A review on Characteristics of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) and its Application in Bridge Engineering

Mohammad Shekarchi*
Professor, School of civil engineering, University of Tehran and President of Construction Material Institute (CMI)
shekarch@ut.ac.ir

Khosro Bargi
Professor, School of civil engineering, University of Tehran

Amirmahdi Rabiee
kbargi@ut.ac.ir
M.Sc. of earthquake engineering, School of civil engineering, University of Tehran
amirmahdirabiee@ut.ac.ir

Abstract
The necessity of attention to the sustainable development in civil engineering for the progress of modern societies has highlighted concrete as the most widely used construction material for researchers. In this way, Ultra High Performance Concrete (UHPC) has been highly appreciated as one of the recent inventions in the field of concrete technology. The purpose of this article is to: 1- depict outstanding properties of UHPC that make its utilization in construction, rehabilitation and strengthening projects efficient and 2- promote the application of UHPC in bridge engineering in the national scale relying on extensive domestic studies in order to localize it. Much effort has been made to present a comprehensive report on innovations and gained experiences in the field of using UHPC in the bridge industry during the last two decades and investigate the main direction of future research pointing to the key constraints of the widespread use of this material for constructing and maintaining bridges.
Keywords: *Ultra-High Performance Concrete (UHPC), Bridge Engineering, Rehabilitation and Strengthening, Mix Design*

مروری بر خصوصیات بتن فوق توانمند و کاربرد آن در مهندسی پل

دریافت مقاله: ۱۱-۰۵-۱۳۹۹
پذیرش مقاله: ۲۸-۰۷-۱۳۹۹

محمد شکرچی زاده*
استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران و رئیس انستیتو مصالح ساختمانی
shekarch@ut.ac.ir

خسرو برگی
استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران
kbargi@ut.ac.ir

امیرمهدی ربیعی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران
amirmahdirabiee@ut.ac.ir

چکیده
لزوم توجه ویژه به توسعه پایدار در رشته مهندسی عمران به منظور پیشرفت جوامع امروزی، بتن را به عنوان پرمصرف‌ترین ماده در این زمینه، مورد توجه محققین قرار داده است. در این راستا بتن فوق توانمند الیافی در جایگاه یکی از جدیدترین نوآوری‌های اخیر در عرصه تکنولوژی بتن مورد توجه ویژه قرار گرفته است. هدف نوشتار پیش رو ۱ـ آشنایی با ویژگی‌های برجسته بتن فوق توانمند که بکارگیری آن را در پروژه‌های ساخت و ساز، بهسازی و مقاوم‌سازی کارآمد می‌کند و ۲ـ ترویج استفاده از بتن فوق توانمند در مهندسی پل در عرصه ملی با تکیه بر مطالعات همه‌جانبه داخلی برای بومی‌سازی آن می‌باشد. سعی شده است که گزارشی جامع از نوآوری‌ها و تجارب حاصله در حوزه بکارگیری بتن فوق توانمند در صنعت پل طی دو دهه اخیر ارائه و ضمن اشاره به محدودیت‌های کلیدی استفاده گسترده این مصالح برای احداث و نگهداری پل‌ها، سمت و سوی اصلی تحقیقات آینده بررسی شود.

واژه‌های کلیدی: بتن فوق توانمند، مهندسی پل، بهسازی و مقاوم‌سازی، طرح اختلاط

۱ ـ مقدمه

لـزوم توجـه ویـژه بـه توسـعه پایـدار در رشـته مهندسـی عمـران بـه منظـور پیشـرفت جوامـع امـروزی، بـتن را بـه عنـوان پرمصرف‌ترین ماده در این زمینه مـورد توجـه محققـین قـرار داده اسـت. در ایـن راسـتا بـتن فـوق توانمنـد یکـی از جدیـدترین نوآوری‌ها در زمینه تکنولوژی بتن بـه شـمار مـی‌رود کـه بـر اسـاس توصـیه انجمـن مهندسـین عمـران فرانسـه مـاده‌ای اسـت بـا بدنـه سـیمانی کـه مقاومـت فشـاری بـیش از ۱۵۰ مگاپاسـکال داشـته و بـرای دارا بـودن رفتـار شـکل‌پـذیر حـاوی مقـدار کـافی الیـاف باشـد[1]. ایـده بـتن فـوق توانمنـد اولـین بـار در اوایـل دهـه ۱۹۹۰ توسـط ریچـارد[1] و شـقزی[2] مطـرح و در آزمایشـگاه بوییـگ[3] در فرانسـه تولیـد شـد [2]. در ایـن دوره ۳۰ سـاله تحقیقـات گسـترده‌ای روی ویژگـی‌هـای ایـن بـتن و تلاش کثیری برای ارزیابی عملکـرد آن در پـروژه‌هـای گونـاگون صـورت پذیرفتـه اسـت. امـروزه بـتن فـوق توانمنـد بـه شـکل محصولات پیش‌ساخته و بـتن‌هـای آمـاده و پاششـی بـا نـام تجـاری دوکتـال[4] توسـط شـرکت لفقـژ ـ اُلسـیم[5] سـوئیس تولیـد و در ۷۰ کشور دنیا عرضه می‌شود که خود گواهی بر ترویج بکارگیری آن در صنعت ساخت و ساز دنیا است.

البتـه اسـتفاده از بـتن فـوق توانمنـد بـا محـدودیت‌هـایی نیـز مواجـه اسـت. از آنجاکـه بـتن فـوق توانمنـد حـدود ۲۰ برابـر گران‌تر از بـتن معمـولی اسـت و نیازمنـد عمـل‌آوری ۴۸-۷۲ سـاعته بـا آب داغ یـا بخـار اسـت، اسـتفاده از آن بـه زیرسـازها و ساختمان‌های خـاص محـدود مـی‌شـود. از طرفـی عـدم وجـود مقـررات آیـین‌نامـه‌ای طراحـان را از بکـارگیری گسـترده بـتن فـوق توانمنـد بازداشـته اسـت. اسـترالیا [3]، فرانسـه [1] و ژاپـن [4] راهنماهـایی توسـعه داده‌انـد کـه گرچـه بـه انـدازه مقررات طراحی حالت حدی پل آمریکا [5] کامل نیستند، به التزام‌های اصلی طراحی اشاره می‌کنند [6].

در ایران نیـز پـژوهش روی بـتن فـوق توانمنـد آغـاز شـده و دانشـگاه تهـران در ایـن خصـوص پیشـگام اسـت. شـکرچی‌زاده و همکاران در سال ۱۳۸۳ روی بهینـه‌سـازی طـرح اخـتلاط و عمـل‌آوری بـتن فـوق توانمنـد بـرای دسـتیابی بـه مقاومـت ۲۰۰ الـی ۳۵۰ مگاپاسـکال [7] و پـیش‌بینـی مقاومـت فشـاری بـا اسـتفاده از سیسـتم رابـط فـازی مبتنـی بـر شـبکه انطبـاقی [8] مطالعه و نتـایج را در سـمپوزیوم بـین المللـی بـتن فـوق توانمنـد در کسـل[6] آلمـان ارائـه کردنـد. انسـتیتو مصـالح سـاختمانی دانشـگاه تهـران (CMI) مطـابق بـا جـدول ۱ بـرای بـتن فـوق توانمنـد یـک طـرح اخـتلاط بهینـه‌شـده بـا مصـالح بـومی بـه‌دسـت‌آورده اسـت. ایـن بـتن داری مقاومـت فشـاری ۱۶۵ مگاپاسـکال، وزن خصـوص ۲۴۹۶ کیلـوگرم بـر متـر مکعـب و روانی (بر اساس [9] ASTM C1437) ۱۵۵ میلی‌متر می‌باشد.

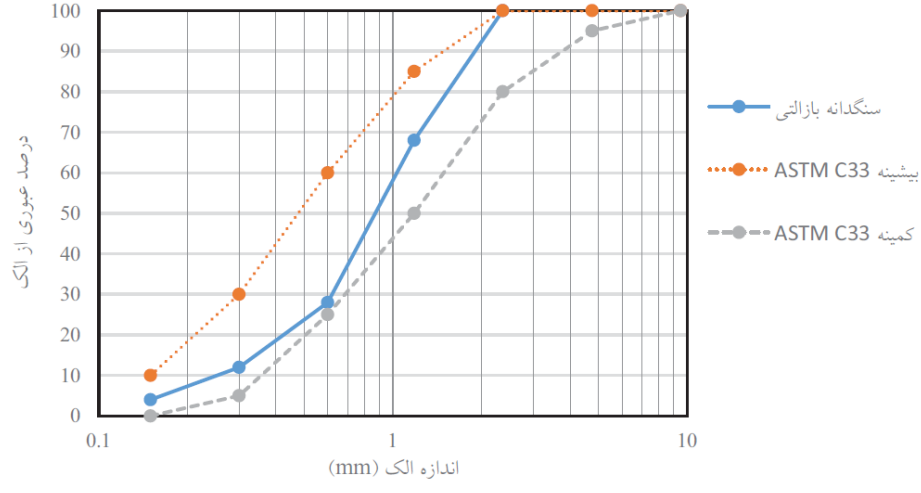
جدول ۱ ـ طرح اختلاط بهینه‌شده با مصالح بومی برای بتن فوق توانمند

جزء تشکیل‌دهنده	نوع	مقدار (کیلوگرم در مترمکعب)
سیمان	تیپ ۱-۵۲۵ محصول کارخانه شهرکرد	۹۶۰
میکروسیلیس	محصول شرکت صنایع فروآلیاژ ایران (ازنا)	۲۴۰
ماسه	سنگدانه بازالتی دلیجان با حداکثر اندازه ۲٫۴ میلی‌متر و جذب آب ۱٫۸٪	۶۷۸
الیاف فولادی	با طول ۱۳ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۷۴ محصول شرکت STRATEC	۷۸
فوق روانساز	P10N (با پایه پلی کربوکسیلات) محصول شرکت شیمی ساختمان	۳۶
آب	آب شرب	۲۰۴

Richard [1]
Cheyrezy [2]
Bouygues [3]
Ductal® [4]
LafargeHolcim [5]
Kassel [6]

در بتن فوق توانمند سیمان با جمع‌شدگی کم و نرمی متوسط ارجح است. مطابق مطالعات سیمان تیپ ۱-۵۲۵ شهرکرد با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات استاندارد ۶۰ مگاپاسکال مناسب‌ترین گزینه ارزیابی می‌شود. میکروسیلیس ـ ذرات بسیار ریز سیلیس آمورف تولیدی در کوره‌های قوس الکتریکی ـ نه تنها با انجام واکنش‌های پوزولانی و تشکیل هیدرات سیلیکات کلسیم نقش به سزایی در کسب مقاومت و یکپارچگی بتن دارد؛ بلکه با بهبود مقاومت چسبندگی بین الیاف و بتن موجب افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن فوق توانمند می‌شود. این مصالح باید خالص و دارای محتوای کربنی اندک باشد؛ زیرا کربن با جذب رطوبت مخلوط از روانی آن می‌کاهد. از این حیث، میکروسیلیس ازنا با محتوای سیلیس ۹۰-۹۵ و کربن ۰٫۸-۲ درصد وزنی مطلوب می‌باشد. ابعاد و شکل الیاف فلزی که جهت تامین شکل‌پذیری و افزایش ظرفیت کششی استفاده می‌شود، تاثیرگذارترین عامل روی روانی بتن فوق توانمند است. در این طرح اختلاط از الیاف فلزی صاف ۱۳ میلی‌متری استفاده شد. با توجه به اینکه محصول شرکت صنایع مفتولی زنجان به عنوان تنها تولیدکننده الیاف فولادی در کشور فاقد کیفیت مورد نظر است، این مصالح از آلمان وارد شد. الیاف مورد اشاره دارای مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال و مقاومت کششی ۲۵۰۰ مگاپاسکال است.

در بتن‌های عادی به دلیل ضعف باربری خمیر سیمان، ترک‌خوردگی معمولا در این ناحیه رخ می‌دهد و مقاومت فشاری سنگدانه نقش چندان تأثیرگذاری در مقاومت نهایی مخلوط ندارد. با افزایش قابل توجه مقاومت فشاری بتن، در حدود بتن فوق توانمند، امکان گسیختگی خود سنگدانه‌ها نیز وجود دارد. لذا الویت با سنگدانه‌های کوارتزی و بازالتی شکسته می‌باشد. منحنی دانه‌بندی سنگدانه مورد استفاده در طرح اختلاط پیشنهادی در شکل ۱ ارائه شده است. ضمنا فرآیند ترکیب مواد تشکیل‌دهنده در میکسر به شرح روبرو بود: الف ـ اختلاط اجزای خشک مخلوط (۳ دقیقه با سرعت کند)؛ ب ـ اضافه کردن تدریجی آب و فوق روان‌ساز (۲ دقیقه با سرعت کند)؛ ج ـ اختلاط (۲ دقیقه با سرعت متوسط) د ـ توقف و استراحت مخلوط (۲ دقیقه)؛ هـ ـ اختلاط (۲ دقیقه با سرعت متوسط)؛ و ـ اضافه کردن تدریجی الیاف فولادی (۲ دقیقه با سرعت تند)؛ ز ـ اختلاط (۲ دقیقه با سرعت تند). قابل ذکر آن که سرعت‌های کند، متوسط و تند میکسر به ترتیب ۱۰۲، ۱۸۰ و ۳۵۴ دور در دقیقه بود.



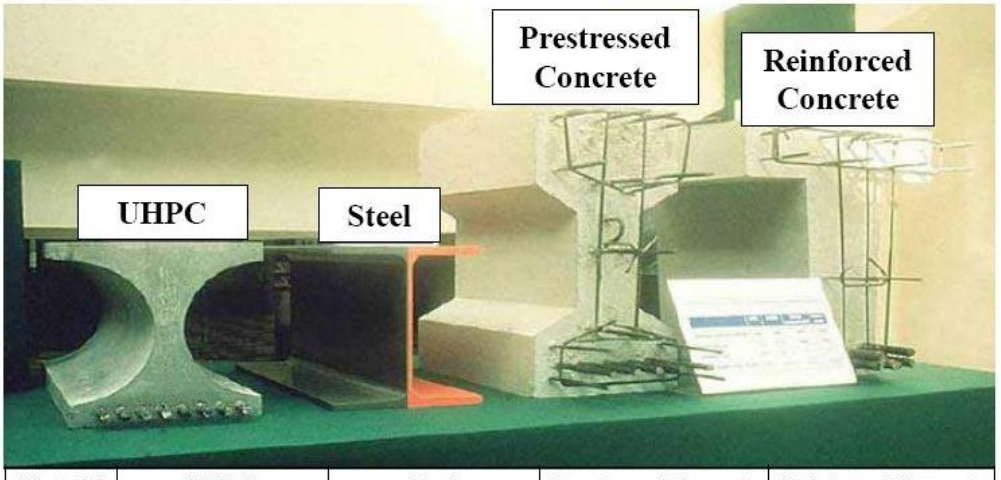
شکل ۱ ـ منحنی دانه‌بندی سنگدانه مورد استفاده و ارضای حدود تعیین‌شده توسط ASTM C33 [10]

۲ ـ ویژگی‌های ممتاز بتن فوق توانمند

۲ ـ ۱ ـ مشخصات مکانیکی

به دلیل مقاومت فشاری بسیار بالا، سازه‌های بتن فوق توانمند دارای اعضای ظریف‌تر و وزنی معادل ثلث تا نصف سازه‌های بتن معمولی متناظر هستند (شکل ۲). به دلیل مقاومت کششی و خمشی مناسب بتن فوق توانمند، در

مـواردی مـی‌تـوان بـا حـذف میلگردهـای فـولادی هزینـه نیـروی انسـانی را کـاهش داده و آزادی معمـاری بـیش‌تـری بـرای طراحان تامین نمود. بـه دلیـل خصوصـیت کـرنش سـخت شـوندگی بـتن فـوق توانمنـد، مـی‌تـوان بـا جـاگزینی ایـن بـتن در تیرهای بـتن معمـولی مسـلح بـه میلگردهـای پلیمـر الیـافی[1] مشـکل خیزهـای بـزرگ در حالـت حـد بهـره بـرداری را مرتفـع نمود.



Material	UHPC	Steel	Prestressed Concrete	Reinforced Concrete
Depth	14 in. (360 mm)	14 in. (360 mm)	28 in. (700 mm)	28 in. (700 mm)
Weight	94 lb/ft (141 kg/m)	75 lb/ft (110 kg/m)	313 lb/ft (466 kg/m)	355 lb/ft (528 kg/m)

شکل ۲ ــ مقایسه هندسه و وزن تیرهای ساخته‌شده از بتن فوق توانمند، فولاد، بتن پیش‌تنیده و بتن مسلح معمولی دارای ظرفیت لنگر برابر [11]

در دانشـگاه تهـران حـاجی اسـمعیلی مشخصـات مکـانیکی بـتن فـوق توانمنـد را بررسـی کـرد [12]. نتـایج آزمـایش‌هـای مقاومـت فشـاری، خمشـی، کششـی، مـدول الاستیسـیته و مـدول برشـی در جـدول ۲ و نتـایج آزمـایش سـه محـوری بـر اساس روش آزمایش اسـتاندارد مربوطـه [18] در جـدول ۳ ارائـه شـده اسـت. شـایان ذکـر اسـت کـه تمـامی نمونـه‌هـا بعـد از قالـب گیـری ۲۴ سـاعت عمـل آوری مرطـوب شـده و سـپس بـه مـدت ۴ شـبانه روز داخـل حوضـچه آب گـرم بـا دمـای ۸۰ درجه سانتی گـراد قـرار گرفتـه‌انـد. عربعلـی نیـز معیـارهـای گسـیختگی و مـدل رفتـاری مناسـب بـرای بـتن فـوق توانمنـد را مطالعه کـرد [19]. مـدل رفتـاری بـا تـابع دراکـر ــ پراگـر بـا قـانون جریـان غیـرمتحـد و سـخت‌شـدگی ایزوتروپیـک انطبـاق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دربرداشت.

جدول ۲ ــ مشخصات مکانیکی بتن فوق توانمند

مشخصه	آیین‌نامه	مقدار (MPa)
مقاومت فشاری	ASTM C39 [13]	۱۴۹,۷
مقاومت خمشی	ASTM C78 [14]	۱۶,۴
مقاومت کششی (برزیلی)	ASTM C496 [15]	۱۱,۶
مقاومت کششی (مسقیم)	ASTM C190 [16]	۴,۹۵
مدول الاستیسیته	ASTM C469 [17]	۳۵,۷e۳
مدول برشی	ASTM C469 [17]	۱۵,۱e۳

جدول ۳ ــ نتایج آزمایش سه محوری بتن فوق توانمند (MPa)

فشار همه جانبه	تنش نهایی	مدول الاستیسیته
۵	۲۰۰,۴	۳۹,۲e۳
۱۰	۲۲۲,۷	۳۹,۹e۳
۱۵	۲۲۱,۲	۳۹e۳
۲۰	۲۴۰,۳	۳۹,۵e۳

[1] *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*

۲ ـ ۲ ـ دوام

بتن معمولی می‌تواند در مواجهه با عوامل فیزیکی مانند فرسایش، چرخه‌های ذوب و انجماد، کریستاله شدن نمک و حرارت زیاد یا عوامل شیمیایی مانند واکنش‌های قلیائی سیلیسی، نفوذ یون کلر و خوردگی فولاد، حملات سولفاتی و تشکیل اترینگایت تاخیری دچار تخریب شود. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی، دوام فوق العاده بالای آن در برابر عوامل مخرب محیطی می‌باشد که این مزیت مرهون ریزساختار فوق العاده متراکم و عاری از تخلخل آن است. جدول ۴ که از مراجع [20,21] اتخاذ شده است را می‌توان شاهدی بر این مدعا دانست. بنا بر مطالعات صورت‌پذیرفته روی بتن فوق توانمند، پوسته‌شدگی در مجاورت نمک‌های یخ‌زدا تقریبا صفر [22,23]، مقاومت نسبت به واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها بسیار مناسب [22,24] و شاخص دوام در برابر پدیده ذوب و انجماد در برخی نمونه‌ها حتی بیش از ۱۰۰ درصد می‌باشد [22] (مطلب اخیر با هیدراته شدن سیمان‌های هیدراته‌نشده در شرایط ذوب و انجماد توجیه شده است). البته در صورتی که بتن فوق توانمند در دماهای بالای حاصل از آتش‌سوزی قرار گیرد، ممکن است به دلیل فشار داخلی ایجادشده ناشی از تبخیر آب موجود، ریزساختار متراکم بتن به صورت ناگهانی متلاشی شود. از آن جا که این پدیده یکی از خطرناک‌ترین مکانیزم‌های تخریب بتن فوق توانمند محسوب می‌شود، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به منظور رفع کامل این مشکل توصیه شده است [25,26]. ضمنا در مرجع [27] المان‌های بتن فوق توانمند در محیط‌های سولفات آمونیوم، سولفات کلسیم، اسید استیک، نیترات و آب دریا آزمایش شد و هیچ افتی در وزن و مقاومت مشاهده نگردید. لذا این بتن می‌تواند گزینه‌ای جالب توجه برای کاهش هزینه نگهداری سازه‌های ساحلی تلقی شود.

جدول ۴ ـ مقایسه مشخصات دوامی بتن توانمند و بتن فوق توانمند

مشخصه	بتن ۶۰ مگاپاسکال	بتن ۸۰ مگاپاسکال	بتن فوق توانمند
نفوذپذیری یون کلرید (×e-۸ سانتی‌مترمربع بر ثانیه)	۲,۵۵۶	۱,۰۸	۰,۴۰۵
عمق کربناتاسیون (میلی‌متر در ۲۸ روز)	۴	۱,۳۷	۰
ضریب مقاومت سایشی	۴	۲,۸	۱,۳

در دانشگاه تهران خدابنده استفاده از روکش بتن فوق توانمند برای حفاظت از خوردگی میلگرد را بررسی نمود [28]. وی با انجام آزمایش‌های دوام (جذب آب ۲۴ ساعته، عمق نفوذ آب، نفوذپذیری کلرید تسریع‌شده، نفوذ اکسیژن، مقاومت الکتریکی) بر روی نمونه‌های بتن معمولی، بتن فوق توانمند و کامپوزیت (بتن معمولی با روکش بتن فوق توانمند) که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است، بهبود قابل توجه دوام نمونه کامپوزیت نسبت به نمونه بتن معمولی راگزارش کرد. همچنین با انجام آزمایش تسریع خوردگی و اعمال جریان ۳۱ ولتی نشان داد که نمونه‌های شاهد (بتن معمولی مسلح) بعد از یک هفته شروع به خوردگی کردند و پس از ۲۳ روز دچار خوردگی ۴۷ درصدی شدند؛ در حالی که در نمونه‌های دارای روکش ۵ سانتی‌متری از بتن فوق توانمند پس از گذشت ۴۵ روز کماکان هیچ اثری از خوردگی دیده نشد.

جدول ۵ ـ نتایج آزمایش‌های دوام بتن معمولی، بتن فوق توانمند و کامپوزیت

نمونه	جذب آب ۲۴ ساعته (٪)	عمق نفوذ آب (میلی‌متر)	نفوذپذیری کلرید تسریع‌شده (کولمب)	نفوذ اکسیژن (e-۱۶×مترمربع)	مقاومت الکتریکی (کیلواهم.سانتی‌متر)
آیین‌نامه	BS 1881-122 [29]	BS EN 12390-8 [30]	ASTM C1202 [31]	AFPC-AFREM [32]	-
بتن معمولی	۵,۸۶	۲۱,۱	۲۱۸۷	۰,۴۶	۲۳,۵
بتن فوق توانمند	۰,۴۵	۰,۷	۴۱	۰,۰۰۱۵	۱۸۹,۴
کامپوزیت	-	-	۵۳	۰,۰۰۱۵	۱۸۶,۸
تغییرات کامپوزیت نسبت به بتن پایه	بهبود ۱۳ برابری	بهبود ۳۰ برابری	بهبود ۴۱ برابری	بهبود ۳۰۷ برابری	بهبود ۸ برابری

۲ ـ ۳ ـ مقاومت در برابر زمین‌لرزه، ضربه و انفجار

بتن فوق توانمند به دلیل مشخصات مکانیکی عالی می‌تواند نقش به سزایی در ایمن‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها داشته باشد. پژوهشگران مرکز تحقیق مهندسی زلزله آمریکا رفتار لرزه‌ای دو تیر T شکل عرشه که با اجرای درجای بتن فوق توانمند مسلح به میلگردهای صاف کوتاه به یکدیگر متصل شده بودند را بررسی کردند و گزارش دادند که این اتصال تحت بارگذاری‌های شدید لرزه‌ای می‌تواند مقاوم باشد [33]. مرجع [34] روی ستون‌های بتن فوق توانمند آزمایش کرد و نتیجه گرفت نسبت خاموت، نسبت فشار محوری و محتوای الیاف فولادی روی شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی موثر است. مرجع [35] نیز رفتار دیوار برشی بتن فوق توانمند را مورد بررسی قرار داد و عملکرد لرزه‌ای بتن فوق توانمند را به مراتب بهتر از بتن معمولی ارزیابی نمود.

در سال‌های اخیر تهدید تروریسم جهانی افزایش یافته است. برای محافظت از افراد غیرنظامی در مقابل حملات تروریستی ساختمان‌ها و زیرسازهای عمرانی باید در برابر بارگذاری‌های شدید مثل ضربه و انفجار مقاوم باشند. بتن معمولی به دلیل ظرفیت جذب انرژی پایین و طبیعت شکننده تحت چنین بارهای شدیدی ضعیف است. روش‌های متنوعی برای غلبه بر مشکلات بتن معمولی توسط محققین معرفی شده است که از این بین افزودن الیاف ناپیوسته به دلیل سهولت افزودن آن‌ها به مخلوط بتن و پدیده پل‌زنی ترک‌ها که ظرفیت جذب انرژی تحت ضربه یا انفجار را به صورت موثری بهبود می‌بخشد، گسترده‌ترین استفاده را داشته است. البته بتن فوق توانمند در مقایسه با بتن معمولی و توانمند مسلح به الیاف فلزی یا پلیمری قادر به اتلاف انرژی بیش‌تری حین ضربه بوده و عملکرد پس‌ماند بهتری نشان می‌دهد [36].

با توجه به هزینه زیاد الیاف فولادی، استفاده از الیاف جایگزین و یا ترکیب چند نوع الیاف و بررسی مشخصات آن‌ها به یکی از موضوعات مد نظر محققین بدل شده است. در دانشگاه تهران خان‌احمدی عملکرد پنل‌های بتن فوق توانمند حاوی الیاف فولادی صاف، الیاف فولادی قلاب‌دار و الیاف پلی‌الفین در برابر ضربه را به کمک سقوط وزنه روی پنل‌هایی به ابعاد ۵۰×۵۰×۵ سانتی‌متر بررسی نمود [37]. گرچه الیاف فولادی صاف، فولادی قلاب‌دار و پلی‌الفین به ترتیب بیشترین میزان تاثیر در بهبود مشخصات مکانیکی را نشان دادند، اما پارامتر مقاومت ضربه، از دیگر مشخصات مکانیکی مستقل بوده و نمونه‌های حاوی الیاف ترکیبی در آزمایش ضربه رفتار متفاوتی نسبت به تخمین جبری مقاومت داشتند. فرنام نیز رفتار پنل بتن فوق توانمند تحت بارگذاری ضربه را به کمک مدل MAT-SOIL-CONCRETE در نرم‌افزار LS-DYNA شبیه‌سازی و مطالعه پارامتری کرد [38]. الگوهای ترک و گسیختگی پیش‌بینی‌شده در هر دو سمت پنل انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت.

۳ ـ سازه های مرکب بتن معمولی ـ بتن فوق توانمند

اجرای یک لایه بتن فوق توانمند سختی شرایط خدمت را افزایش، تغییرشکل‌ها به ازای نیروهای تحمیلی را حداقل، عرض و فضای ترک‌خوردگی را کاهش و شکل‌گیری ماکروترگ‌ها را به تاخیر می‌اندازد [39]. مرجع [40] مدل‌های عددی و تحلیلی ارائه‌شده برای تیرها و دال‌های مقاوم‌سازی شده با بتن فوق توانمند را مرور و انطباق خوب آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی را گزارش کرد. بنابر داده‌های جمع‌آوری‌شده، اکثر نمونه‌ها در وجه کششی تقویت شده بودند تا از رفتار کرنش سخت‌شوندگی بتن فوق توانمند در کشش و ظرفیت مقاومت فشاری بتن معمولی بهره گرفته شود. نتایج نشان داد گرچه بتن فوق توانمند می‌تواند تا ۴۰۰ درصد مقاومت خمشی تیر و دال را بهبود بخشد، هزینه آن نسبت به پلیمر الیاف کربن بیش‌تر است. البته با درنظرگیری دوام و هزینه نگهداری کمتر بتن فوق توانمند، این اختلاف قیمت می‌تواند در طول عمر خدمت‌دهی سازه جبران شود. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های یک ترمیم موفق سازگاری ابعادی نسبی لایه جدید با بتن زیرین می‌باشد. به دلیل مقاومت کششی بالا، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و ویسکوالاستیک قابل توجه بتن فوق توانمند، اختلاف مشخصات مکانیکی بتن فوق توانمند و بتن پایه مشکل‌زا نمی‌باشد. مقاومت پیوستگی بین بتن پایه و بتن فوق توانمند موضوعی بسیار حائز اهمیت است که در دانشگاه تهران توسط جعفری نژاد بررسی شد [41]. مطالعه وی حاکی از آن بود که مقاومت پیوستگی بین بتن فوق توانمند و بتن پایه به شدت متأثر از چگونگی آماده‌سازی سطح بتن پایه است. نتایج آزمایش‌های مقاومت پیوستگی که در جدول ۶ ارائه شده است، نشان می‌دهد که از میان چهار روش آماده‌سازی سطح بتن پایه مطالعه شده (بدون آماده سازی، برس سیمی زده، شیار زده، سند بلست شده) روشهای سند بلست کردن و شیار زدن می توانند حداقل مقاومت قابل قبول ACI[1] را تامین کند. ضمنا در صورت اجرای سند بلست مقاومت پیوستگی مناسب در دوره زمانی کوتاهی بعد از اجرای بتن فوق توانمند (سه روز) وجود دارد. در این مطالعه، با انجام آزمایش برش مستقیم پارامترهای اصطکاکی اتصال سند بلست شده $\varphi = 56.00°$ و $C = 4.41\text{MPa}$ تخمین زده شد.

جدول ۶ ـ نتایج آزمایش‌های مقاومت پیوستگی بتن معمولی و بتن فوق توانمند (MPa)

روش آماده‌سازی سطحی	آزمایش Pull off	آزمایش Slant shear
آیین‌نامه	ASTM C1583 [42]	ASTM C882 [43]
بدون آماده‌سازی	۰,۵۹	۱۱,۵۵
برس سیمی زده	۰,۵۵	۱۳,۵۵
شیار زده	۲,۷۲	۱۹,۵۹
سند بلست شده	۳,۶۷	۲۹,۴۳
حداقل مقاومت قابل قبول بر اساس ACI 546.3R-06 [44]	۱,۷-۲,۱	۱۴-۲۱

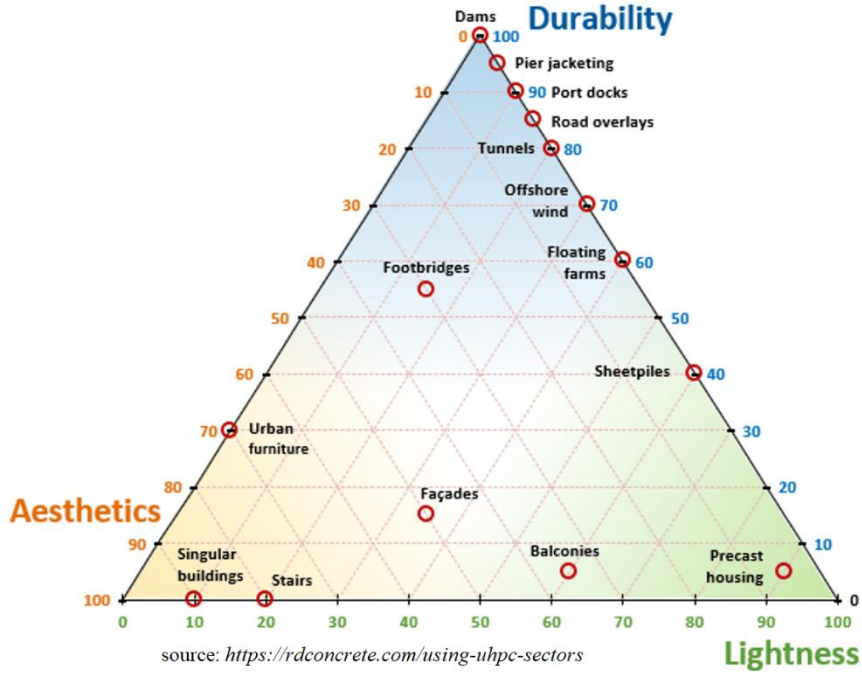
۴ ـ استفاده از بتن فوق توانمند در مهندسی پل

با توجه به مطالب عنوان‌شده، برای بتن فوق توانمند می‌توان کاربردهای متنوعی متصور شد که برخی از آن‌ها در شکل ۳ عنوان و بر حسب سه ویژگی کلیدی این مصالح (دوام، سبکی و زیبایی‌شناختی) ارزیابی شده اند. از میان این کاربردها، بتن فوق توانمند بهترین جایگاه را در ساخت و ترمیم پل‌ها به دست آورده است.

---

[1] *American Concrete Institute*

هر راهکار جدیدی که بتواند از عهده چالش‌های خاصی ـ که بسته به آب و هوا، تراکم جمعیت، تقاضای ترافیک و سن زیرساخت پل در یک منطقه متغیر است ـ برآید، همواره با استقبال کارفرما همراه می‌شود. در مناطقی که شبکه حمل و نقل اتصالات جدیدی را شکل می‌دهد، بتن فوق توانمند این فرصت را می‌دهد که با سازه فوقانی قوی دهانه‌های بزرگ‌تر و سازه تحتانی (پایه پل) کم‌تعدادتر داشته باشیم. از طرفی اجزای پیش‌ساخته بتن فوق توانمند راحت‌تر حمل و سرهم می‌شوند که در نواحی شهری و نیز دور دست مزیت محسوب می‌شود. در مناطقی که تقاضای در حال افزایش ترافیک به شبکه موجود بار بیش از حد تحمیل می‌کند، بتن فوق توانمند می‌تواند نیازهای متعدد حداقل ارتفاع آزاد، ظرفیت و طول عمر را مرتفع و با صرف هزینه و مدت زمان کم‌تری پل‌ها را بازسازی کند. در مناطقی که کهولت و زوال پل‌های موجود باعث نیاز به بهسازی با حداقل اختلال در خدمت‌دهی می‌شود، بتن فوق توانمند می‌تواند عمر خدمت‌دهی پل‌ها را بیش از آنچه با روش‌های سنتی قابل دست‌یابی است، ارتقا دهد.



شکل ۳ ـ مزایای کلیدی محصولات مختلف بتن فوق توانمند

امروزه بکارگیری بتن فوق توانمند در مهندسی پل به سرعت در حال پیشرفت و گسترش است و کشورهای مالزی، کره جنوبی، فرانسه، سوئیس و آمریکا در این زمینه پیشگام هستند. در این بخش پس از اشاره به پژوهش‌های نوآورانه صورت‌گرفته، به بررسی پروژه‌های متعدد بین المللی انجام‌شده در این حوزه پرداخته می‌شود.

۴ ـ ۱ ـ مروری بر مطالعات انجام‌شده

جایگزینی مصالح سنتی با بتن فوق توانمند در بهسازی پل می‌تواند تاثیر محیط زیستی را درچرخه عمر سازه تا ۴۰٪ کاهش دهد [45]. نوع جدیدی از بتن فوق توانمند با الیاف مصنوعی نیز معرفی شده است که در صورت استفاده از آن تاثیر محیط زیستی ترمیم پل نسبت به بتن فوق توانمند معمولی با ۲۹٪ کاهش همراه خواهد بود [46]. بکارگیری بتن فوق توانمند هزینه اولیه ساخت پل را حدودا ۸۰٪ افزایش می‌دهد ولی از آنجا که پل بتن فوق توانمند می‌تواند عمر خدمت سازه‌ای را افزایش دهد، با در نظرگیری هزینه سالانه معادل می‌توان ادعا کرد هزینه پل بتن فوق توانمند کم‌تر از پل معمولی است [47]. علاوه براین، استفاده از بتن فوق توانمند در تیرهای

پیش‌ساخته/پیش‌کشیده پل با کاهش قابل ملاحظه تعداد و ابعاد تیرها طراحی سازه فوقانی بهینه‌تری را در مقایسه با بتن توانمند به دست می‌دهد [48].

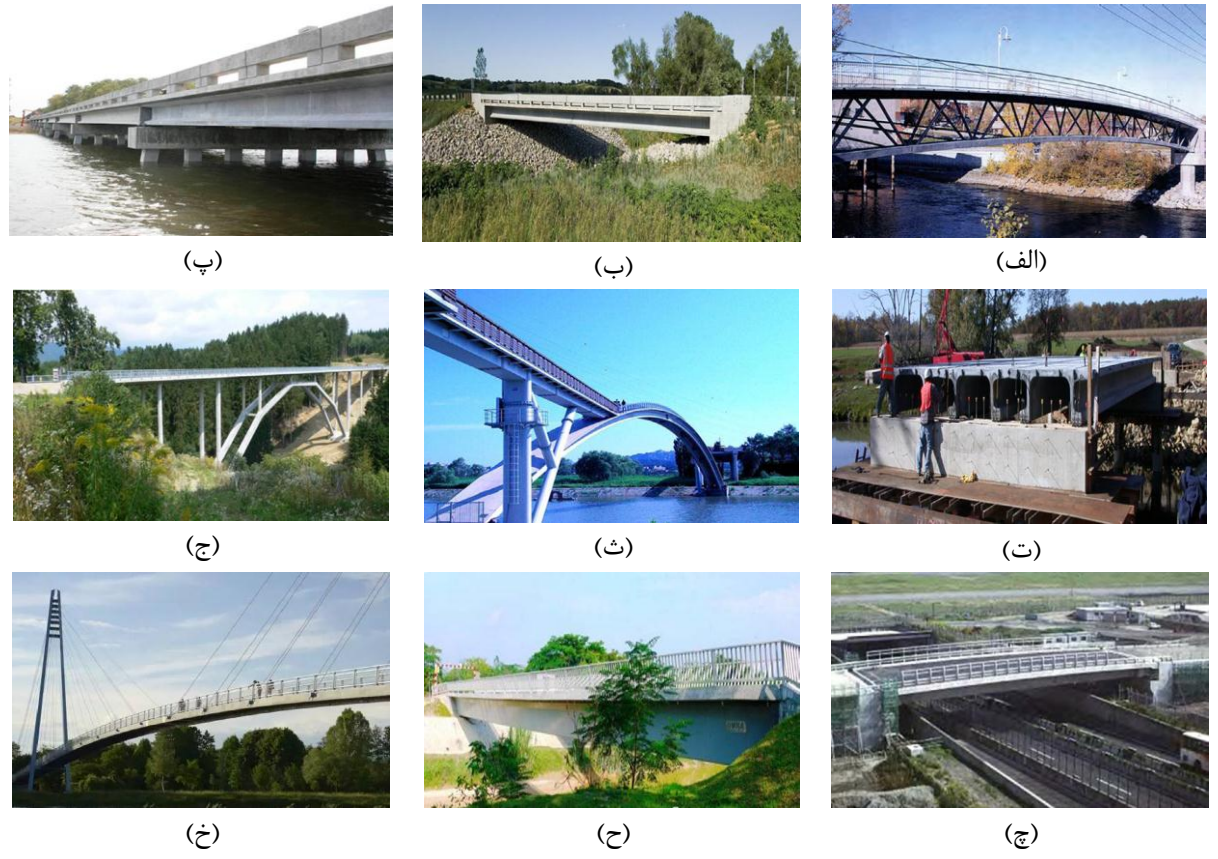
فن و همکاران برای محافظت ستون‌های پل‌ها در مقابل برخورد خودرو و کاهش آسیب خودرو و تلفات یک سازه محافظ جدید مبتنی بر بتن فوق توانمند توسعه دادند [49]. همچنین آن‌ها برای محافظت پل‌ها از برخورد کشتی‌ها یک سپر مرکب از فولاد و بتن فوق توانمند پیشنهاد دادند که در برابر خوردگی مقاوم است [50]. پژوهشگرانی نیز با بهره‌گیری توامان از خصوصیات پلیمر الیافی و بتن فوق توانمند دست به نوآوری زده‌اند. به عنوان نمونه مرجع [51]رفتار پل مرکب از خرپای پلیمر الیافی و دال بتن فوق توانمند را بررسی و معیار حاکم طراحی این سیستم را به جای تنش خرپا و دال خیز گزارش کرد. مرجع [52] نیز پل کابلی دهانه بزرگ مرکب از کابل‌های پلیمر الیاف کربنی و اعضای بتن فوق توانمند را بررسی و این سیستم را برای ساخت پل کابلی بتنی بادوام با حداکثر طول تقریبی ۱۰۰۰ متر برای دهانه اصلی کاربردی ارزیابی کرد. با توجه به نسبت‌های بالاتر مقاومت کششی به وزن و مدول به وزن پلیمر الیاف کربنی نسبت به فولاد، کابل‌های این سیستم در مقایسه با کابل‌های فولادی اثر افتادگی را به وضوح کاهش دادند.

۴ ـ ۲ ـ استفاده از بتن فوق توانمند در ساخت پل‌ها

تعداد کمی پل بتن فوق توانمند در سراسر دنیا وجود دارد که عموما در آسیا (ژاپن، کره جنوبی، مالزی و چین)، اروپا (فرانسه، آلمان و اتریش) و آمریکای شمالی (آمریکا و کانادا) هستند. شکل ۴ شناخته‌شده‌ترین این پل‌ها را نمایش می‌هد. اولین پل عابر پیاده بتن فوق توانمند در سال ۱۹۹۷ در کبک[1] کانادا ساخته شد که شروع استفاده رسمی از بتن فوق توانمند در مهندسی پل بود (شکل۴ــ الف). اداره کل بزرگراه فدرال آمریکا (FHWA[2]) برنامه تحقیقاتی بتن فوق توانمند را در سال ۲۰۰۱ آغاز کرد و کاربردهای این مصالح در مهندسی پل را مستمرا ترویج داده است. اولین پل بتن فوق توانمند آمریکای شمالی در سال ۲۰۰۶ در آیووا آمریکا ساخته شد که پلی تک دهانه با سه تیر پیش‌ساخته پیش‌تنیده به طول ۳۳,۵ متر می‌باشد (شکل ۴ــ ب). یکی از ۱۰ دهانه پل Cat Point Creek واقع در ویرجینیای آمریکا با بتن فوق توانمند ساخته شده است که شامل تیرهای باریک‌تر و سبک‌تر بدون نیاز به میلگردهای فولادی معمول می‌باشد (شکل ۴ــ پ). در سال ۲۰۰۸ اولین پل P شکل بتن فوق توانمند در میسوری آمریکا ساخته شد (شکل۴ــ ت). کره جنوبی نیز به پیشرفت‌های چشم‌گیری در زمینه بکارگیری بتن فوق توانمند در مهندسی پل نائل شده است. این کشور در سال ۲۰۰۲ موفق به تکمیل پروژه اولین و بزرگ‌ترین پل قوسی بتن فوق توانمند شد. دهانه قوس اصلی پل ۱۲۰ متر و متشکل از ۶ قطعه پیش‌ساخته با مقطع P شکل است که با پیش‌تنیدگی سرهم شده‌اند (شکل ۴ــ ث). در سال ۲۰۱۰ اتریش اولین پل قوسی بزرگراهی را بهره‌برداری نمود. طول این پل ۱۱ دهانه ۱۵۷ متر و دهانه و ارتفاع دو قوس مجاور آن به ترتیب ۶۹ و ۱۸,۳ متر می‌باشد. این قوس‌ها مسلح به الیاف فولادی بوده و در آن‌ها خبری از میلگرد نیست (شکل ۴ــ ج). پل GSE ژاپن یک پل تک دهانه به طول ۴۶ متر و عرض ۱۶,۲ متر با سازه‌ای متشکل از سه تیر U شکل پیش‌ساخته بتن فوق توانمند است. نسبت ارتفاع تیر به دهانه آن ۱/۲۵ بوده و وزن آن نسبت به حالت ساخته‌شدن با بتن متداول ۴۰ درصد کاهش یافته است (شکل ۴ــ چ). مالزی اولین پل بزرگراهی مرکب بتن مسلح ـ فوق توانمند را در سال ۲۰۱۰ ساخت. این پل ۵۰ متری که برای عمر خدمت ۱۲۰ سال طراحی شده است، دارای عرشه بتن مسلح و تیرهای U شکل بتن فوق

Quebec [1]
Federal Highway Administration [2]

توانمند بدون تسلیح برشی می‌باشد (شکل ۴ــ ح). جمهوری چک نیز در سال ۲۰۱۳ یک پل عابر پیاده کابلی به طول ۱۵۶ متر را احداث نمود که تبدیل به نماد ظرافت و سبکی شد (شکل۴ـ خ).



(الف) (ب) (پ)

(ت) (ث) (ج)

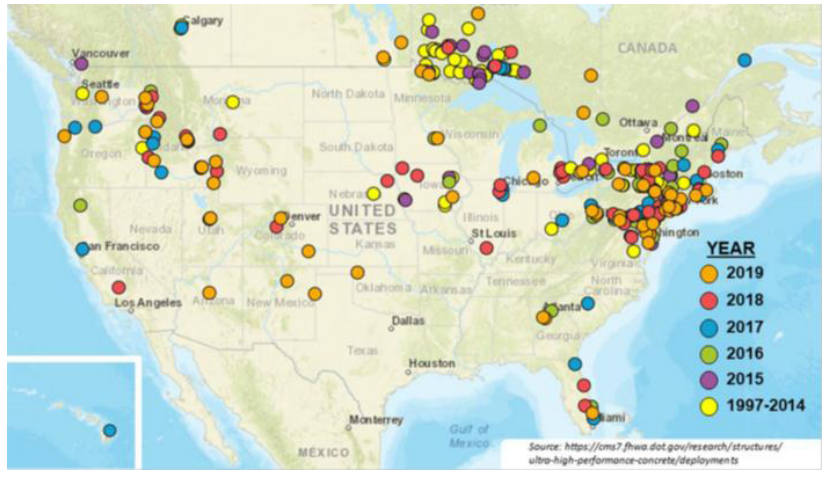
(چ) (ح) (خ)

شکل ۴ ــ نمونه‌هایی از پل‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند در سراسر دنیا: (الف) پل هوایی Sherbrooke (ب) پل Mars Hill (پ) پل Cat Point Creek (ت) پل Jakway Park (ث) پل Peace (ج) پل Wild (چ) پل GSE (ح) پل Kampung Linsum (خ) پل عابر پیاده Celakovice [53]

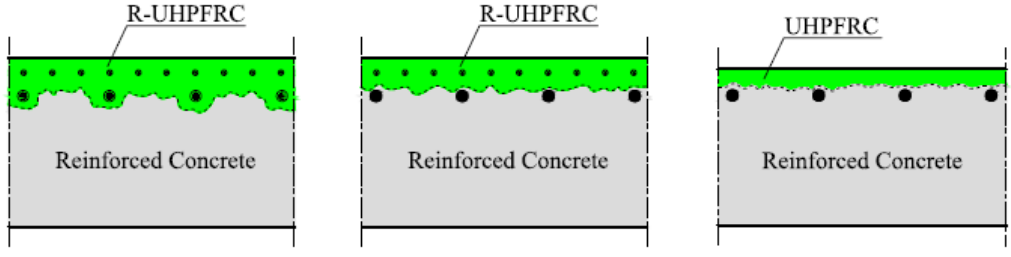
در جدول ۷ مهم‌ترین موارد بکارگیری بتن فوق توانمند در اجزای سازه‌ای پل‌ها گردآوری شده است. خاطر نشان می‌شود که در دهه اخیر نمونه‌های زیادی از استفاده از بتن فوق توانمند در پل‌ها به خصوص در محل اتصالات در آمریکا و کانادا گزارش شده است که به جهت حفظ اختصار از اشاره به آن‌ها خودداری می‌شود. شکل ۵ تعدد و پراکندگی پروژه‌های انجام‌شده بین سال‌های ۱۹۹۷ و ۲۰۱۹ در آمریکای شمالی را به تصویر می‌کشد. گفتنی است که کشور مالزی با بیش از ۱۲۰ پروژه به اتمام‌رسیده از سال ۲۰۱۰ تاکنون، در زمینه پل بتن فوق توانمند در دنیا حائز جایگاه نخست است. نمودار شکل ۶ پیشرفت این کشور طی سال‌های اخیر را به خوبی نمایش می‌دهد .

جدول ۷ ـ موارد استفاده از بتن فوق توانمند در اجزای سازه‌ای پل‌ها

نام	کشور	سال	مورد استفاده	هدف استفاده
Mars Hill Bridge	ایالات متحده	۲۰۰۶	تیر I شکل	ترویج بتن فوق توانمند و یافتن خصوصیات مصالح
Cat Point Creek Bridge	ایالات متحده	۲۰۰۸	تیر I شکل	استفاده از مشخصات کششی مصالح برای ساده‌سازی ساخت و ساز
Jakway Park Bridge	ایالات متحده	۲۰۰۸	تیر P شکل	تهیه راهنما برای طراحیهای آینده که تیر بتن فوق توانمند P شکل به کار می‌برند
Sherbrooke Overpass	کانادا	۱۹۹۷	خرپای فضایی پیش-تنیده‌ی پس‌کشیده	شناخت مصالح و سازه‌های جدید، بهبود دوام و تامین تناسب با محیط زیست
Glenmore Pedestrian Bridge	کانادا	۲۰۰۷	تیر پیش‌تنیده T شکل	مقاومت در برابر هوازدگی و نگهداری آسان
PS34 Bridge	فرانسه	۲۰۰۵	شاه‌تیر قوطی	اصلاح طراحی و سبک‌سازی پل در کنار یکپارچگی آن با محیط مربوطه
Pinel Bridge	فرانسه	۲۰۰۷	تیر پیش‌تنیده T شکل	استفاده از مشخصات دوام بتن و سرعت ساخت بیش‌تر
Pont du Diable Pedestrian Bridge	فرانسه	۲۰۰۸	تیر U شکل	افزایش طول دهانه و اتخاذ شکل دلپذیر و سبک
Friedberg Bridge	آلمان	۲۰۰۷	تیر P شکل	استفاده از مشخصات دوام بتن برای جایگزینی یک سازه چوبی آسیب‌دیده موجود
Shepherds Gully Creek Bridge	استرالیا	۲۰۰۵	تیر پیش‌ساخته پیش-تنیده I شکل	اجرای پل‌های آزمایشی برای بهبود ظرفیت باربری و جایگزینی پل چوبی کهنه اصلی
WILD Bridge	اتریش	۲۰۱۰	تیرک قوسی	احداث سازه سبک و لاغر هماهنگ با محیط زیست
GSE Bridge	ژاپن	۲۰۰۸	تیر U شکل	استفاده از مقاومت زیاد بتن برای ساخت و ساز سبک‌تر و بهره‌وری بیشتر مصالح
Papatoetoe footbridge	نیوزیلند	۲۰۰۵	تیر P شکل	کاهش ارتفاع تیر و هزینه زیرسازی و احداث
Peace Bridge	کره جنوبی	۲۰۰۲	تیر P شکل	یادبود روابط دیپلماتیک با فرانسه و بهبود عملکرد قوس
Office Pedestrian Bridge	کره جنوبی	۲۰۰۹	پل کابلی	اجرای سازه سبک‌وزن با تنش معقول
Kampung Linsum Bridge	مالزی	۲۰۱۰	تیر U شکل	حذف اجزای برشی و استفاده از بتن فوق توانمند برای تامین ظرفیت خمشی و برشی قابل ملاحظه
Celakovice Pedestrian Bridge	جمهوری چک	۲۰۱۳	قطعات عرشه	هزینه نگهداری کم و هزینه چرخه حیات معقول
Luan Bai trunk Railway Bridge	چین	۲۰۰۶	تیر T شکل	بهبود دوام و عملکرد در طول عمر پل
Fuzhou University Landscape Bridge	چین	۲۰۱۵	تیرک قوسی	احداث پل آزمایشی برای ترویج استفاده از بتن فوق توانمند
Yuan Jiahe Bridge	چین	۲۰۱۷	تیر P شکل	کاهش وزن برای ساخت و ساز آسان



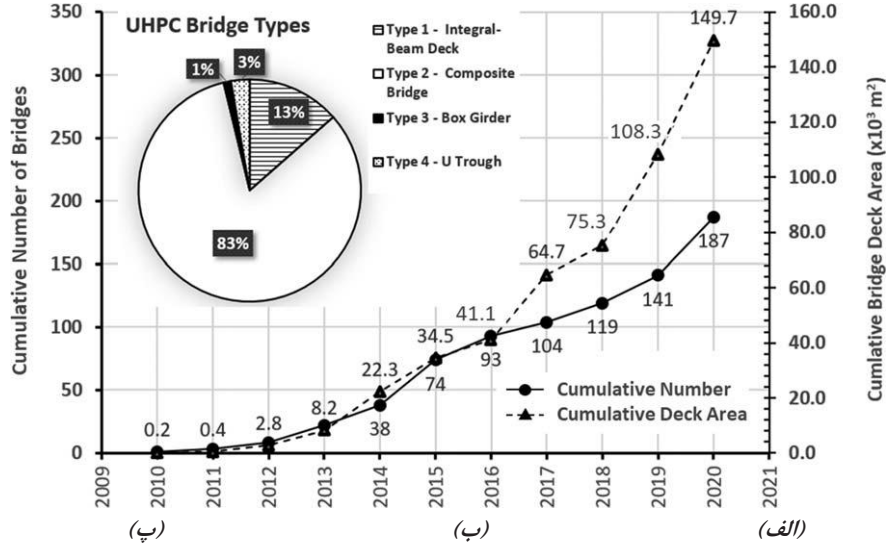
شکل ۵ ـ پل‌های بتن فوق توانمند ساخته‌شده در آمریکا و بخشی از کانادا از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۹ [54]



شکل ۶ ـ تعداد و مساحت عرشه پل‌های بتن فوق توانمند در مالزی به صورت تجمعی [54]

۴ ـ ۳ ـ استفاده از بتن فوق توامند در بهسازی پل‌ها

پل های جدید با انتظار ۷۵ سال خدمت‌دهی ساخته می‌شوند ولی فرسودگی معمول طول عمرشان را به حدود ۳۰ سال کاهش می‌دهد. مشخصا عرشه‌ها به دلیل تاثیر مستقیم از ترافیک، آب و هوا و مواد شیمیایی نظیر یخ‌زدا نسبت به سایر بخش‌های پل با سرعت بیشتری تخریب می‌شوند. از این رو متداول‌ترین استفاده از بتن فوق توانمند در زمینه ترمیم پل‌ها مربوط به این بخش است. شکل ۷ پیکربندی‌های اصلی بهسازی عرشه‌های بتن مسلح را نشان می‌دهد.



شکل ۷ ـ پیکربندی‌های اصلی بهسازی عرشه بتن مسلح پل: (الف) لایه بتن فوق توانمند تنها با عملکرد محافظتی؛ (ب) لایه بتن فوق توانمند مسلح با عملکرد سازه‌ای و محافظتی؛ (پ) لایه بتن فوق توانمند مسلح برای بهسازی میلگردهای خورده‌شده موجود نیز استفاده می‌شود.

در چـین بـه دلیـل بـار سـنگین ترافیـک، در بسـیاری از عرشـه‌هـای فـولادی تـرک‌هـای خسـتگی مشـاهده اسـت. اگـر ایـن ترک‌ها به خـوبی تـرمیم نشـوند، عملکـرد عرشـه فـولادی بـه سـرعت رو بـه زوال مـی‌رود. بـرای بهبـود مشخصـات دینـامیکی این عرشـه‌هـا اجـرای لایـه فوقـانی بـتن فـوق توانمنـد پیشـنهاد شـده اسـت [57-55]. لازم بـه ذکـر اسـت امـروزه ایـن روش تحـت عنـوان سیسـتم عرشـه مرکـب سـبک (LWCD[1]) شـناخته مـی‌شـود و بـرای بهـره‌گیـری از وزن کـم، ظرفیـت بـالا و راحتـی احـداث عرشـه فـولادی مـورد توجـه قـرار گرفتـه اسـت. مرجـع [58] نیـز مقـاوم‌سـازی خمشـی عرشـه بـتن مسـلح آسیب‌دیده پل به کمـک بـتن فـوق توانمنـد را مـورد بررسـی قـرار داده و بـا اسـتفاده از ثمـره مطالعـه طـرح بهسـازی عرشـه خسارت‌دیده یک پل کـابلی را ارائـه نمـود. نتـایج آزمـایش‌هـا نشـان داد کـه بـا قرارگیـری لایـه بـتن فـوق توانمنـد در سـطح کششی ظرفیـت‌هـای تـرک‌خـوردگی و نهـایی بـه ترتیـب حـدود ۲٫۵ و ۲ برابـر افـزایش مـی‌یابـد؛ در حـالی کـه اجـرای ایـن لایه در سطح فشـاری ظرفیـت تـرک‌خـوردگی را تغییـر نـداده و ظرفیـت نهـایی را تنهـا ۳۰ درصـد بهبـود مـی‌بخشـد. ضـمنا با کاهش تنش کششی در تسـلیح فـولادی، سـختی بـه طـور مشـهودی افـزایش یافـت و بـه دلیـل شـکل‌پـذیری بسـیار بـالا و رفتـار کـرنش سـخت‌شـوندگی بـتن فـوق توانمنـد، گسـترش تـرک‌هـا در دال‌هـای بـتن مسـلح مهـار شـد و بـه تـاخیر افتـاد. استفاده از بتن فوق توانمنـد در تـرمیم روسـازی نیـز بـا اسـتقبال مواجـه شـده اسـت کـه چنـد نمونـه اجراشـده آن در چـین در جدول ۸ گردآوری شده است.

جدول ۸ ـ موارد بکارگیری بتن فوق توانمند در ترمیم روسازی عرشه پل‌ها در چین

نام	سال	موقعیت	نوع پل
Ma Fang Bridge	۲۰۱۱	استان گوانگ دونگ	تیر قوطی ساده
Buddha Chen Bridge	۲۰۱۴	استان گوانگ دونگ	تیر قوطی فولادی پیوسته مقطع متغیر
Hai He Bridge	۲۰۱۵	شهر تیانجین	پل کابلی با تیر مختلط
Tong Hui Bridge	۲۰۱۵	شهر پکن	پل ترکیبی عرشه، تیر و قوس
Dong Ting Lake Second Bridge	۲۰۱۵	استان هونان	پل معلق مرکب قاب-خرپا
Rong Jiang Bridge	۲۰۱۶	استان گوانگ دونگ	پل کابلی با تیر مختلط

البته باید گفت که اسـتفاده از بـتن فـوق توانمنـد در بهسـازی پـل‌هـا منحصـر بـه تـرمیم و تقویـت عرشـه نیسـت. بـه عنـوان مثـال مـی‌تـوان بـه پـل راه‌آهـن CN در کبـک کانـادا اشـاره کـرد کـه بـرای محافظـت سـتون پـل در برابـر نفـوذ کلریـد و چرخـه‌هـای ذوب و انجمـاد پـس از تراشـیدن بـتن مضـمحل لایـه ۱۰ سـانتی‌متـری بـتن فـوق توانمنـد مسـلح بـه میلگـرد گالوانیزه اجرا شد.

[1] *LightWeight Composite Deck*

۵ ـ بحث و جمع‌بندی

در ایـن مقالـه ابتـدا توضـیحاتی در مـورد خصوصـیات منحصـر بـه فـرد بـتن فـوق توانمنـد بـا مـروری بـر پـژوهش‌هـای صورت‌گرفته در این حوزه در دانشـکده فنـی دانشـگاه تهـران بـه عنـوان پیشـگام مطالعـه و بـومی‌سـازی ایـن مصـالح سـیمانی در ایـران ارائـه شـد. سـپس فعالیـت‌هـای انجـام شـده در زمینـه بکـارگیری بـتن فـوق توانمنـد در مهندسـی پـل بـه عنـوان رایج‌ترین استفاده ایـن مصـالح ذیـل عنـاوین کارهـای تحقیقـاتی، پـروژه‌هـای سـاخت و پـروژه‌هـای بهسـازی تشـریح شـد. بـا توجه به کارآمدی استفاده از بـتن فـوق توانمنـد، در ایـن بخـش موانـع پـیش روی تـرویج بهـره‌گیـری از ظرفیـت فـوق العـاده این مصالح در اجرای پروژه‌ها بررسی و پیشنهادهایی برای مطالعات آینده ارائه می‌گردد.

محدودیت‌های کلیدی برای بکارگیری بتن فوق توانمند در مهندسی پل:

۱ ـ هزینه مصـالح: هزینـه بـتن فـوق توانمنـد مهـم‌تـرین عامـل بازدارنـده بـرای صـاحبان پـل و طراحـان اسـت کـه البتـه بـا لحـاظ نمـودن کـاهش مصـرف مصـالح و سـبک‌سـازی، سـود اقتصـادی کـلان بـرای بهبـود دوام و منفعـت اجتمـاعی بـرای حفظت محیط زیست و انرژی، این گزینه کماکان مطلوب به نظر می‌رسد.

۲ ـ الزام نگهـداری: بـتن فـوق توانمنـد بـرای بـه دسـت آورن مقاومـت بـالا نیـاز بـه نگهـداری بـا دمـای بـالا حـین سـاخت و ساز دارد ولی در کارگاه احـداث پـل نمـی‌تـوان تجهیـزات مـورد نیـاز را فـراهم آورد. در نتیجـه، بـتن فـوق توانمنـد اغلـب بـه صورت پیش‌ساخته اجرا می‌شود که انتخاب روش‌های ساخت و سازه‌های پل را با محدودیت مواجه می‌سازد.

۳ ـ مقـررات: متنـاظر آنچـه بـرای بـتن معمـولی داریـم، اسـتانداردها و راهنماهـای یکسـان بـرای مـدل‌سـازی عـددی، آزمـایش، طراحـی و سـاخت بایـد ایجـاد شـود. عـلاوه بـر ایـن، پـیش از اسـتفاده بـتن فـوق توانمنـد در ابعـاد بـزرگ، توسـعه روش‌ها برای جلوگیری از آسیب، نگهداری کارآمد و تعمیر یا جایگزینی اجزای بتن فوق توانمند ضروری است.

۴ ـ نقـص‌هـای بـتن فـوق توانمنـد: بـتن فـوق توانمنـد نسـبت آب بـه مصـالح سـیمانی پـایینی دارد و مقـادیر زیـادی از ترکیـب‌هـای فعـال را در خـود جـای داده اسـت. بـا پیشـرفت هیدراتاسـیون مصـالح سـیمانی، جمـع‌شـدگی نیـز افـزایش می‌یابد کـه مـی‌توانـد منجـر بـه تـرک شـود. عـلاوه بـر ایـن، خـوردگی الیـاف فلـزی سـطح بـتن در محـیط‌هـای مرطـوب یـا خورنده یک مسئله حائز اهمیت است.

سوی اصلی تحقیقات در آینده:

۱ ـ مدل‌سازی بنیادی بـرای رفتارهـای اسـتاتیک و دینامیـک اجـزای پـل و اتصـالات سـاخته‌شـده از بـتن فـوق توانمنـد. ایـن مدل‌ها می‌تواند در نرم‌افزارهای متداول موجود در بازار نظیر SAP2000 و ANSYS وارد شود.

۲ ـ توسـعه راهنماهـا و اسـتانداردها بـرای طراحـی، سـاخت، آزمـایش و ارزیـابی عملکـرد بلنـد مـدت (شـامل عملکـرد در مقابله با زمین‌لرزه، باد و برخورد کشتی و وسیله نقلیه).

۳ ـ روش طراحی و ساخت تیرهای بتن فوق توانمند توسعه‌یافته برای پل‌های دارای دهانه بزرگ.

۴ـ عملکرد بهینه و روش‌های طراحی مبتنی بـر قابلیـت اطمینـان مـوثر بـر هزینـه طـول عمـر پـل بـا در نظرگیـری طراحـی، ساخت، نگهداری و تعمیر اجزای آسیب‌دیده با پیشامدهای غیر مترقبه.

منابع و مراجع

[1] Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances, Recommandations Provisoires. (2002). SETRA-AFGC, Groupe de travail BFUP.

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

[3] Gowripalan, N. and Gilbert, R.I. (2000). Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams. University of New South Wales.

[4] JSCE Guidelines for Concrete No. 9, Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft). (2006). Japan Society of Civil Engineers (JSCE).

[5] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Sixth Edition. (2012). American Association of State Highway and Transportation Officials.

[6] 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).

[7] Talebinejad, I., Bassam, S. A., Iranmanesh, A., & Shekarchizadeh, M. (2004, September). Optimizing mix proportions of normal weight reactive powder concrete with strengths of 200–350 MPa. In Proceedings of the International Symposium on UHPC, Kassel, Germany (pp. 133-141).

[8] Taghaddos, H., Mahmoudzadeh, F., Pourmoghaddam, A., & Shekarchizadeh, M. (2004, September). Prediction of compressive strength behaviour in RPC with applying an adaptive network-based fuzzy interface system. In Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany (pp. 273-284).

[9] ASTM C1437. (2013). Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. American Society for Testing and Materials.

[10] ASTM C33. (2018). Standard Specification for Concrete Aggregates. American Society for Testing and Materials.

[11] Graybeal, B.A. (2005). Characterization of the behavior of ultra-high performance concrete. PhD thesis, University of Maryland.

[12] Hajiesmaeili, A. (2015). Experimental and numerical investigation of structural behavior of UHPFRC beam elements. M.Sc. thesis in structural engineering. School of civil engineering, College of engineering, University of Tehran (in Persian).

[12] حاجی اسمعیلی، امیر. (۱۳۹۴). بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار تیرهای ساخته شده از بتن فوق توانمند. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی سازه. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

[13] ASTM C39. (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials.

[14] ASTM, C78. (2018). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). American Society for Testing and Materials.

[15] ASTM C496. (2017). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials.

[16] ASTM, C190. (1985). Standard Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars. American Society for Testing and Materials.

[17] ASTM C469. (2014). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poison's Ratio of Concrete in Compression. American Society for Testing and Materials.

[18] ASTM C801. (1998). Standard Test Method for Determining the Mechanical Properties of Hardened Concrete Under Triaxial Loads (withdrawn 2004). American Society for Testing and Materials.

[19] Arabali, P. (2011). Numerical study of the behavior of high performance fiber reinforced concrete under triaxial compression by available constitutive models. M.Sc. thesis in hydraulic structures. School of civil engineering, College of engineering, University of Tehran (in Persian).

[19] عربعلی ، پورا. (۱۳۹۰). مطالعه عددی رفتار بتن‌های الیافی توانمند بارگذاری‌شده به صورت سه محوری با مدل‌های رفتاری موجود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته سازه‌های هیدرولیکی. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

[20] Shao-min Song, Cui-xia Wei. (2006). Study on Durability of Reactive Powder Concrete. J. Concr, 2, 72–73.

[21] Li Li, Ying Wang, Wen-zhong Zheng. (2008). State of the art of durability of reactive powder concrete. Indust. Constr, S1, 773–776.

[22] Graybeal, B., & Tanesi, J. (2007). Durability of an ultrahigh-performance concrete. Journal of materials in civil engineering, 19(10), 848-854.

[23] Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., & Aïtcin, P. C. (1997). Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes. ACI Materials journal, 94(4), 286-290.

[24] Piérard, J., Dooms, B., & Cauberg, N. (2016). Durability evaluation of different types of UHPC. Newsletter.

[25] So, H. S., Yi, J. B., Khulgadai, J., & So, S. Y. (2014). Properties of strength and pore structure of reactive powder concrete exposed to high temperature. ACI Mater. J, 111(3),335-346.

[26] Peng, G. F., Kang, Y. R., Huang, Y. Z., Liu, X. P., & Chen, Q. (2012). Experimental research on fire resistance of reactive powder concrete. Advances in Materials Science and Engineering, 2012.

[27] Pimienta, P., & Chanvillard, G. (2004, April). Retention of the mechanical performances of Ductal® specimens kept in various aggressive environments. In Conference on fib Symposium" Concrete structures: the challenge of creativity", Avignon, France.

[28] Khodabandeh, P. (2020). Experimental investigation of UHPC coating for corrosion protection of reinforced concrete induced by chloride ions. M.Sc. thesis in structural engineering. School of civil engineering, College of engineering, University of Tehran (in Persian).

[28] خدابنده، پیمان. (۱۳۹۸). بررسی آزمایشگاهی استفاده از روکش بتن فوق توانمند برای حفاظت از خوردگی میلگرد سازه‌های بتنی توسط یون کلرید. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی سازه. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

[29] BS 1881: Part 122. (2011). Testing concrete-Method for determination of water absorption. British Standard, 3(2014), 420–457.

[30] BS EN 12390-8. (2019). Testing hardened concrete-Depth of penetration of water under pressure. British-Adopted European Standard.

[31] ASTM C1202. (2012). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. American Society for Testing and Materials.

[32] AFPC-AFREM. (1997). Détermination de la Masse Volumique Apparente et de la Porosité Accessible à l'Eau, Méthodes Recommandées pour la Mesure des Grandeurs Associées à la Durabilité. Compte-rendu des Journées Techniques, Toulouse, pp. 121-124.

[33] Lee, G. C., Huang, C., Song, J., & O'Connor, J. S. (2014). Seismic Performance Evaluation of Precast Girders with Field-Cast Ultra High Performance Concrete (UHPC) Connections. MCEER.

[34] Ju, Y. Z., Wang, D. H., & Bai, J. (2013). Seismic performance of reactive powder concrete columns. Journal of Harbin Institute of Technology, 45(8), 111-116.
[35] Tong, X. L., Fang, Z., & Luo, X. (2016). Experimental study on seismic behavior of reactive powder concrete shear walls. Journal of Building Structures, 37(01), 21-30.
[36] Yoo, D. Y., & Banthia, N. (2017). Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast. Construction and building materials, 149, 416-431.
[37] Khanahmadi, Reza. (2019). impact behavior of ultra-high prformance concrete panels. M.Sc. thesis in structural engineering. School of civil engineering, College of engineering, University of Tehran (in Persian).
[37] خان احمدی، رضا. (۱۳۹۷). بررسی عملکرد پانل‌های بتن های فوق توانمند در برابر ضربه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی سازه. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
[38] Farnam, Y. (2008). Experimental and numerical study of impact behavior of high performance fiber reinforced cement based composite panels. M.Sc. thesis in hydraulic structures. School of civil engineering, College of engineering, University of Tehran (in Persian).
[38] فرنام، یعقوب. (۱۳۸۶). بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی رفتار پانل‌های بتن الیافی توانمند در برابر ضربه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته سازه‌های هیدرولیکی. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
[39] Habel, K., Denarié, E., & Brühwiler, E. (2007). Experimental Investigation of Composite Concrete and Conventional Concrete Members. ACI Structural Journal, (104), 93–101.
[40] Zhu, Y., Zhang, Y., Hussein, H. H., & Chen, G. (2020). Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using ultra-high performance concrete (UHPC): A state of the art review. Engineering Structures, 205, 110035.
[41] Jafarinejad, S. (2017). Experimental investigation on bond strength between normal concrete and Ultra-High Performance Concrete (UHPC). M.Sc. thesis in structural engineering. School of civil engineering, College of engineering, University of Tehran (in Persian).
[41] جعفری‌نژاد، سهیل. (۱۳۹۶). بررسی آزمایشگاهی مقاومت پیوستگی بین بتن معمولی و بتن فوق توانمند. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی سازه. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
[42] ASTM C1583. (2004). Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method). American Society for Testing and Materials.
[43] ASTM C882. (2013). Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used with Concrete by Slant Shear. American Society for Testing and Materials.
[44] ACI 546.3R-06. (2006). Guide for the selection of materials for the repair of concrete. American Concrete Institute (ACI).
[45] Habert, G., Denarié, E., Šajna, A., & Rossi, P. (2013). Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes. Cement and Concrete Composites, 38, 1–11.
[46] Hajiesmaeili, A., Pittau, F., Denarié, E., & Habert, G. (2019). Life Cycle Analysis of Strengthening Existing RC Structures with R-PE-UHPFRC. Sustainability, 11(24), 6923.
[47] Dong, Y. (2018). Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts. Construction and Building Materials, 167, 414–425.

[48] Almansour, H., & Lounis, Z. (2010). Innovative design approach of precast-prestressed girder bridges using ultra high performance concrete. Canadian Journal of Civil Engineering, 37(4), 511–521.
[49] Fan, W., Shen, D., Zhang, Z., Huang, X., & Shao, X. (2020). A novel UHPFRC-based protective structure for bridge columns against vehicle collisions: Experiment, simulation, and optimization. Engineering Structures, 207, 110247.
[50] Fan, W., Guo, W., Sun, Y., Chen, B., & Shao, X. (2018). Experimental and numerical investigations of a novel steel-UHPFRC composite fender for bridge protection in vessel collisions. Ocean engineering, 165, 1-21.
[51] Zou, X., & Wang, J. (2018). Experimental study on joints and flexural behavior of FRP truss-UHPC hybrid bridge. Composite Structures, 203, 414-424.
[52] Ren, L., Fang, Z., & Wang, K. (2019). Design and behavior of super-long span cable-stayed bridge with CFRP cables and UHPC members. Composites Part B: Engineering, 164, 72-81.
[53] Zhou, M., Lu, W., Song, J., & Lee, G. C. (2018, October 20). Application of Ultra-High Performance Concrete in bridge engineering. Construction and Building Materials. Elsevier Ltd.
[54] Graybeal, B., Brühwiler, E., Kim, B. S., Toutlemonde, F., Voo, Y. L., & Zaghi, A. (2020). International Perspective on UHPC in Bridge Engineering. Journal of Bridge Engineering, 25(11), 04020094.
[55] Yuan, Y., Wu, C., & Jiang, X. (2019). Experimental study on the fatigue behavior of the orthotropic steel deck rehabilitated by UHPC overlay. Journal of Constructional Steel Research, 157, 1-9.
[56] Shao, X., Qu, W., Cao, J., & Yao, Y. (2018). Static and fatigue properties of the steel-UHPC lightweight composite bridge deck with large U ribs. Journal of Constructional Steel Research, 148, 491-507.
[57] Zhang, X., Li, X., Liu, R., Hao, C., & Cao, Z. (2020). Dynamic properties of a steel–UHPC composite deck with large U-ribs: Experimental measurement and numerical analysis. Engineering Structures, 213, 110569.
[58] Zhang, Y., Zhu, Y., Yeseta, M., Meng, D., Shao, X., Dang, Q., & Chen, G. (2019). Flexural behaviors and capacity prediction on damaged reinforcement concrete (RC) bridge deck strengthened by ultra-high performance concrete (UHPC) layer. Construction and Building Materials, 215, 347-359.