی بتن آسانتر شده و مشکلات سازگاری سیمان کمتر میشود. همچنین سیمان باید حاوی مقدار مناسبی اکسید گوگرد (SO3) باشد تا بتواند شکلگیری سریع را کنترل کند. در نهایت، سیمان باید حاوی مقداری تری-کربناتگوگرد (C3S) نیز باشد.

3-2. سنگدانه

در بتن با کارایی بالا، اندازه، شکل، بافت سطح، کانیشناسی و پاکیزگی سنگدانهها نیاز به توجه ویژه دارد. برای هر مورد از سطح مقاومت بتن، منحنی دانهبندی بهینه وجود دارد که مقاومت فشاری معینی را به همراه خواهد داشت. بسیاری از مطالعات نشان دادهاند که سنگدانههای اسمی 9.5 میلیمتر تا 12.5 میلیمتر حداکثر مقاومت بهینه را میدهد. در بتنهای با کارایی بالا، استحکام سنگدانه به خودی خود و پیوند بین خمیر و مصالح، به یک عامل مهم تبدیل میشود. آزمایشات نشان دادهاند که سنگدانههای درشتدانه باعث افزایش مقاومت فشاری در بتن نسبت به سنگدانههای ماسهای با استفاده از کل اندازه مشابه و محتوای مواد سیمانی یکسان میشوند. این احتمالاً به دلیل پیوند کلی خمیر با مصالح تیز گوشه و خرد شده است [2].

3-3. مواد افزودنی

مواد افزودنی مادهای غیر از سیمان، آب و سنگدانهها است بلافاصله قبل یا هنگام اختلاط بتن به آن اضافه میشود. از مواد افزودنی برای اصلاح خصوصیات بتن استفاده می-شود تا شرایطان بهبود یابد. پیشبینی تاثیر و نتیجه استفاده از مواد افزودنی کار دشواری است زیرا بسیاری از اوقات تغییر در نام تجاری سیمان، درجهبندی کل و نسبت اختلاط باعث تغییر در خاصیت بتن میشود.

ترکیباتی مانند خاکستر بادی، سیلیس یا سرباره اغلب در تولید بتن با کارایی بالا ضروری است. با استفاده از سیمان به تنهایی نمیتوان به استحکام مطلوب رسید. این ترکیبات معمولاً با میزان 2 تا 5 درصد و حتی بیشتر به سیمانی اضافه میشوند. البته برخی از طرح اختلاطها استفاده از دوده سیلیسی تا 10 درصد را مجاز میدانند مگر اینکه شواهدی در دسترس باشد که نشان دهد بتن تولیدی با درصد بالاتر دوده سیلیسی نیز از مقاومت، دوام و پایداری قابلقبولی برخوردار است. نسبت آب به سیمان باید طوری تنظیم شود که کارایی محصول نهایی برابر با نتایج مخلوطهای آزمایشی شود.



4. ویژگیهای بتن با مقاومت بالا (HPC)¹

بتن با کارایی بالا همان بتنی است که به منظور ارائه ویژگیهای بهینه عملکرد برای مجموعهای از شرایط بارگذاری و شرایط محیطی، مطابق با هزینه، عمر خدمات و دوام طراحی شده است. تخلخل بسیار کم بتن با کارایی بالا موجب نفوذپذیری بسیار کم مخلوط، مقاومت بالا در برابر حمله شیمیایی، حرارت هیدراتاسیون کم، مقاومت اولیه بالا و کارایی بالا میشود. بتن با مقاومت بالا به عنوان بتنی با مقاومت فشاری در حدود 50 مگاپاسکال تعریف میشود. اخیراً بتنهایی با مقاومت فشاری بیشتر از 200 مگاپاسکال حاصل شده است. چنین بتنی به عنوان بتن با مقاومت فوقالعاده بالا تعریف میشود. به طور کلی، افزودن مواد افزودنی فقط باعث افزایش مقاومت بتن نمیشود، بلکه جنبههای عملکرد دیگری مانند شکلپذیری و دوام نیز بهبود مییابد.

با تغییر ترکیب بتن از طریق افزودن الیاف در طرح اختلاط، قابلیت انعطافپذیری بتن بهبود مییابد. بتن تقویتشده با فیبر (FRC) از جمله بتنهای با مقاومت بالا محسوب میشود. FRC معمولی که با افزودن الیاف در بتن معمولی ساخته شده است، فقط افزایش انعطاف-پذیری را نشان میدهد در حالی که FRC با کارایی بالا که با افزودن الیاف در بتن با کارایی بالا ساخته شده است، مقاومت فشاری قابلتوجهی را نشان میدهد که منجر به بهبود زیادتر قدرت و جقرمگی میشود. از بتن FRC با کارایی بالا به عنوان بتن فوقالعاده انعطافپذیر نیز یاد میشود.

با توجه به ویژگی دوام بتن با کارایی بالا و برای افزایش دوام، لازم است در طراحی آن، سه معیار در نظر گرفته شود که عبارتند از:

- معیار مقاومت تضمین میکند که بتن بدون شکست میتواند در برابر تنشها مقاومت کند.

- معیار نفوذپذیری تضمین میکند که بتن دارای سرعت نفوذ جریان محدود است تا آسیدپذیری در برابر حمله یونی آب و شیمیایی در طول دوره خدمتدهی به حداقل برسد.

- معیار مقاومت در برابر ترکخوردگی اطمینان میدهد که بتن به دلیل شرایط محیطی مانند انقباض حرارتی و رطوبت، حداقل توانایی مقاومت در برابر ترک-خوردگی را دارد.

نفوذپذیری بتن عامل مهمی است که بر دوام بتن تأثیر میگذارد. نفوذپذیری بتن به نفوذپذیری مصالح و آرایش هندسی آنها بستگی دارد. نفوذپذیری خمیر سیمان در درجه اول به ساختار منافذ مربوط میشود که شامل تخلخل، اندازه منافذ و اتصال میباشد. در حالی که ساختار منافذ تابعی از نسبت آب به سیمان و میزان هیدراتاسیون است.

به طور کلی، با استفاده از بتن با نسبت مقاومت بالا و وزن کم، عملکرد دوام بهتری حاصل خواهد شد. اگرچه در این روش طراحی مبتنی بر استحکام بوده و نتیجه آن از دوام بهتری برخوردار است اما بهتر است با بهینهسازی پارامترهای حساسی مانند اندازه سنگدانه-های مصرفی، به کارایی بالا یعنی ماندگاری پرداخته شود.

دو روش برای دستیابی به دوام از طریق تکنیک های مختلف به شرح زیر است:

- روش اول شامل کاهش سیستم منافذ موبرگی میشود به گونهای که امکان حرکت سیال وجود نداشته باشد. تحقق این کار بسیار دشوار است و تمام بتن-ها دارای منافذ در همتیهای هستند.
- روش دوم شامل ایجاد مکانهای اتصال شیمیایی فعال میشود که از انتقال یون-های تهاجمی مانند کلریدها جلوگیری میکند.

¹ High performance Concrete (HPC)



5. ویژگیهای بتن با مقاومت بسیار بالا (UHPC)¹

UHPC در درجه اول با ریزساختار متراکم و مقاومت فشاری بالاتر از 150 مگاپاسکال مشخص می‌شود. اکثر مخلوط‌های UHPC دارای اصول مشترک هستند. یکی از اصول شناخته شده برای رسیدن به استحکام فشاری بالاتر کاهش نسبت آب / سیمان است. نسبت آب به سیمانی که به طور معمول در UHPC استفاده می‌شود در مقایسه با نسبت بتن استاندارد، ۰.۲۰ کمتر است. این مقدار بسیار کم آب در بتن منجر به ایجاد ریزساختار شده و تقریباً هیچ گونه منافذ موبرگی به وجود نمی‌آید. در مقایسه با انواع دیگر بتن، این ساختار تقریباً در برابر مایعات و گازها غیرقابل نفوذ است. در واقع، نسبت آب به سیمان به خودی خود یک عامل کاملاً مهم در افزایش مقاومت فشاری بتن است؛ با این وجود، تأثیر آن برای دستیابی به مقدار مقاومت بسیار بالای UHPC کافی نیست. افزایش مقاومت با مواد افزودنی با اندازه‌های ذرات کوچک‌تر از ۰.۱۲۵ میلی‌متر تأمین می‌شود. این مواد، شکاف بین سنگدانه را پر کرده و مقدار سطح تماس بین سنگدانه‌ها را افزایش می‌دهند [3]. محققان برای بهینه‌سازی و در نتیجه، افزایش تراکم سنگدانه‌ها ریزالگوریتم‌های ناشناخته را گسترش داده‌اند. این الگوریتم‌ها بهترین نسبت از مصالح ریزدانه به درشت‌دانه را تعیین می‌کنند. با این حال، نسبت آب به سیمان پایین و میزان بالای ریزدانه، کارایی بتن تازه را کاهش می‌دهد. افزودن فوق‌روان‌کننده‌ها با کارایی بالا، منجر به افزایش قابلیت کارایی احتمالی مخلوط UHPC می‌شود [4].

در UHPC، استفاده از فوق‌روان‌کننده‌هایی بر پایه پلی‌کربوکسیلات‌ها ضروری است. هر نوع بتن به نوع خاصی از فوق‌روان‌کننده نیاز دارد؛ در غیر این صورت، مخلوط بیش از حد سفت و یا چسبنده می‌شود. طرح اختلاط UHPC منجر به ایجاد ساختاری بسیار متراکم از مصالح می‌شود و همانطور که در بالا ذکر شد، این تراکم بالا تأثیر بسیار زیادی روی عدم نفوذپذیری بتن در برابر گازها و مایعات دارد [5].

بنابراین دوام UHPC به وضوح بیشتر از بتن معمولی است. در نتیجه تقریباً نفوذ کلرید و کربنات، می‌تواند بیش از ۵۰ درصد کاهش یابد. کاربرد این بتن در روسازی نیز شاید تنها به دلیل همین ویژگی‌های برجسته باشد. نتیجه دوام بالاتر، طول عمر طولانی سازه‌های UHPC است که می‌تواند طیف وسیعی از مزایای اقتصادی را به عنوان مثال هزینه نگهداری کم‌تر ارائه دهد.

برای دستیابی به یک رفتار انعطاف‌پذیر، میکروالیاف فولادی به مخلوط اضافه می‌شوند. این الیاف از ترک در روسازی بتنی جلوگیری می‌کنند. علاوه بر این، الیاف خرد شده فولاد دارای مقاومت کششی و خمشی هستند که باعث افزایش مقاومت بتن می‌شود [6].

6. روسازیهای بتنی

بتن با کارایی بالا و کارایی بسیار بالا به دلیل فواید بالقوه اقتصادی که ممکن است ناشی از کسب مقاومت اولیه بالا، کاهش نفوذپذیری، افزایش مقاومت در برابر سایش و افزایش دوام انجماد باشد، می‌تواند به طور فزاینده‌ای در روسازی استفاده شود. دلایل مختلفی برای استفاده از بتن با کارایی بالا و بسیار بالا به منظور تعمیرات روسازی بتنی وجود دارد. استفاده از این بتن می‌تواند با هدف تسریع در باز شدن مسیر و یا روکشی عرشه پل‌ها صورت پذیرد. مقاومت اولیه بتن با بررسی پارامترهایی مانند نسبت آب به سیمان، میزان سیمان و خصوصیات آن کنترل می‌شود. به طور معمول، یک مخلوط متشکل از آب حاوی 1 تا 2 درصد کلرید کلسیم باعث بهبود مقاومت فشاری، مقاومت در برابر سایش و کاهش زمان بازگشایی ترافیک در 45 ساعت در دمای بالاتر از 100 درجه سانتی‌گراد می‌شود.

¹ Ultra High performance Concrete (UHPC)



در حال حاضر، الزامات مورد نیاز روسازی بتنی در رابطه با انتشار صدا و همچنین مقاومت لغزندگی به میزان قابل توجهی رو به افزایش است. علاوه بر این، تنوع ترافیک و همچنین حجم بالای ترافیک منجر به توسعه زیرساخت‌های حمل و نقلی، اصلاح مخلوط‌های بتنی، اصلاح فرایندهای تولید بتن و ارائه رویکردهای جدید شده است. در عین حال، آنها باید در بسیاری از شرایط جوی از مقاومت کافی برخوردار باشند و همچنین توانایی مقاومت در برابر آسیب ناشی از ساییدگی یا هرگونه عامل شیمیایی را نیز داشته باشند. بتن استاندارد که هم اکنون برای روسازی بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرد، نتوانسته الزامات مورد نیاز برای کاهش صدا را برآورده سازد. اول از همه، دستیابی به بتنی با کیفیت بالا که در محل تولید شده باشد، مشکل است. دوم، بتن استاندارد مورد استفاده برای روسازی بتنی، نتوانسته صدای ناشی از ترافیک عبوری از روی روسازی بتنی را کاهش دهد. برای این منظور، به مواد و مصالحی با کیفیت بالا، استحکام بالا، دوام بالا و مقاوم در برابر ذوب-یخ مورد نیاز است. بتن با کارایی بسیار بالا می‌تواند به نیازهای فعلی روسازی‌های بتنی پاسخ دهد و یک رویکرد نوآورانه برای حفظ پایدار زیرساخت‌های حمل و نقلی ارائه دهد.

7. کاهش آلودگی صوتی سطوح روسازی

یک نوع شبیه‌سازی انتشار صدا برای بتن با کارایی بالا در روسازی بتنی انجام شد. این مدل با سطوح مختلف لاستیک و برای سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر در ساعت و همچنین بر اساس الگوهای مختلف ضخامت، عمق و فاصله بین شیارها یا زاویه شیارها، شبیه‌سازی شد. سطح انتخابی برای ماده متراکمی مانند UHPC شبیه‌سازی شد. امکان ایجاد چنین ساختارهایی با مقاومت بالا و دوام بالا، ترکیب کاملی برای الگوهای بافت مورد نیاز است. پارامترهایی که برای بافت UHPC انتخاب شدند در مقایسه با بتن روسازی جاده در آلمان، باعث کاهش صدا تا ۵ دسیبل گردید عمق فرورفتگی باید حدود ۲ میلی‌متر باشد تا از تأثیر زهکشی و جلوگیری از شکستگی سنگدانه بر اثر یخبندان جاده جلوگیری کند [7]. آزمایشات نشان می‌دهد که با توجه به مقدار بیشتر سیمان، حتی مخلوط UHPC با سنگدانه‌های درشت نیز سطح بسیار عالی ایجاد می‌کند [8].

8. استفاده از روسازی بتنی با کارایی بالا در خطوط ویژه اتوبوس

سیستم حمل و نقل عمومی به طور گسترده در بسیاری از شهرهای شلوغ جهان تاسیس شده است. در این شهرها، مسیرهای مخصوص اتوبوس معمولاً به منظور ارتقای بهره‌وری و کیفیت حمل و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مسیرهای ویژه و در موقعیت‌هایی که اتوبوس‌ها متوقف و دوباره شروع به حرکت می‌کنند، به خاطر ترافیک سنگین در طول ساعت اوج ترافیک، اغلب تحت تأثیر فشارهای شدیدی قرار می‌گیرند. برای افزایش عملکرد روسازی، روش‌های متعددی نظیر استفاده از روسازی بتنی و بهبود کنترل کیفیت اجرای روسازی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، توان رویه بتنی ممکن است به طور قابل توجهی در مناطق استوایی و مرطوب کاهش یابد. مطالعات گذشته نشان داده است که روسازی صلب، عمر خدمات طولانی‌تر و الزامات تعمیر و نگهداری کمتری نیاز دارند [9]. همچنین، سختی روسازی صلب نسبت به روسازی انعطاف‌پذیر بیشتر است، در حالی که حساسیت دمایی روسازی صلب نسبتاً پایین‌تر است. بنابراین، استفاده از روسازی صلب به جای روسازی انعطاف‌پذیر در ساخت مسیرهای ویژه اتوبوس ممکن است جایگزین خوبی باشد. با این حال، مطالعات گذشته نشان داده است که روسازی صلب، اغلب با صداهای ناشی از ترک‌خوردگی و تاب‌خوردن مواجه می‌شود و بنابراین هزینه نگهداری اضافی باید پرداخت شود.



9. ملاحظات طراحی روسازی صلب

به طور خلاصه، طراحی روسازی صلب باید الزامات متعددی را برآورده کند که عبارتند از [10]:

- ویژگی‌های بتن از جمله مقاومتهای خمشی و فشاری، باید تامین‌کننده میزان مقاومت لازم در برابر بارهای وارده را داشته باشد.
- هنگام ساخت روسازی صلب، ترک‌خوردگی و تابیدگی مجاز نیست. از این‌رو، در طراحی باید توجه خاصی به ارتقای پایداری بتن در برابر تاثیرات محیطی شود.
- روسازی صلب باید در آخر هفته و ایان تعطیل ساخته شود؛ بنابراین، بتن طراحی‌شده باید دارای مقاومت بالا و استحکام مناسب برای غلبه بر محدودیت‌های زمانی ساخت‌وساز باشد.

مطابق با الزامات اول و سوم، بتن با استحکام بالا و عملکرد بالا یک ضرورت در پروژه روسازی صلب می‌باشد. برای این منظور، HPC برای طراحی روسازی صلب انتخاب می‌شود؛ هرچند مطالعات گذشته نشان داد که استفاده از HPC با عملکرد بالا در ساخت روسازی صلب رضایت‌بخش است اما هنوز هم ترک‌های کمی در سطح دیده می‌شوند [11]. طبق پیشنهاد استاندارد AASHTO، مقاومت خمشی HPC مورد استفاده در ساخت روسازی بتنی با کارایی بالا باید در ۲۸ روز به ۴۰.۵۵ مگاپاسکال برسد [12]. مقاومت فشاری HPC نیز باید در محدوده ۳۶.۴ - ۴۵.۵ مگاپاسکال باشد [13]. برای دستیابی به این مقاومت‌ها در طول دوره کوتاه‌مدت سه روزه، می‌توان از الگوریتم طرح اختلاط متراکم (DMDA)¹ برای طراحی HPC استفاده کرد تا بر اساس آن‌توان به مقاومت‌فشاری ۳۵ مگاپاسکال در سه روز دستیافت. منطق طراحی DMDA این‌است که برای دستیابی به حداقل میزان‌خلاء، از خاکستر بادی برای پر کردن فضای خالیو همچنین الیاف‌فلزی و خمیر سیمان برای پر کردن بقیه خلاء استفاده کرد [14 و 15].

10. طرح اختلاط و آزمایشات

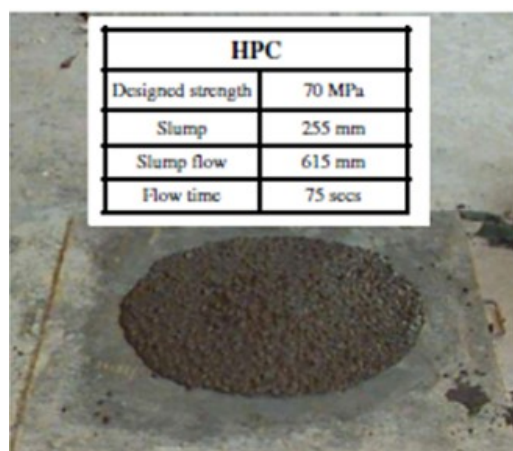
- ویژگی‌های طرح اختلاط بتن HPC را می‌توان به شرح زیر توصیف کرد:
- برای دستیابی به پایداری لازم، استفاده از نسبت آب و سیمان کمتر در ترکیب مخلوط مورد نیاز است. در این حالت نسبت آب به مصالح سنگدانه‌های کمتر از ۰.۰۶۵، مقدار آب کمتر از ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار سیمان کمتر از ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب پیشنهاد شده است [16].
 - استاندارد ACI-318-08، برای دستیابی به دوام مورد نیاز پروژه (به عنوان مثال، کاهش اثر آسیب سولفات و کربنات خروجی از آگزوز وسیله نقلیه)، نسبت آب به سیمان کمتر از ۰.۴۰ پیشنهاد کرده است [17].
 - نسبت آب به سیمان بزرگ‌تر از ۰.۴۲ برای جلوگیری از انقباض بتن در نظر گرفته می‌شود.
 - برای دستیابی به مقاومت مورد نیاز ۷۰ مگاپاسکال، افزودن مقدار زیاد مواد پوزولانی (مانند سرباره کوره ذوب‌آهن) خاکستر بادی یا فوم سیلیکا در HPC به روش DMDA یک ضرورت است. با توجه به نتایج مطالعات گذشته، اضافه کردن مواد پوزولانی می‌تواند به طور موثری مقاومت فشاری بتن را افزایش

¹ Densified Mixture Design Algorithm (DMDA)

سبزوار

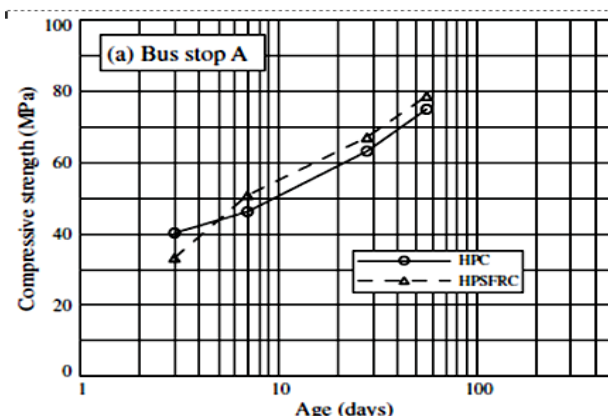
دهد. به عبارت دیگر، اضافه کردن مواد پوزولانی می‌تواند مقدار سیمان مورد نیاز را کاهش داده و در نتیجه، هزینه ساخت را کاهش دهد [18]. علاوه بر این، از دیدگاه حفاظت از محیط‌زیست و بازیافت زباله نیز با کاهش استفاده از مقدار سیمان، به طور قابل‌توجهی آلودگی هوا و دیاکسید کربن کاهش می‌یابد [19].

برای تایید این که طراحی مخلوط DMDA می‌تواند به الزامات طراحی HPC برسد، مجموعه‌ای از آزمایشات مقاومت فشاری، اسلامپ، روانی اسلامپ، زمان جاری شدن در آزمایشگاه انجام شد. اساساً، اسلامپ و روانی اسلامپ HPC بدست‌آمده در تحقیقات می‌تواند به نیاز طراحی برسد. علاوه بر این، مقاومت فشاری همه نمونه‌های HPC در روزهای ۳ و ۲۸ روز بالاتر از الزامات طراحی هستند. این نتایج در شکل ۱ ارائه شده است [10].

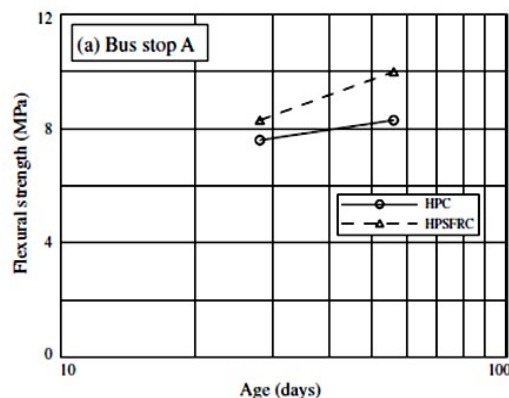


شکل ۱- نمونه‌ای از بتن با کارایی بالا (HPC)

نمودارهای شکل‌های ۲ و ۳ نشان‌دهنده افزایش مقاومت فشاری و خمشی HPC است که برای ساخت روسازی بتنی استفاده می‌شود. با توجه به الزامات طراحی، مقاومت فشاری HPC در ۳ روز باید به ۳۵ مگاپاسکال برسد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مقاومت فشاری ۳ روز HPC از ۳۵ مگاپاسکال (حدود ۳۳ مگاپاسکال) بیشتر است. استحکام فشاری ۲۸ روزه HPC نیز بیشتر از مقدار مورد نیاز ۳۶.۴-۴۵.۵ مگاپاسکال (حتی بزرگتر از ۶۰ مگاپاسکال) است، همچنین مقاومت ۵۶ روزه و مقاومت فشاری HPC بیشتر از نیاز ۷۰ مگاپاسکال است. به طور کلی، مقاومت فشاری HPC توانسته است نیاز طراحی را برآورده سازد [10].



شکل ۲ - مقاومت فشاری HPC در سنین مختلف [10]



شکل 3- استحکام خمشی HPC در سنین مختلف [10]

11. نتیجه گیری

در این مقاله، مروری بر مفهوم بتن با کارایی بالا و بسیار بالا و همچنین برخی کاربردهای آنها در روسازی بتنی اشاره گردید. اگرچه بتنهای با کارایی بالا با همان اجزای سازنده بتن معمولی ساخته میشوند، اما عملکردهای کمی و کیفی بسیار بالاتر آنها باعث شده تا بیشتر مورد توجه قرار گیرند. براساس کاربرد آنها مزایای مختلفی از جمله افزایش دوام، کاهش نفوذپذیری، مقاومت بیشتر و غیره را با صرفه اقتصادی ارائه میدهند. هدف از تولید بتن با کارایی بالا تولید کالای پرهزینه نیست بلکه صرفاً ارائه روشی برای تولید بتن است که با هزینه مناسب، بتنی با عمر خدمتدهی مطلوب و رضایتبخش تولید و اجرا شود. شکی نیست که استفاده از بتن با کارایی بالا در حال افزایش است. با این حال، چنین رشدی ایجاب میکند تولید و عملآوری چنین مخلوطی باید تحت کنترل و نظارت بسیار بالایی باشد، از جمله نظارت بر کیفیت مواد اولیه و اختلاط. بتن با کارایی بالا و بسیار بالا میتوانند نیازهای فعلی روسازی خصوصاً معابری که تحت بارگذارهای سنگین و ساکن (مانند توقفگاهها و ایستگاهها-ها) را برآورده کنند. همچنین استفاده از این بتن‌ها برای روسازی امکان دستیابی به سازه‌های بادوام و پایدار را نیز فراهم می‌کنند. در چشم‌انداز بلند مدت، روسازی بتنی ساخته‌شده از این نوع بتن‌ها از لحاظ مولفه‌های پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیستمحیطی) و مقاومت نهایی، میتوانند انتظارات طراحان، مجریان و بهره‌برداران را برآورده سازند.

12. مراجع

- [1]. Anant Kumar, Barkha Verma, Taslima Nasrin (2017), "HIGH PERFORMANCE CONCRETE & ITS APPLICATIONS IN CIVIL ENGG"INTERNAYIONAL JOURNAL OF ADVANCE RESEARCH IN SCIENCE AND ENGINEERING SEPTEMBER 2017.
- [2]. Vatsal Patel, Neeraj Shah (2013), "A Survey of High Performance Concrete Developments in Civil Engineering Fields," Open Journal of Civil Engineering.
- [3]. Fehling E, Schmidt M, Teichmann T and Bunje K (2005). "Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Betone (UHPC)". Forschungsbericht an die DFG, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 1, kassel university press, Kassel, 2005.



- [4].Geisenhanslüke,C(2002).“Herleitung eines dreidimensionalen Partikelverteilungsmodells zur Entwicklung verbesserter UHPC – Mischungen”. Universität Kassel, Diplomarbeit, Kassel, 2002.
- [5].Meng B, Fontana and P Müller, U (2007). “Nano-Gefügeanalytik als Optimierungsgrundlage für innovative Baustoffe – am Beispiel zementgebundener Baustoffe; Nanotechnologie im Bauwesen - nanooptimierte Hightech-Baustoffe” Heft 8, kassel university press, Kassel, 2007.
- [6].Altreuther B and Beckenbauer T (2013). “Verbundvorhaben "Multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultra-Hochleistungsbeton" - Teilprojekt VI: „Erarbeitung eines material- und prozessadäquaten lärmarmen Texturdesigns” Förder-Kennzeichen 13N10496 – Schlussbericht, Planegg (Müller-BBM GmbH), 2013.
- [7].Siemon Piotrowski — Benjamin Scheffler Michael Schmidt — Christian Tigges " Multi-functional noise reducing UHPC pavement made of precast elements" Universität Kassel Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie Mönchebergstraße 7 34125
- [8].Lee YJ, Zheng ZX.(1997)," Automation pave of the rigid pavement". In: Proceedings of the conference on the concrete construction automation; 1997. p. 109–37.
- [9].Mohr P, Hansen W, Jensen E, Pane I. (2000), “Transport properties of concrete pavements with excellent long-term in-service performance”. Cem Concr Res 2000;30(12):1903–1910.
- [10].Tsai, C-T., Kung G.T-C. and Hwang C-L. (2010), “Use of high performance concrete on rigid pavement construction for exclusive bus lanes”, “Construction and Building Materials”, 24, pp. 732–740.
- [11].Bognacki CJ, Marsano J, Baumann WC.(2000), “Spending concrete dollars effectively”. Concr Int 2000;22(9):50–6.
- [12].Lee ZS, Xu W, Wang NM.(1993), “The survey for the cause for pavement damage and the curing method for rigid concrete”. In: Proceedings of the seventh pavement engineering conference of the Republic of China; 1993. p. 447–57.
- [13].Lee TF, Chen JC, Juang WS.(1998), “The construction and quality control of pavement of bus runway in Taipei City”. In: Proceedings of the third national conference on pavement recycle of the Republic of China; 1998. p. 563–74.
- [14].AASHTOWare: DARWin 3.1. Guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials Washington, DC; 1993.
- [15].Mindess S, Young JF. Concrete. New York: Prentice-Hall Inc.; 1982.
- [16].Mehta PK. Concrete structure, properties, and materials. New York: Prentice- Hall; 1986.



- [17].Chang PK, Peng YN, Hwang CL.(2001), “A design consideration for durability of highperformance concrete”. Cem Concr Compos 2001;23(4-5):375–80.
- [18]Tsai CT, Li LS, Hwang CL.(2006), “The effect of aggregate gradation on engineering properties of high performance concrete”. J ASTM Int 2006;3(3).
- [19].Tsai CT, Li LS, Chang CC, Hwang CL (2009), “Durability design consideration and application of steel fiber reinforced concrete in Taiwan”. Arab J Sci Eng 2009;34(1B):57–79.