Journal of Structural and Construction Engineering, 12(10), 2026, pp. 102-132

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

A review on the use of ultra-high performance concrete (UHPC) in urban infrastructures (bridges), along with case studies

Ali Eslamifar[1], Amir Ramezani[2] , Faramarz Moudi[3]

1- Master's Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
2- Master's Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
3- Faculty Member, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

The rapid emergence of advanced technologies has created a huge transformation in the construction industry and pushed it to a new stage. As one of the most advanced cement-based materials, ultra-high-performance concrete (UHPC) has not only broken the performance boundaries of traditional concrete but has also provided new possibilities in the field of designing and building structures. This type of concrete mixture, with a compressive strength higher than 150 MPa, high flexibility, and excellent durability, is known as an effective solution in improving the performance of structures and increasing their lifespan. This article has reviewed various aspects of UHPC. First, the wide applications of this type of concrete mixture and its constituent materials are mentioned. Then, the physical and mechanical characteristics of UHPC, including low porosity and resistance to harsh environmental conditions, have been analyzed. In the following, mixture proportions, mixing, and curing of this concrete mixture are reviewed in detail in order to get a better understanding of the challenges and opportunities in its production. In particular, this article has investigated the special applications of UHPC in the construction of bridges. Considering the need for strong and durable structures in construction projects, a case study on bridge construction projects that have used this type of concrete mixture is presented as examples of the practical successes of UHPC. These studies illustrate how this type of concrete mixture can increase safety, reduce maintenance costs, and improve efficiency in construction projects. Finally, the article emphasizes the importance of awareness and acceptance of UHPC among designers, engineers, and architects as well as seeks to create a positive attitude towards this innovative material and its effects on the construction industry. These efforts can contribute to sustainable development and optimization of construction processes and ultimately lead to the improvement of the quality of human life.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 November 2024
Revise Date: 31 December 2024
Accept Date: 06 April 2025

Keywords:
Ultra-High Performance Concrete Construction Industry Mix Design Durability Bridge

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.489463.3575

*Corresponding author: Dr. Faramarz Moudi
Email address: fmoodi@aut.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir
Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

مروری بر استفاده از بتن‌های فوق‌توانمند در زیرساخت‌های شهری (پل‌ها) به همراه مطالعه موردی

علی اسلامی‌فر[۱]، امیر رمضانی[۲]، فرامرز مودی[۳]

۱-دانشجوی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲-دانشجوی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳-استادیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

ظهور سریع فناوری‌های هوشمند، تحولی عظیم در صنعت ساخت و ساز ایجاد کرده و آن را به مرحله‌ای نوین سوق می‌دهد. بتن فوق توانمند (UHPC) به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین مواد بر پایه سیمان، نه تنها مرزهای عملکردی بتن‌های سنتی را شکسته، بلکه امکانات جدیدی را در زمینه طراحی و ساخت سازه‌ها فراهم آورده است. این نوع بتن، با مقاومت فشاری بالاتر از ۱۵۰ مگاپاسکال و دوام ممتاز به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر در بهبود عملکرد سازه‌ها و افزایش طول عمر آن‌ها شناخته می‌شود. این مقاله به‌طور مروری به بررسی جوانب مختلف بتن فوق توانمند پرداخته است. ابتدا، به کاربردهای وسیع این نوع بتن و مواد و مصالح تشکیل‌دهنده آن اشاره می‌گردد. سپس ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بتن فوق توانمند، از جمله تخلخل کم و مقاومت در برابر شرایط محیطی سخت، مورد تحلیل قرار گرفته است. در ادامه، فرآیند طرح اختلاط، نحوه‌ی ساخت و عمل‌آوری این بتن‌ها به‌طور دقیق بررسی می‌گردد تا درک بهتری از چالش‌ها و فرصت‌های موجود در تولید آن به‌دست آید. به طور ویژه، این مقاله به بررسی کاربردهای خاص بتن فوق توانمند در ساخت پل‌ها پرداخته است. با توجه به نیاز به سازه‌های مقاوم و بادوام در پروژه‌های عمرانی، مطالعه موردی بر روی پروژه‌های پل‌سازی که از این نوع بتن استفاده کرده‌اند، به‌عنوان نمونه‌هایی از موفقیت‌های عملی بتن فوق توانمند ارائه شده است. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که چگونه این نوع بتن می‌تواند به افزایش ایمنی، کاهش هزینه‌های نگهداری و بهبود کارایی در پروژه‌های عمرانی کمک کند. در نهایت، مقاله بر اهمیت آگاهی و پذیرش هر چه بیشتر بتن فوق توانمند در میان طراحان، مهندسان و معماران تأکید دارد و به‌دنبال ایجاد نگرشی مثبت نسبت به این ماده نوآورانه و تأثیرات آن بر صنعت ساخت‌وساز است. این تلاش‌ها می‌تواند به توسعه پایدار و بهینه‌سازی فرآیندهای ساخت کمک کند و در نهایت، به ارتقاء کیفیت زندگی انسان‌ها منجر شود.

کلمات کلیدی: بتن فوق توانمند، صنعت ساخت و ساز، طرح اختلاط، دوام، پل

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/jsce.2025.489463.3575
۱۴۰۳/۰۹/۰۳	۱۴۰۳/۱۰/۱۱	۱۴۰۴/۰۱/۱۷	۱۴۰۴/۰۱/۱۷	۱۴۰۴/۱۰/۳۰	doi: 10.22065/jsce.2025.489463.3575

*نویسنده مسئول: دکتر فرامرز مودی

پست الکترونیکی: fmoodi@aut.ac.ir

۱- مقدمه

بتن فوق توانمند[1](UHPC) ، بتن‌هایی بر پایه سیمان‌های کلینکری هستند که با ویژگی‌های مکانیکی عالی (مقاومت فشاری بالای ۱۵۰ مگاپاسکال) و دوام قابل توجه (برای مثال، قابلیت نفوذپذیری فوق‌العاده در برابر کلرید) توسعه یافته است [۱]. به دلیل خواص مکانیکی و دوام عالی، بتن فوق توانمند می‌تواند در سازه‌های خاصی که نیاز به ظرفیت باربری بالایی دارند، مورد استفاده قرار گیرد. این ماده می‌تواند از نفوذ مواد مهاجم جلوگیری کرده و عمر مفید ساختمان‌ها را حتی در محیط‌های پرریسک مانند چرخه‌های انجماد و ذوب افزایش دهد [۲]. برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ میلادی از بتن‌های فوق توانمند برای ساخت پل شربروک[2] در کانادا استفاده شد که این پل برای عبور عابرین پیاده و دوچرخه طراحی شده است [۳]. به طور کلی چهار رابطه میان تخلخل و مقاومت فشاری اجسام جامد موجود است که در ادامه روابط ۱تا۴ نشان داده شده است. در این روابط σ_0 بیانگر مقاومت فشاری در تخلخل صفر، P بیانگر تخلخل، P_0 بیانگر تخلخل در مقاومت صفر، σ بیانگر مقاومت فشاری در تخلخل P و $A.B.D$ ثابت‌های تجربی هستند. با توجه به روابط نشان داده شده، بتن‌های فوق توانمند برای داشتن مقاومت‌های بالای ۱۵۰ مگاپاسکال باید تخلخل و نفوذپذیری بسیار کمی داشته باشند که همین موضوع باعث می‌شود این نوع بتن‌ها دوام بسیار مناسبی در برابر محیط‌های خورنده دارا باشند. بتن‌های فوق توانمند را از جهت مواد تشکیل دهنده و کارکرد، می‌توان ترکیبی از بتن‌های الیافی(FRC)[3]، بتن‌های خود تراکم(SCC)[4] و بتن‌های توانمند(UHPFRC)[5] دانست، در شکل ۱ روابط بین بتن فوق توانمند با سایر بتن‌ها نمایش داده شده است [۲]. این پژوهش با استفاده از مقالات موجود به مواد و مصالح مورد نیاز، نحوه‌ی ساخت بتن‌های فوق توانمند، عمل آوری، چالش‌های موجود، محل‌های مورد استفاده و مزایا و معایب این نوع بتن‌ها را در مقایسه با سایر بتن‌ها شرح داده است و سپس در قسمت دوم به مطالعه موردی پل‌ها و سازه‌های ساخته شده پرداخته است و ویژگی‌های مهم در ساخت این پروژه‌ها را بررسی می‌گردد.

معادله بالشینز[6]:

$$\sigma = \sigma_0 \times (1-P)^A \qquad (۱-۱)$$

معادله ریشکویچ[7]:

$$\sigma = \sigma_0 \times e^{(-BP)} \qquad (۱-۲)$$

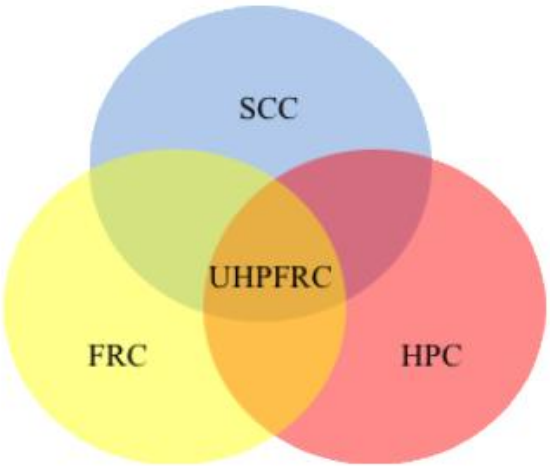
معادله شیلر[8]:

$$\sigma = D \times \ln\left(\frac{p_0}{P}\right) \qquad (۱-۳)$$

معادله هاسلمن[9]:

$$\sigma = \sigma_0 \times (1-AP) \qquad (۱-۴)$$

[1] Ultra-High-Performance Concrete
[2] Sherbrooke
[3] Fiber-Reinforced Concrete
[4] Self-Consolidating Concrete
[5] Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete
[6] Balshin
[7] Ryshkevitch
[8] Schiller
[9] Hasselmann



شکل 1 - شماتیکی از نحوه‌ی ارتباط بتن‌های فوق توانمند با سایر بتن‌ها [۲].

۲- ارزیابی وضع کنونی بتن‌های فوق توانمند

در بیست سال گذشته با توجه به مشکلات جدی به وجود آمده در اکثر ساختمان‌ها و سازهای بتنی که در معرض محیط‌های خورنده ساخته شده‌اند، علاقه به ساخت سازه‌های بزرگ و با معماری متفاوت که نیازمند المان‌های سازه‌ای با مقاومت بالا می‌باشند افزایش یافته است. همچنین نیاز به افزایش عمر مفید یک سازه برای توسعه پایدار و کاهش هزینه‌های چرخه عمر یک سازه در برابر چالش‌های زیست محیطی فراوان و نیاز به کاهش تولید و مصرف سیمان که به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تولید گاز کربن دی اکسید در جهان شناخته می‌شود، مهندسین و افراد شاغل در صنعت ساخت و ساز را به تولید و استفاده از بتن‌های با دوام و با عمر مفید بالا سوق داده است که باعث شده است تحقیقات گسترده‌ای روی بتن‌های فوق توانمند صورت بگیرد و در ابعاد بسیار گسترده‌ای این بتن‌ها ساخته و مصرف شوند [۴, ۵]. در واقع این دیدگاه بین مهندسین حاکم شده است که به جای اینکه یک سازه با هزینه ساخت پایین و با کیفیت نامطلوب ساخته شود که پس از مدت زمان اندکی نیاز به تعمیر و تقویت دارد و هزینه‌ی زیادی را متحمل می‌کند، از ابتدا یک سازه با کیفیت و با دوام بالایی ساخته شود که نیاز به تعمیر و نگهداری در آن کمتر است و عمر مفید آن بیشتر می‌باشد، همچنین باید تمام هزینه‌های چرخه عمر در ساخت یک سازه در نظر گرفته شود [۶].

۳- موارد کاربرد بتن‌های فوق توانمند

بتن‌های فوق توانمند (UHPC) به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، در ساخت انواع سازه‌ها و اجزای مختلف سازه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نوع بتن به دلیل مقاومت بالای فشاری، دوام عالی و ویژگی‌های رئولوژیکی خاص، در پروژه‌های بزرگ و پیچیده به‌ویژه در شرایط محیطی سخت به کار رفته است. در اینجا برخی از مهم‌ترین کاربردهای بتن‌های فوق توانمند به‌طور مفصل بررسی شده است:

- **ساخت پل‌ها** :بتن فوق توانمند به‌طور خاص در ساخت پل‌ها به‌کار گرفته شده است. استفاده از این نوع بتن موجب شد که پل‌های ساخته‌شده حدود ۵۰٪ سبک‌تر از پل‌های ساخته‌شده با بتن‌های معمولی باشند. علاوه بر این، میزان فولاد مورد استفاده در این پل‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافت که نتیجه آن کاهش وزن مرده پل و در نتیجه کاهش بارهای وارد بر سازه بود [۷].
- **فونداسیون سازه‌های بزرگ** :در فونداسیون‌های سازه‌های بزرگ، بتن‌های فوق توانمند به‌دلیل ویژگی‌هایی همچون کاهش ضخامت و افزایش دوام، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. این خصوصیات باعث شد که سازه‌های بزرگ با استفاده از این نوع بتن به‌طور مؤثری مقاوم‌تر و پایدارتر شوند [8].

- **سازه‌های ساخته‌شده در محیط‌های خورنده** :یکی از ویژگی‌های بارز بتن‌های فوق توانمند، نفوذپذیری کم و دوام بالا است. این ویژگی‌ها موجب شدند که از بتن‌های فوق توانمند در سازه‌هایی که در معرض شرایط خورنده قرار دارند، استفاده شود. بتن‌های UHPC به‌ویژه در محیط‌های شیمیایی و خورنده مانند ساحل‌ها، پل‌ها و سایر سازه‌های زیرآبی عملکرد بسیار خوبی داشتند [۹].
- **روسازی راه‌ها** :در لایه‌های سطحی روسازی راه‌ها، بتن‌های فوق توانمند به‌دلیل مقاومت و دوام بالای خود، به‌طور گسترده‌ای به‌کار گرفته شدند. این نوع بتن توانست در برابر ترافیک سنگین و شرایط سخت جوی مقاومت کند و به‌طور قابل‌توجهی عمر مفید جاده‌ها و باندهای فرودگاه افزایش یابد [10].
- **تعمیر و تقویت قطعات آسیب‌دیده** :بتن فوق توانمند در تعمیر و تقویت قطعات آسیب‌دیده نیز به‌طور مؤثری به کار رفت. این نوع بتن به دلیل ویژگی‌های مکانیکی عالی و قابلیت پذیرش بارهای سنگین، برای بازسازی سازه‌های قدیمی یا آسیب‌دیده به‌طور مؤثر استفاده شد [۱۱].
- **اتصال قطعات پیش‌ساخته** :از بتن‌های فوق توانمند برای اتصال قطعات پیش‌ساخته به یکدیگر نیز استفاده شده است. مقاومت و دوام بالای این بتن‌ها در برابر بارهای اعمالی و شرایط محیطی باعث شد که این نوع بتن در پروژه‌های پیش‌ساخته و پیش‌تنیده به‌ویژه در ساخت پل‌ها و ساختمان‌ها بسیار محبوب گردد [۱۲].
- **ساخت قطعات پیش‌ساخته** :از دیگر کاربردهای بتن فوق توانمند، به‌کارگیری آن در ساخت قطعات پیش‌ساخته است. این قطعات شامل اجزای مختلفی از سازه‌ها نظیر تیرها، ستون‌ها و دال‌ها می‌باشند که با استفاده از بتن‌های UHPC تولید شدند تا علاوه بر دوام بالا، وزن سبک‌تری داشته باشند [۱۲].

به‌طور کلی، بتن‌های فوق توانمند به‌عنوان یک ماده ساختمانی با ویژگی‌های منحصر به فرد، نقش اساسی در توسعه سازه‌های مقاوم، پایدار و با دوام ایفا کردند و کاربردهای آن‌ها در پروژه‌های عمرانی به‌طور فزاینده‌ای در حال گسترش است.

۴- مواد و مصالح تشکیل دهنده بتن‌های فوق توانمند

مواد و مصالح تشکیل‌دهنده بتن‌های فوق توانمند (UHPC) به دقت انتخاب شده‌اند تا ویژگی‌های مطلوبی از جمله مقاومت فشاری بالا، دوام عالی و قابلیت‌های رئولوژیکی مناسب را فراهم آورند. ترکیب این مواد به‌طور ویژه به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد بتن در شرایط مختلف طراحی شده است. مواد و مصالح تشکیل‌دهنده بتن‌های فوق توانمند به شرح زیر است [۲]:

- **سیمان** : سیمان‌های مورد استفاده در بتن‌های فوق توانمند، عمدتاً از نوع تیپ ۵۲۵-۱ یا ۵۲۵-۲ هستند. در برخی موارد، از سیمان تیپ ۱ یا ۲ با ریزی حداقل ۳۵۰۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع نیز استفاده شده است.
- **سنگدانه‌ها** : سنگدانه‌های ریز کوارتزی و گرانیتی با اندازه‌های ۰.۱۵ تا ۰.۶ میلی‌متر به‌عنوان یکی از اجزای اصلی بتن‌های فوق توانمند به‌کار گرفته شده‌اند. این سنگدانه‌ها به‌دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب، نقش مهمی در ایجاد ریزساختار متراکم و مقاوم دارند.
- **پرکننده** : پرکننده‌ها، که معمولاً شامل پودر سنگدانه کوارتزی یا سیلیکا فلور هستند، به بتن اضافه شده‌اند تا ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن را بهبود بخشند و به کاهش تخلخل کمک کنند.
- **دوده سیلیس یا پوزولان‌ها** : دوده سیلیس یا سایر پوزولان‌های با واکنش‌پذیری بالا به‌منظور بهبود واکنش‌های شیمیایی در بتن و افزایش دوام آن به‌ویژه در برابر حمله عوامل خورنده به بتن افزوده شده‌اند.
- **فوق روان‌کننده‌ها** : برای بهبود ویژگی‌های رئولوژیکی و افزایش کارایی بتن، فوق روان‌کننده‌ها به‌طور گسترده‌ای در تولید بتن‌های فوق توانمند استفاده شده‌اند. این مواد به بتن کمک کرده‌اند تا ویژگی‌هایی چون خودریختگی و خودفشردگی را به‌دست آورد.

- **الیاف فلزی** : الیاف فلزی به‌منظور افزایش شکل‌پذیری و بهبود محصورشدگی بتن به آن افزوده شده‌اند. این الیاف به‌ویژه در بهبود خواص کششی و مقاومت بتن در برابر ترک‌خوردگی تأثیرگذار هستند. با این حال، در برخی از نمونه‌ها، از الیاف فلزی استفاده نشده است، چرا که می‌توان بتن‌های فوق توانمند را بدون آن‌ها نیز تولید کرد.

در مجموع، ترکیب این مواد با نسبت‌های دقیق و خاص، باعث شده است که بتن‌های فوق توانمند ویژگی‌هایی چون مقاومت بالا، دوام طولانی و عملکرد مناسب در شرایط سخت محیطی داشته باشند.

۵- مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن‌های فوق توانمند

مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن‌های فوق توانمند در جدول شماره ۱ ارائه شده است. همچنین، به‌منظور مقایسه، مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن‌های معمولی و توانمند نیز در این جدول گنجانده شده‌اند. این مقایسه به‌گونه‌ای طراحی شده است که امکان ارزیابی دقیق‌تری از تفاوت‌ها و مزایای بتن فوق توانمند در مقایسه با بتن‌های معمولی و توانمند فراهم شود.

جدول 1 مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن‌های معمولی، توانمند و فوق توانمند [۱۳].

مشخصه	واحد	کدهای استاندارد	بتن معمولی (NSC)	بتن توانمند (HPC)	بتن فوق توانمند با کارایی بالا (UHPFRC)
چگالی ویژه[10]	کیلوگرم بر متر مکعب	[14]	2300	2400	2350-2450
مقاومت فشاری استوانه‌ای[11]	مگاپاسکال	[15]	20-50	50-100	120-160
مقاومت فشاری مکعبی[12]	مگاپاسکال	[16]	20-50	50-100	130-170
ضریب خزش در ۲۸ روز[13]	-	[17]	2-5	1-2	0.2-0.5
جمع شدگی پس از عمل آوری[14]	میکرواسترین	[17]	1000-2000	500-1000	کوچکتر از ۱۰۰
مدول الاستیسیته[15]	گیگاپاسکال	[18]	20-35	35-40	40-50
نسبت پواسون[16]	-	[18]	0.2	0.2	0.18-0.2
مقاومت کششی شکاف استوانه‌ای[17]	مگاپاسکال	[19, 20]	2-4	4-6	5-10
مقاومت نهایی شکاف استوانه‌ای[18]	مگاپاسکال	[19, 20]	2-4	4-6	10-18
مقاومت خمشی ترک خوردگی اول[19]	مگاپاسکال	[21]	2.5-4	4-8	8-9.3
مدول گسیختگی خمشی[20]	مگاپاسکال	[21]	2.5-4	4-8	18-35
انرژی شکست خمشی[21] (۰.۴۶ میلی‌متر)	نیوتن بر میلی‌متر	[21]	کوچکتر از ۰.۱	کوچکتر از ۰.۲	1-2.5
انرژی شکست خمشی (۳ میلی‌متر)	نیوتن بر میلی‌متر	[21]	کوچکتر از ۰.۱	کوچکتر از ۰.۲	10-20
انرژی شکست خمشی (۱۰ میلی‌متر)	نیوتن بر میلی‌متر	[21]	کوچکتر از ۰.۱	کوچکتر از ۰.۲	15-30
شاخص چقرمگی[22] I_5	-	[21]	1	1	4-6

[10] Specific Density
[11] Cylinder Compressive Strength
[12] Cube Compressive Strength
[13] Creep Coefficient at 28 days
[14] Post-Cured Shrinkage
[15] Modulus of Elasticity
[16] Poisson's Ratio
[17] Split Cyl. Cracking Strength
[18] Split Cyl. Ultimate Strength
[19] Flexural 1st Cracking Strength
[20] Modulus of Rupture
[21] Bending Fracture Energy
[22] Toughness Indexes

شاخص چقرمگی I_{10}	-	[21]	1	1	10-15
شاخص چقرمگی I_{20}	-	[21]	1	1	20-35
نفوذپذیری سریع کلر[23]	کولمب	[22]	2000-4000	500-1000	کوچکتر از ۲۰۰
ضریب نفوذ کلر[24]	میلی‌متر مربع بر ثانیه	[23]	$4-8\times10^{-6}$	$1-4\times10^{-6}$	$0.05\text{-}0.1\times10^{-6}$
عمق کربناسیون[25]	میلی‌متر	[24]	5-15	1-2	کوچکتر از ۰.۱
مقاومت سایشی[26]	میلی‌متر	[25]	0.8-1.0	0.5-0.8	کوچکتر از ۰.۰۳
جذب آب[27]	درصد	[26]	بزرگتر از ۳	1.5-3.0	کوچکتر از ۰.۲

۶- طرح اختلاط و نحوه‌ی ساخت بتن‌های فوق توانمند

طرح اختلاط بتن‌های فوق‌توانمند مشابه بتن‌های معمولی می‌باشد با این تفاوت که نسبت آب به سیمان که یکی از مهم‌ترین عوامل موثر در مقاومت فشاری بتن می‌باشد، بین ۰.۱۵ تا ۰.۲۵ می‌باشد و مواد سیمانی آن ترکیبی متشکل از سیمان کیلینکری و دوده سیلیس است که می‌توان دوده سیلیس را با سایر مواد پوزولانی با واکنش پذیری بالا جایگزین کرد. طبق آیین‌نامه ACI 239R-18 می‌توان از دو طرح اختلاط جدول شماره ۲ به عنوان حدس اولیه استفاده کرد ولی باید توجه کرد به دلیل تفاوت در کیفیت و مشخصات مصالح مورد استفاده برای به دست آوردن طرح اختلاط مناسب، باید انواع طرح‌های اختلاط در آزمایشگاه ساخته و بررسی شوند.

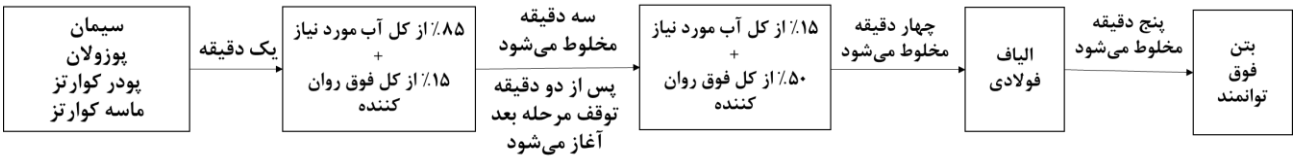
جدول2 - دو طرح اختلاط بتن‌های فوق‌توانمند با نسبت‌های وزنی برای حدس اولیه.[27]

جزء بتن	مخلوط ۱	مخلوط ۲
سیمان	1	1
میکروسیلیس	0.325	0.389
ماسه	1.432	0.967
پودر کوارتز یا آرد سیلیس	0.3	0.277
فوق روان‌کننده	0.027	0.017
آب	0.28	0.208
الیاف فولادی	0.2	0.31

برای ساخت بتن‌های فوق‌توانمند، نیاز به میکسرهایی با توان و نیروی برشی بالا احساس شد تا بتوانند آب را به‌خوبی در مخلوط پخش کرده و بر اصطکاک موجود بین ذرات مخلوط غلبه کنند. به‌دلیل عدم وجود سنگدانه‌های درشت در این نوع بتن‌ها، اصطکاک زیادی بین ذرات مخلوط مشاهده شد. در ابتدا، تمام مواد خشک شامل سیمان، دوده سیلیس، پرکننده و سنگدانه‌های ریز کوارتزی به داخل میکسر ریخته شده و به‌خوبی با هم مخلوط شدند. پس از اطمینان از اختلاط کامل ذرات، آب و فوق‌روان‌کننده‌ها به‌آرامی به مخلوط اضافه شدند و عملیات اختلاط تا زمانی که مخلوط حالت مایع به خود بگیرد، ادامه یافت. در صورت نیاز، الیاف فلزی به مخلوط اضافه گردید و پس از پراکنده‌شدن کامل الیاف در مخلوط، عملیات ساخت پایان یافت. مدت زمان ساخت بتن بسته به توان میکسر متفاوت بود؛ در میکسرهای با توان بالا، چند دقیقه و در میکسرهای با توان پایین، حدود ۲۰ دقیقه زمان صرف شد. کنترل دمای مخلوط به‌طور مداوم انجام گرفت تا از ایجاد ترک‌های ناشی از گرادیان حرارتی جلوگیری شود. به‌دلیل ریزدانه بودن سیمان و استفاده از دوده سیلیس در این بتن‌ها،

[23] Rapid Chloride Permeability
[24] Chloride Diffusion Coefficient
[25] Carbonation Depth
[26] Abrasion Resistance
[27] Water Absorption

میزان حرارت تولیدی در اثر هیدراتاسیون بالا بود. برای جلوگیری از ترک‌خوردگی در سنین اولیه بتن، توصیه شد که آب مخلوط به‌صورت یخ به‌کار گرفته شود [۲۷]. روش دیگری برای ساخت بتن‌های فوق‌توانمند، براساس مقالات موجود، ارائه شده است که در شکل۲ نشان داده شده است. در این روش از هابروت میکسر[۲۸] با توان ۱۴۰ دور بر دقیقه استفاده شده و زمان ساخت بتن حدود ۱۵ دقیقه برآورد شد.

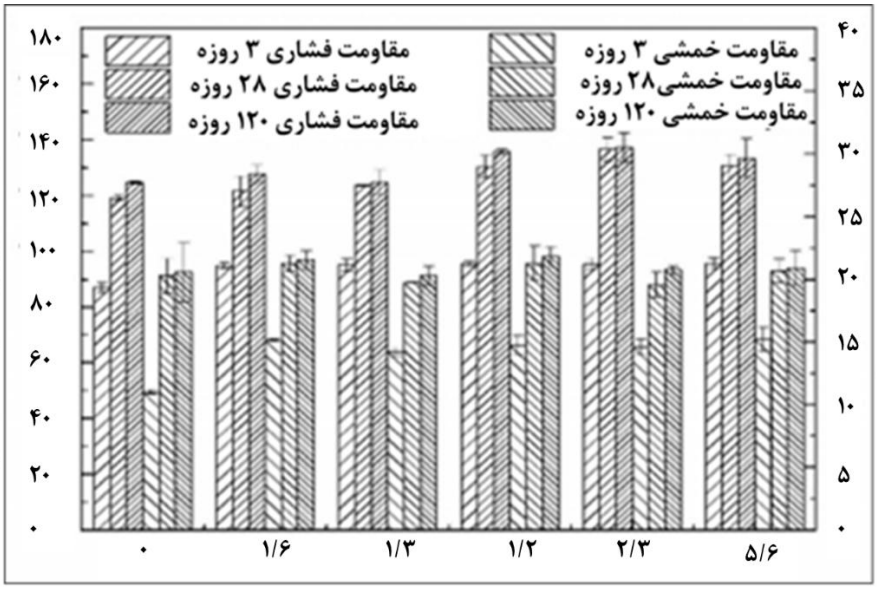


شکل۲ - نحوه‌ی ساخت بتن‌های فوق‌توانمند با استفاده از هابروت میکسر با توان ۱۴۰ دور بر دقیقه [۲۸].

۷- عمل‌آوری بتن‌های فوق توانمند

عمل‌آوری بتن‌های فوق‌توانمند با توجه به کاربرد و مصالح مورد استفاده، به‌صورت متفاوتی انجام گرفته است. به‌طور مثال، در برخی از موارد، نمونه‌های بتنی در سنین اولیه حین عمل‌آوری تحت حرارت، فشار، یا هر دو قرار داده شده‌اند تا وزن مخصوص بتن افزایش یابد، هوای محبوس و آب اضافی از بتن خارج شود و فرآیند جمع‌شدگی تسریع گردد. این شرایط مطابق نظر طراح اعمال شده است. طبق آیین‌نامه ACI 239R-18 ، توصیه شد که بتن‌های فوق‌توانمند ساخته‌شده به مدت ۴۸ ساعت در شرایط اشباع و با رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد، در دمای معمولی (۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد) عمل‌آوری شوند. سپس، به مدت ۴۸ ساعت دیگر تحت شرایط مرطوب و در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شوند، به‌طوری که در این دما واکنش‌های پوزولانی تسریع شوند و ریزساختار خمیر سیمان تقویت گردد. در مواردی که پوزولان‌های دیگری به‌جای دوده سیلیس به‌کار گرفته شدند، با توجه به تفاوت واکنش‌پذیری، مدت زمان عمل‌آوری افزایش یافت. براساس تحقیقات انجام‌شده، استفاده از پوزولان‌های متخلخل مانند خاکستر پوسته برنج، زئولیت، تراس و پومیس در ساختار بتن‌های فوق‌توانمند، عمل‌آوری درونی بتن را بهبود بخشید. این پوزولان‌ها هنگام اختلاط به‌دلیل ساختار متخلخل، آب مخلوط را جذب کرده و با گذشت زمان، آب را به مخلوط بازپس داده‌اند، که این امر باعث افزایش رطوبت نسبی داخل بتن و هیدراته‌شدن بیشتر ذرات سیمان گردیده و تولید ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) را افزایش داده است. در سال ۲۰۱۷، هانگ هونگ هانگ و همکارانش مطالعاتی بر روی عمل‌آوری درونی بتن‌های فوق‌توانمند انجام دادند. آن‌ها با جایگزینی نسبی خاکستر پوسته برنج به‌جای دوده سیلیس مشاهده کردند که نمونه‌های ساخته‌شده با خاکستر پوسته برنج دارای مقاومت فشاری و خمشی بیشتری بودند. نتایج این بررسی در شکل۳ نشان داده شده است [۲۸].

[28] Hobart mixer (5 I)



شکل ۳ - مقاومت فشاری و خمشی بتن‌های فوق توانمند ساخته شده با جایگزین کردن خاکستر پوسته برنج به جای دوده سیلیس [۲۹].

۸- نکات اجرایی بتن‌های فوق توانمند

برای استفاده بهینه از بتن‌های فوق‌توانمند، چندین نکته اجرایی مهم در فرآیند ساخت و اجرای آن‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. در ابتدا، کیفیت سیمان به‌کار رفته بررسی می‌شود تا از استاندارد بودن آن اطمینان حاصل شود. به همین منظور، مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان پیش از استفاده در آزمایشگاه ارزیابی می‌شود. در استفاده از فوق روان‌کننده‌ها نیز دقت لازم به‌کار گرفته می‌شود تا از بروز جداشدگی یا تأخیر در گیرش جلوگیری گردد. با توجه به نوع سیمان استفاده شده در ساخت بتن‌های فوق‌توانمند، که دارای حداقل ریزی ۳۵۰۰ کیلوگرم بر سانتیمترمکعب است، احتمال تأخیر در گیرش کاهش می‌یابد. افزودن الیاف فلزی به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌شود که از کاهش کارایی مخلوط جلوگیری شود. همچنین، دمای مخلوط در طی فرآیند ساخت به‌صورت مداوم کنترل می‌گردد تا از بروز ترک‌های ناشی از حرارت جلوگیری شود. به دلیل شباهت بتن‌های فوق‌توانمند به بتن‌های خودتراکم، توصیه می‌شود که از دستگاه ویبره برای تأمین تراکم کافی استفاده گردد و زمان ویبره به مدت ۲۰ تا ۳۰ ثانیه پیشنهاد می‌شود. استفاده از پرکننده نیز در این نوع بتن اهمیت ویژه‌ای دارد؛ پرکننده نه‌تنها موجب افزایش لزجت و جلوگیری از جداشدگی مخلوط می‌شود، بلکه با پر کردن فضای خالی میان ذرات، پیوستگی بیشتری در ساختار بتن ایجاد می‌کند [۲۹].

۹- مزایا و معایب

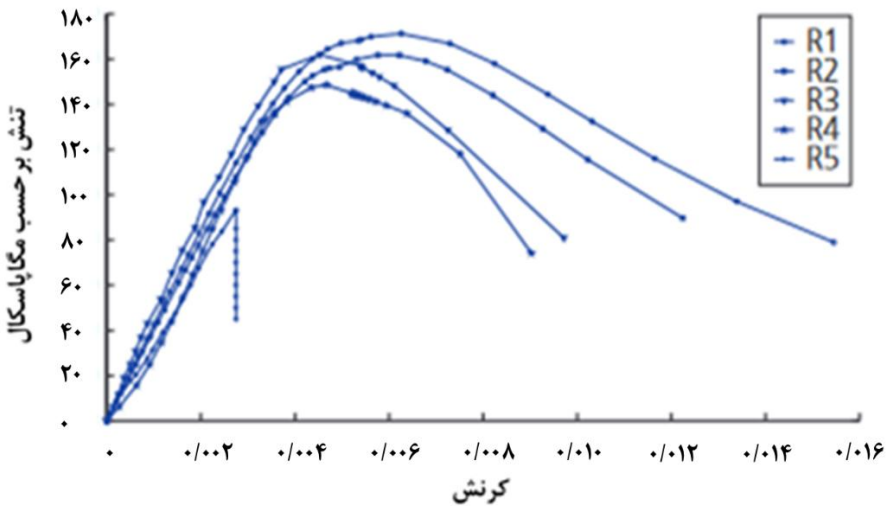
استفاده از بتن‌های فوق توانمند چندین مزیت کلیدی به همراه دارد. ابعاد اجزای سازه‌ای کاهش یافته و فضای موجود به حداکثر استفاده می‌رسد. همچنین، دوام و عمر مفید سازه یا المان‌های سازه‌ای افزایش می‌یابد. این ویژگی‌ها امکان ساخت سازه‌های بزرگ با طراحی‌های معماری متنوع و ساخت المان‌های سازه‌ای با مقاومت بالا را فراهم می‌کنند. به دلیل نسبت پایین آب به سیمان در این نوع بتن، میزان جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن کاهش می‌یابد. مقاومت کششی بالای بتن‌های فوق توانمند مانع از ترک‌خوردگی‌های حرارتی و جمع‌شدگی می‌شود و در طراحی سازه‌ها، مقاومت کششی و خمشی این نوع بتن در نظر گرفته می‌شود. با کاهش وزن مرده و افزایش مقاومت اجزای سازه‌ای، امکان ساخت پل‌ها با طول دهانه‌های بزرگ‌تر نیز فراهم می‌گردد [۳۰].

با وجود مزایای متعدد، هزینه ساخت بتن‌های فوق توانمند بالاست و این مسئله به عنوان یکی از چالش‌ها مطرح می‌شود. همچنین، مقدار جمع‌شدگی خودزا در این نوع بتن زیاد است. استفاده از سیمان به عنوان یکی از مواد چسباننده، با مشکلات زیست‌محیطی

همراه است. اگر از الیاف فلزی در ساخت این بتن استفاده نشود، شکل‌پذیری بتن کاهش یافته و احتمال شکست ترد در المان‌ها و سازه‌ها افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۵، پروبهات رانجان پرم و همکارانش پژوهشی درباره این مسئله انجام دادند که طرح‌های اختلاط ساخته شده در این تحقیق در جدول ۳ و نتایج آن در شکل۴ ارائه شده است [۳۱].

جدول3 – طرح‌های اختلاط ساخته شده [۳۳].

شماره مخلوط	سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	دوده سیلیس (کیلوگرم بر متر مکعب)	پودر کوارتز (کیلوگرم بر متر مکعب)	سنگدانه ریز (کیلوگرم بر متر مکعب)	آب (متر مکعب)	فوق روان‌کننده (متر مکعب)	نوع الیاف	درصد حجمی الیاف	نسبت آب به سیمان
R1	788	197	315	866.8	173	14.77	SF1	2.5	0.22
R2	788	197	315	866.8	173	14.77	SF1	2	0.22
R3	788	197	315	866.8	173	14.77	SF2	2.5	0.22
R4	788	197	315	866.8	173	14.77	SF2	2	0.22
R5	788	197	315	866.8	173	14.77	-	-	0.22



شکل 4– نمودار تنش و کرنش بتن‌های فوق توانمند ساخته شده [۳۱].

جدول4 – پروژه‌های ساخته شده توسط بتن‌های فوق توانمند [۲۹].

شماره پروژه	مکان	کاربرد	سال ساخت	مزایای بتن فوق توانمند
1	Sherbrooke, Canada	پل عابر پیاده	1997	اولین سازه UHPC
2	Bourg-les-Valence, France	پل جاده‌ای	2005	کاهش ۹۰ درصدی فولاد تقویت‌کننده، وزن ۶۶٪ کمتر نسبت به بتن معمولی

3	Seonyu, Seoul, South Korea	پل عابر پیاده	2004	پل قوسی با قطعات کاهش‌یافته
4	Mars Hill Bridge, United States	پل جاده‌ای	2006	اولین پل بزرگراهی UHPC در ایالات متحده، ساخت ساده، نیازی به تقویت برشی
5	Foundation Louis Vuitton, France	روکش	2014	طراحی نوآورانه، پانل‌های UHPC
6	MUCEM, Marseille, France	ستون و نما	2013	طراحی منحصر به فرد، ستون Y شکل، نمای شفاف
7	Shawnessy LRT Station, Canada	سقف	2004	نیاز به نگهداری کم، وزن سبک، ساخت آسان
8	Jean Bouin Stadium, Paris	سقف و نما	2013	عناصر پیش‌ساخته UHPC ، سقف و نمای ضد آب، سازه باریک با طراحی منحصر به فرد

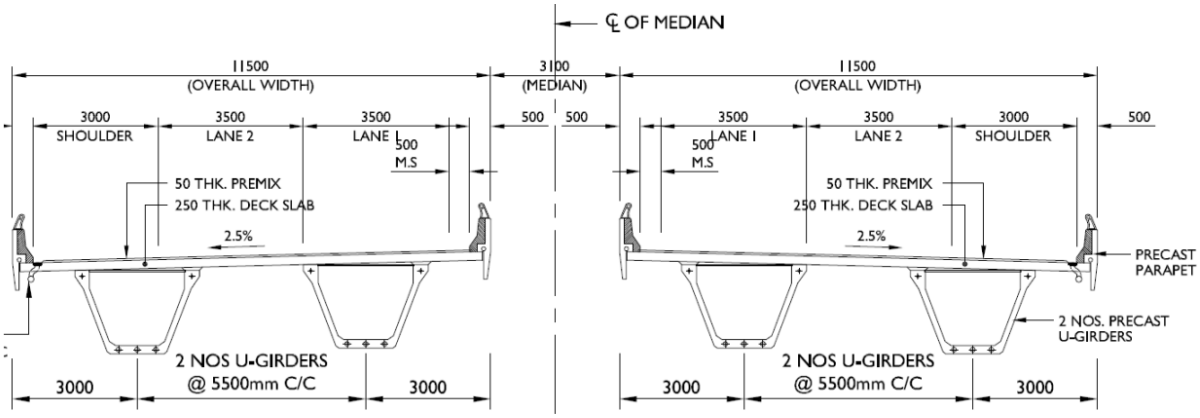
۱۰- مطالعات موردی

- **پل KT-BypassST3**

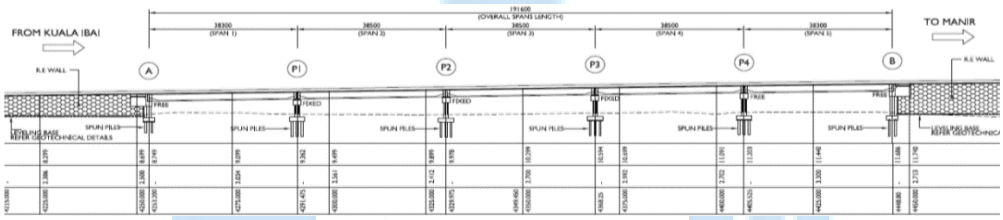
پل **KT-BypassST3** که در شهر **کوالا ترنگگانو**[۲۹] در مالزی قرار دارد، در سال ۲۰۱۸ تکمیل شد. این پل دارای طول کلی ۶,۱۹۱ متر بوده و به‌صورت دهانه‌های **u** شکل پیش‌ساخته و پیش‌تنیده از بتن فوق توانمند اجرا گردیده است. هدف از احداث این پل، انتقال بارهای ترافیکی می‌باشد. این سازه به دو خط عبور مجزا تقسیم شده که عرض هر خط ۵.۱۱ متر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل۶ مشاهده می‌شود، هر خط عبور از دو قطعه پیش‌ساخته و پیش‌تنیده به شکل **u** تشکیل شده که توسط عرشه‌ی پل به یکدیگر متصل شده‌اند. عرشه‌ی پل از بتن مسلح با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال و ضخامت ۲۵۰ میلی‌متر تشکیل شده و به‌صورت درجا ساخته شده است. همچنین، عرشه‌ی پل دارای شیب معکوس ۵.۲ درصد جهت تخلیه‌ی آب‌های سطحی می‌باشد. برای جزئیات بیشتر، همان‌طور که در شکل۷ نشان داده شده، پل **KT-BypassST3** شامل ۵ دهانه ۳۸ متری است. در ابتدا و انتهای هر دهانه، یک تیر بتنی درجا برای استقرار قطعات پیش‌ساخته اجرا شده است. این تیرها بر روی پایه‌های پل قرار گرفته‌اند و وظیفه انتقال بارهای وارد بر پل به زمین را بر عهده دارند [۳۲].

شکل ۵ - نمایی از پل KT-BypassST3 [۳۲].

[29] Kuala Terengganu

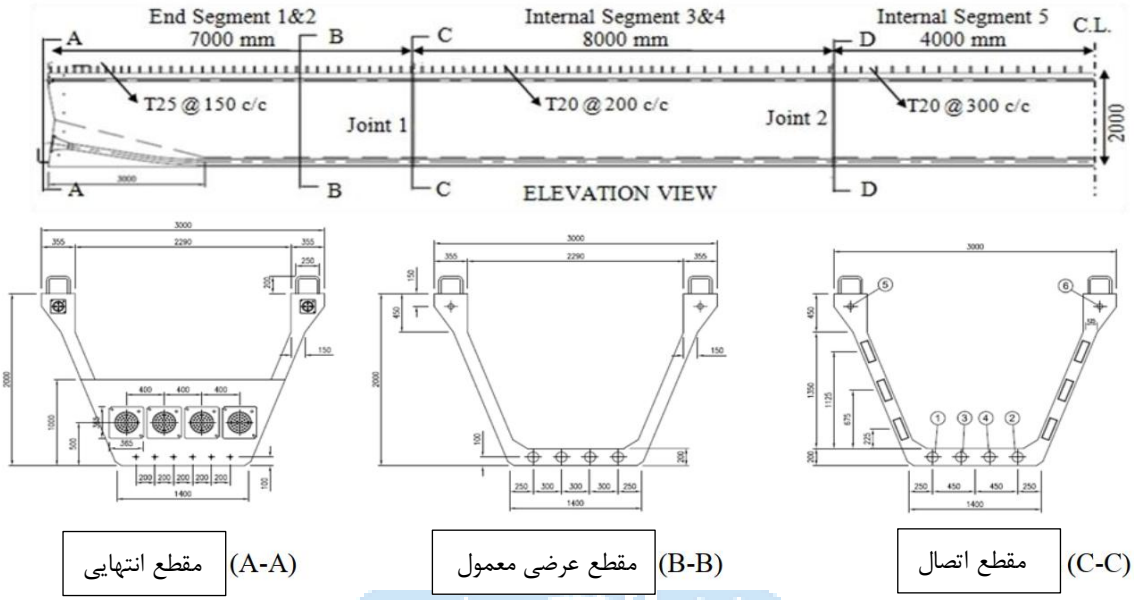


شکل ٦ - مقطع عرضی پل KT-BypassST3 [32].



شکل ۷ – پروفیل طولی پل KT-Bypass ST3 [۳۲].

هر دهانه ۳۸ متری پل از سه بخش پیش‌ساخته **u** شکل به طول ۸ متر (با وزن هر بخش برابر ۱۸ تن) و دو بخش پیش‌ساخته **u** شکل به طول ۷ متر (با وزن هر بخش برابر ۶.۱۶ تن) تشکیل شده که در مجموع، یک تیر واحد را شکل می‌دهند. قطعات ۷ متری در انتهای هر طرف دهانه قرار داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده، برای اطمینان از پیوستگی بین قطعات پیش‌ساخته **u** شکل و عرشه پل و همچنین مقاومت در برابر برش افقی، آرماتورهایی به‌صورت **u** معکوس در بالای قطعات پیش‌ساخته تعبیه شده است. جهت اتصال این قطعات پیش‌ساخته به یکدیگر، از سیستم زبانه و حفره استفاده شده که در هر قطعه پیش‌ساخته، یک سمت آن زبانه و سمت دیگر دارای حفره طراحی گردیده تا امکان اتصال قطعات به یکدیگر فراهم شود. برای اعمال نیروی پیش‌تنیدگی نیز، از روش پس‌کشیده بهره گرفته شده است و محل کابل‌های پیش‌تنیدگی که در بالا و پایین قطعه پیش‌ساخته قرار دارند، در زمان ساخت این قطعات در نظر گرفته شده است [32].



شکل ۸- جزئیات قطعات پیش‌ساخته در دهانه ۳۸ متری [۳۲].

طرح اختلاط قطعات پیش‌ساخته **u** شکل برای هر متر مکعب از بتن فوق‌توانمند در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نسبت آب به سیمان برابر با ۰.۱۹ در نظر گرفته شده و از مقدار قابل‌توجهی فوق روان‌کننده استفاده گردیده است. همچنین، اندازه سنگدانه‌های به‌کاررفته برای ساخت بتن فوق‌توانمند بین ۰ تا ۶ میلی‌متر تعیین شده که نشان‌دهنده استفاده از سنگدانه‌های ریز و پرکننده در ساخت این نوع بتن است. علاوه بر این، دوده سیلیس به عنوان مواد سیمانی به‌کار برده شده و الیاف نیز برای افزایش شکل‌پذیری استفاده شده است و همچنین مشخصات مکانیکی ۲۰ قطعه پیش ساخته u شکل در جدول ۶ آورده شده است [۳۲].

جدول5 - طرح اختلاط بتن فوق‌توانمند برای قطعات پیش ساخته u شکل [32].

جزء بتن	مقدار (کیلوگرم بر متر مکعب)	واحد
سیمان	1114	kg/m³
دوده سیلیس	169	kg/m³
سنگدانه ریز (۰-۶ میلی‌متر)	1072	kg/m³
الیاف	234	kg/m³
فوق روان‌کننده	40	kg/m³
آب	209	kg/m³

نسبت آب به سیمان	0.19	-

جدول 6 – مشخصات مکانیکی ۲۰ قطعه پیش ساخته u شکل برحسب مگاپاسکال [۳۲].

قطعه	$f_{cm,cu,1d}$[1]	$f_{cm,cu,28d}$[2]	$f_{ctm,el}$[3]	f_{ctfm}[4]	$f_{ctm,fl}$[3]	قطعه	$f_{cm,cu,1d}$[1]	$f_{cm,cu,28d}$[2]	$f_{ctm,el}$[3]	f_{ctfm}[4]	$f_{ctm,fl}$[3]
۱	۹۲	۱۶۹	۸.۶۷	۹.۳	۳۲.۶	۱۱	۸۴	۱۷۲	۱۱.۳	۱۰.۸	۳۲.۴
۲	۸۵	۱۶۵	۱۰	۹.۷	۳۲.۴	۱۲	۹۰	۱۷۵	۹.۲۷	۱۰.۷	۳۱.۲
۳	۸۲	۱۷۳	۸.۴۰	۹.۸	۳۲.۸	۱۳	۸۲	۱۷۵	۱۰.۲۷	۱۰.۷	۳۰.۲
۴	۸۳	۱۶۲	۸.۹۳	۱۰.۳	۳۴.۳	۱۴	۸۸	۱۷۰	۸.۷۳	۱۰.۳	۳۱.۰
۵	۸۹	۱۶۲	۸.۸۰	۱۰.۵	۳۴.۸	۱۵	۸۹	۱۷۴	۸.۲۷	۱۰.۲	۲۷.۹
۶	۹۲	۱۶۹	۸.۴	۹.۰۰	۲۹.۰	۱۶	۸۴	۱۷۹	۱۰.۱	۹.۶	۳۰.۷
۷	۹۱	۱۶۳	۸.۲۷	۹.۹۰	۲۹.۸	۱۷	۹۶	۱۷۲	۸.۶	۱۰.۲	۳۲.۴
۸	۹۲	۱۶۴	۸.۲	۱۱.۱	۳۶.۳	۱۸	۸۶	۱۷۷	۹.۰۷	۹.۹۰	۳۱.۵
۹	۹۳	۱۶۵	۹.۵۳	۱۰.۰	۳۰.۰	۱۹	۹۲	۱۷۰	۹.۰۰	۹.۹۰	۲۹.۷
۱۰	۸۵	۱۶۳	۹.۶	۱۰.۵	۳۵.۴	۲۰	۸۶	۱۸۲	۸.۹۳	۱۰.۳	۲۸.۹
						تعداد نمونه	۳۰۰	۳۰۰	۲۴۰	۲۴۰	۲۴۰
						میانگین مقاومت نمونه‌ها	۸۷	۱۷۰	۹.۱	۱۰.۱	۳۱.۷
						انحراف معیار	۶.۵	۷.۵	۰.۸	۰.۵	۲.۳
						مقدار آزمایشگاهی مشخصه	۷۶	۱۵۷	۷.۸	۹.۳	۲۷.۹

$f_{cm,cu,1d}$ = میانگین مقاومت فشاری ۱ روزه با نمونه مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری

$f_{cm,cu,28d}$ = میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه با نمونه مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری

$f_{ctm,el}$ = میانگین حد مقاومت کششی در حالت الاستیک با نمونه منشوری ۱۰۰ میلی‌متری

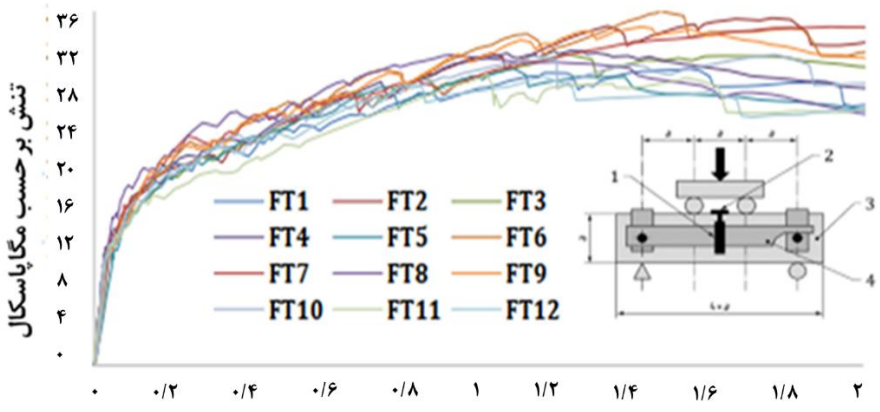
f_{ctfm} = میانگین مقاومت کششی بعد از ترک خوردگی با نمونه منشوری ۱۰۰ میلی‌متری

$f_{ctm,fl}$ = میانگین مدول خمشی با نمونه منشوری ۱۰۰ میلی‌متری

1&2. برای میانگین گرفتن از ۱۵ نمونه استفاده شده است.

3&4. برای میانگین گرفتن از ۱۲ نمونه استفاده شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بتن فوق‌توانمندی که در این پروژه به‌کار گرفته شده، قادر است تا ۸.۷ مگاپاسکال کشش را تحمل کند بدون آنکه از حالت الاستیک خارج شده و ترک‌ها باز شوند؛ این ویژگی نشان می‌دهد که بتن ساخته‌شده دارای مشخصات مکانیکی مطلوبی است. برای بررسی مدول خمشی، از تست سه‌نقطه‌ای استفاده شده و نمونه‌ها به صورت منشورهای ۱۰۰ میلی‌متری تهیه گردیده‌اند. در شکل ۹، شماتیک تست سه‌نقطه‌ای و نتایج آزمایش برای یکی از قطعات u شکل پیش‌ساخته نمایش داده شده است. به‌منظور افزایش دقت، از ۱۲ نمونه استفاده شده و نتیجه نهایی به‌صورت میانگین گزارش شده است. مشخصات مکانیکی استفاده شده برای طراحی قطعات پیش‌ساخته در جدول ۷ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقاومت فشاری بتن فوق‌توانمند برابر ۱۴۰ مگاپاسکال و میزان جمع‌شدگی آن پس از عمل‌آوری برابر صفر در نظر گرفته شده است. بر اساس میزان جمع‌شدگی تعیین شده توسط طراح، عمل‌آوری قطعات پیش‌ساخته u شکل نیازمند تمهیدات ویژه‌ای می‌باشد [32].



شکل ۹ – شماتیک و نتایج تست سه نقطه‌ای برای یک قطعه پیش ساخته u شکل [۳۲].

جدول7 – مشخصات مکانیکی بتن فوق‌توانمند برای طراحی قطعات پروژه [32].

پارامتر	مقدار
مقاومت فشاری استوانه‌ای مشخصه	140 MPa
مقاومت فشاری مکعبی مشخصه	155 MPa
حد کشش الاستیک مشخصه	7.0 MPa
مقاومت کششی پس از ترک‌خوردگی مشخصه	8.0 MPa
مدول گسیختگی مشخصه	20 MPa
میانگین مدول الاستیسیته	50 GPa
نسبت پواسون	0.2
جمع‌شدگی پس از عمل‌آوری	0

برای ساخت پل، ابتدا در سال ۲۰۱۷ قطعات **u** شکل در کارخانه با استفاده از طرح اختلاط اشاره شده تولید شدند. برای عمل‌آوری، تمامی قطعات به مدت ۴۸ ساعت تحت رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد (اشباع) و دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. این فرآیند به‌منظور حذف جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن بعد از عمل‌آوری انجام شد، که مطابق نظر طراح بوده است. پس از عمل‌آوری، هر قطعه توسط کامیون به سایت منتقل گردید. به دلیل سبک بودن قطعات، جابه‌جایی آن‌ها با یک جرثقیل ۴۵ تنی امکان‌پذیر بود. طبق شکل ۱۲، قطعات پیش‌ساخته **u** شکل به‌صورت یکپارچه و در امتداد یکدیگر توسط جرثقیل قرار داده شدند و بدین ترتیب تیرهای دهانه ۳۸ متری (شامل سه قطعه پیش‌ساخته **u** شکل ۸ متری و دو قطعه **u** شکل ۷ متری با وزنی در حدود ۹۵ تن تشکیل گردید، که نشان‌دهنده‌ی سبک بودن پل به دلیل استفاده از بتن فوق‌توانمند است. مطابق شکل ۱۳، روش پس‌کشیده برای پیش‌تنیدگی به‌کار گرفته شد. پس از ایجاد تیرهای دهانه ۳۸ متری، کابل‌های پیش‌تنیده 27k15 در چهار غلاف پایینی تیرها و در دو غلاف بالایی، با استفاده از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۷۰۰۰۰ کیلونیوتن، تنیده شدند. نیروی پیش‌تنیدگی در غلاف‌های پایینی برابر با ۱۹۱۱۰ کیلونیوتن و در غلاف‌های بالایی ۲۷۳۰ کیلونیوتن بوده است. پس از اعمال نیروی پیش‌تنیدگی، غلاف‌ها با گروت، به‌عنوان یک ماده منبسط شونده، پر

شدند تا پیوستگی میان کابل‌ها و تیر افزایش یابد. طبق شکل ۱۶ و ۱۷، برای جابه‌جایی تیرهای ۳۸ متری از دو جرثقیل ۱۶۰ تنی استفاده شد تا تیرهای پیش‌ساخته و پیش‌تنیده بر روی پایه‌های پل قرار داده شوند. پس از استقرار تیرها، عرشه پل که به‌صورت بتن‌آرمه درجا اجرا شده است، تیرهای دهانه ۳۸ متری را به یکدیگر متصل کرد و هر لاین عبور پل ساخته شد [32].

شکل ۱۰- ساخت قطعات **u** شکل در کارخانه [۳۲].

شکل ۱۱- انتقال قطعات پیش‌ساخته به سایت توسط کامیون [۳۲].

شکل ۱۲- انتقال قطعات پیش‌ساخته و ساخت تیر دهانه ۳۸ متری با جرثقیل ٤٥ تنی

شکل ۱۳- ایجاد نیروی پیش‌تنیدگی در کابل‌ها به روش پس‌کشیده [۳۲].

شکل ١٤- استفاده از جک هیدرولیکی برای ایجاد نیروی پیش‌تنیدگی در کابل‌ها [٣٢].

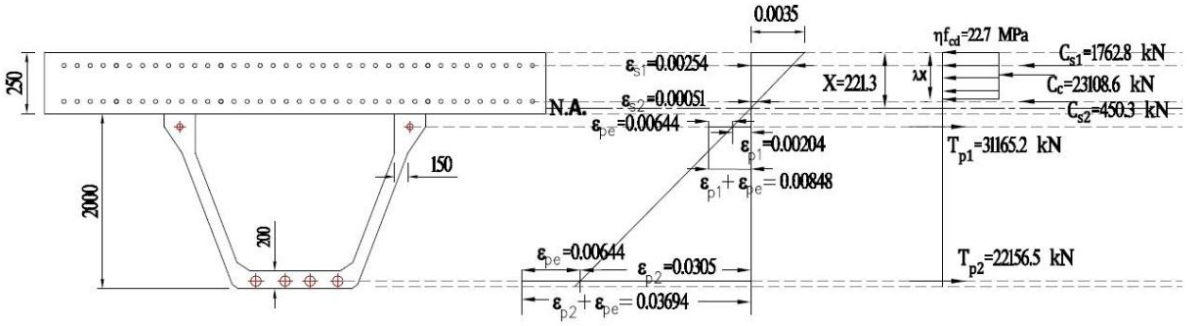
شکل ١٥- تیر دهانه ٣٨ متری پس از تزریق دوغاب در غلاف‌ها و آمده قرار گیری روی پایه‌های پل [٣٢].

شکل ۱۶- انتقال تیر دهانه‌ی ۳۸ متری بر روی پایه پل با استفاده از دو جرثقیل ۱۶۰ تنی [۳۲].

شکل ۱۷ - پایان عملیات انتقال قطعات پیش‌ساخته و پیش‌تنیده بر روی پایه‌های پل [۳۲].

در طراحی قطعات u شکل این پروژه، که از بتن فوق‌توانمند برای ساخت آن‌ها استفاده شده است، از مبانی طراحی بتن‌آرمه استفاده گردیده است. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، توزیع تنش و کرنش در مقطع پل به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده که به‌صورت محافظه‌کارانه‌ای از مقاومت کششی بتن فوق‌توانمند صرف‌نظر شده است، حتی با وجود اینکه این نوع بتن نسبت به بتن‌های

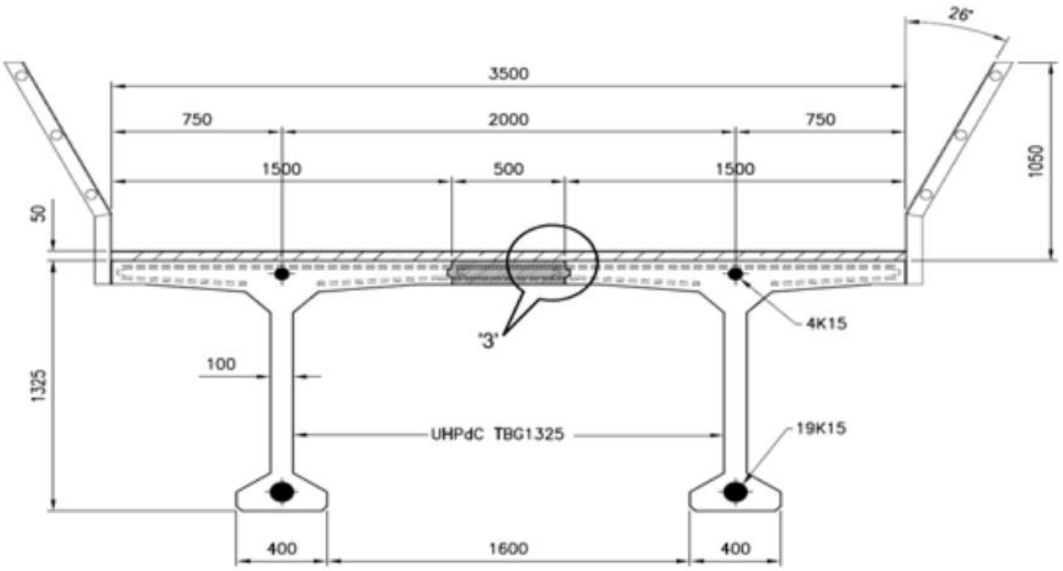
معمولی دارای مقاومت کششی و مدول خمشی بیشتری است. به دلیل استفاده از بتن فوق‌توانمند و همچنین شکل هندسی مقطع پل (به‌صورت u شکل)، وزن پل به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است و بار مرده‌ی کمتری به سازه وارد می‌شود.



شکل ۱۸- توزیع تنش و کرنش در مقطع پل [۳۲].

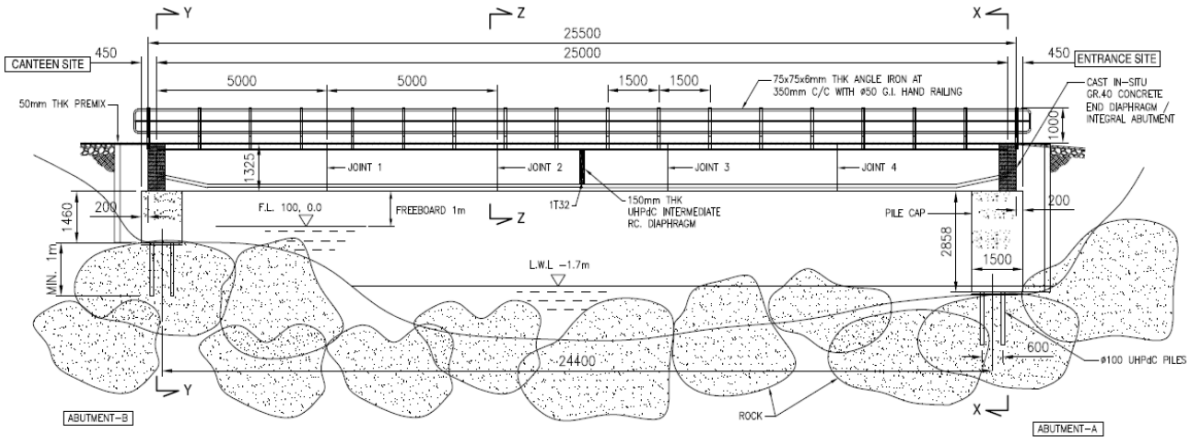
- **پل Kampung Ulu Geroh**

پل **Kampung Ulu Geroh** که در کشور مالزی قرار دارد، در سال ۲۰۱۲ تکمیل گردید. این پل با طول ۲۵ متر، از دو مقطع **T** شکل پیش‌ساخته و پیش‌تنیده با بتن فوق‌توانمند ساخته شده است. این سازه به منظور انتقال بار ترافیکی متوسط از روی رودخانه طراحی شده است. به دلیل استفاده از بتن فوق‌توانمند و تکنیک پیش‌تنیدگی، هیچ‌گونه پایه‌ای در وسط پل قرار داده نشده و پل به صورت یک تیر ۲۵ متری با دو تکیه‌گاه در طرفین اجرا شده است. ساخت پل در نوامبر ۲۰۱۱ آغاز و در اواسط ژانویه ۲۰۱۲ به پایان رسید (در مدت ۲ ماه)، که نشان‌دهنده سرعت بالای ساخت با استفاده از قطعات پیش‌ساخته است. همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، دو قطعه پیش‌ساخته T شکل در کنار یکدیگر قرار گرفته و مقطع پل را تشکیل داده‌اند. ارتفاع مقطع T شکل برابر با ۱.۳۷۵ متر، عرض بال آن ۵.۱ متر، و فاصله بین دو مقطع پیش‌ساخته T شکل ۵۰۰ سانتی‌متر تعیین شده است. برای پیش‌تنیدگی از روش پس‌کشیده استفاده شده و در قطعات پیش‌ساخته، دو غلاف در بالا و پایین تیرT شکل تعبیه گردیده است. برای غلاف بالایی، کابل 4 K 15 و برای غلاف پایینی، کابل 19 K 15 پیش‌تنیده شده‌اند. پس از اعمال نیروی پیش‌تنیدگی در کابل‌ها، غلاف‌ها با گروت پر شدند تا پیوستگی بین بتن و کابل افزایش یابد [۱۳].



شکل ۱۹ – مقطع عرضی پل **Kampung Ulu Geroh** [۱۳].

یکی از چالش‌های اساسی این پروژه، دسترسی ضعیف به محل سایت بوده است و بزرگترین تجهیزاتی که به محل سایت امکان دسترسی داشتند، جرثقیل‌های متحرک با ظرفیت ۲۰ تن و طول حداکثر ۸ متر بوده است. تجهیزات سنگین‌تر و با طول بیشتر به دلیل شرایط جاده‌های موجود امکان دسترسی به سایت را نداشته‌اند. با توجه به این محدودیت‌ها و امکان استفاده حداکثر از دو جرثقیل ۲۰ تنی، استفاده از پل‌های بتنی معمولی به دلیل وزن بالا و نبود تجهیزات جابه‌جایی مناسب، امکان‌پذیر نبوده است. به علاوه، به دلیل دسترسی محدود، هزینه‌های تعمیر و نگهداری پل افزایش پیدا می‌کرد و نیاز به ساخت پلی با هزینه تعمیر و نگهداری پایین احساس می‌شد؛ به همین دلیل، استفاده از پل‌های فولادی نیز از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر نبود. علاوه بر این، ایجاد یک پایه در وسط رودخانه با توجه به محدودیت‌های بیان‌شده و هزینه زیاد ساخت یک المان در معرض آب، امکان‌پذیر نبوده است. با توجه به این ملاحظات، بتن‌های فوق‌توانمند برای ساخت این پل انتخاب گردیدند تا وزن پل و بار مرده آن به‌طور چشمگیری کاهش یابد، به‌گونه‌ای که امکان جابه‌جایی با تجهیزات موجود فراهم شود. این نوع بتن به دلیل دوام بالا در برابر شرایط محیطی، نیاز به تعمیر و نگهداری کمتری داشته و به دلیل خواص مکانیکی مطلوب (مقاومت فشاری و کششی بالا) و استفاده از پیش‌تنیدگی، نیاز به اجرای پایه در وسط رودخانه را برطرف می‌سازد و از نظر اقتصادی هزینه‌ها را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. همچنین، به دلیل ظرفیت برشی بالای بتن فوق‌توانمند، از آرماتور برشی برای ساخت این پل استفاده نشده است . برای ساخت پل، ابتدا قطعات T شکل در یک کارخانه با استفاده از بتن فوق‌توانمند ساخته شدند (میانگین مقاومت فشاری قطعات ساخته شده ۱۵۰مگاپاسکال گزارش شده است). همان‌طور که در شکل ۲۰ نشان داده شده، طول هر قطعه‌ی پیش‌ساخته T شکل ۵ متر در نظر گرفته شده و با اتصال پنج قطعه T شکل، یک تیر ۲۵ متری تشکیل گردید. عمل پیش‌تنیدگی پس از تشکیل تیر ۲۵ متری صورت گرفت. وزن تیر ۲۵ متری ساخته شده از این قطعات، ۲۵ تن بوده و امکان جابه‌جایی آن با دو جرثقیل ۲۰ تنی فراهم شده است. تکیه‌گاه‌های پل به‌صورت گیردار اجرا گردیده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲۱ نشان داده شده، ابتدا با استفاده از بتن آرمه معمولی، یک سطح صاف برای استقرار تیرهای ۲۵ متری ایجاد شد. پس از قرارگیری تیرهای ۲۵ متری توسط دو جرثقیل بر روی تیر بتن آرمه معمولی، آرماتورهایی در محل قرارگیری تیر تعبیه گردیدند و با قالب‌بندی و بتن‌ریزی، یک اتصال گیردار در دو طرف پل ایجاد شده است که برای این اتصال از بتن معمولی استفاده شده است [۱۳].

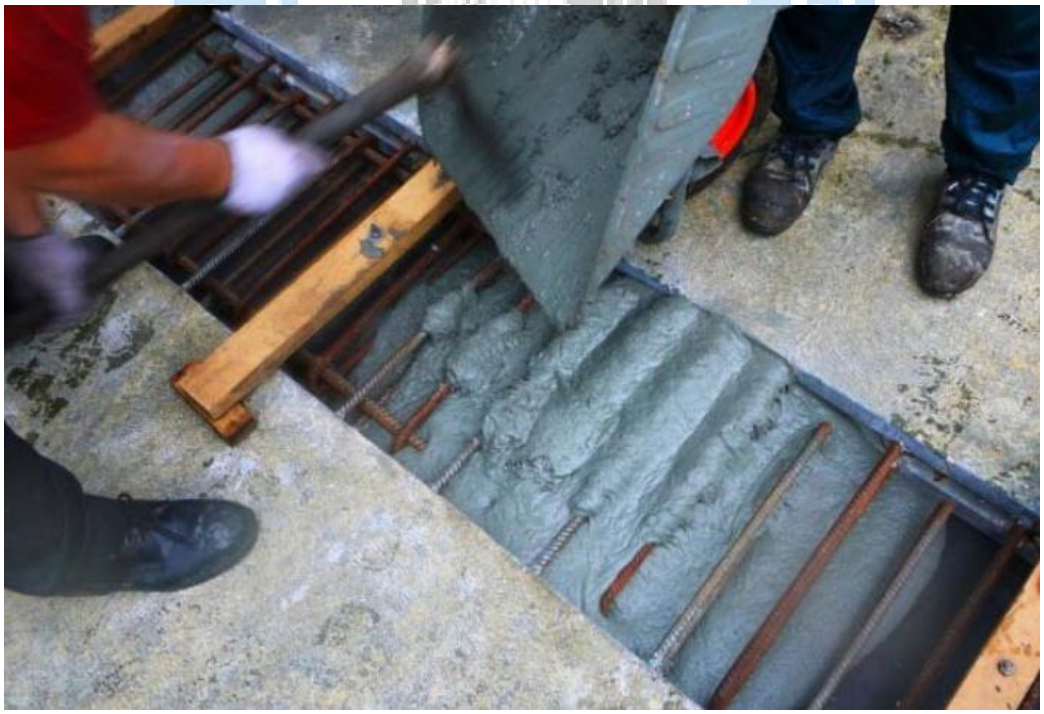


شکل ۲۰ – پروفیل طولی پل **Kampung Ulu Geroh** [۱۳].

شکل ۲۱ – جابه‌جایی تیر ۲۵ متری با استفاده از دو جرثقیل ۲۰ تنی [۱۳].

پس از قرارگیری تیرهای ۲۵ متری پیش‌ساخته توسط دو جرثقیل ۲۰ تنی در محل مورد نظر و اجرای تکیه‌گاه‌ها، مطابق شکل ۲۳ از بتن فوق‌توانمند به‌صورت درجا برای اتصال دو تیر استفاده شد. با توجه به خواص مکانیکی بالای بتن فوق‌توانمند، امکان رفع برخی از مشکلات اتصالات قطعات پیش‌ساخته فراهم گردید و یک اتصال مقاوم و مطمئن ایجاد شد. به دلیل یکپارچگی ایجاد شده در اتصال و همچنین مقاومت فشاری و کششی بالای این بتن، اتصالات ساخته شده از بتن فوق‌توانمند، مقاومت بالایی داشته و از بروز خرابی‌های پیش‌رونده در قطعات پیش‌ساخته جلوگیری به‌عمل آورده‌اند. به دلیل روانی بالای بتن فوق‌توانمند، هیچ ویبره‌ای برای تراکم آن مورد استفاده قرار نگرفت. همان‌طور که در شکل ۲۲ نشان داده شده، روانی بالای این بتن قابل مشاهده است. پس از یک روز، قالب‌های مربوط به بتن فوق‌توانمند برداشته شد و میانگین مقاومت فشاری یک روزه نمونه مکعبی بتن فوق‌توانمند اجرا شده **۷۰ مگاپاسکال** و میانگین مقاومت فشاری ۱۴ روزه آن **۱۴۵ مگاپاسکال** گزارش گردید. بر اساس گزارش‌ها، ادعا شده است که تیرهای ۲۵ متری استفاده شده در این پروژه از سبک‌ترین تیرهای ساخته شده برای پل‌ها می‌باشند [13].

شکل ۲۲ – آماده شدن تیرهای ۲۵ متری برای اجرای تکیه‌گاه و اتصال بین آن‌ها [۱۳].



شکل ۲۳ – استفاده از بتن فوق‌توانمند برای اتصال بین دو تیر ۲۵ متری پیش‌ساخته T شکل [۱۳].

در شکل ۲۵ اجرا پل به پایان رسیده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود علاوه بر اتصال بتنی بین قطعات پیش‌ساخته، از یک صفحه‌ی بتنی درجا از جنس بتن فوق‌توانمند برای اطمینان بیشتر نیز استفاده شده است.

شکل ۲۴ – استفاده از بتن فوق‌توانمند برای اتصال بین دو تیر ۲۵ متری پیش‌ساخته T شکل [۱۳].

شکل ۲۵ – پل Kampung Ulu Geroh [۱۳].

- **پل Thouaré-sur-Loire**

پل **Thouaré-sur-Loire** که در کشور فرانسه قرار دارد، در سال ۱۸۷۹ ساخت آن آغاز و پس از سه سال، در ۱۸۸۲ به اتمام رسید. این پل به‌صورت خرپای فولادی اجرا گردیده و دارای طولی برابر با ۳۹۲ متر است که از هفت دهانه ۴۵ متری و دو دهانه ۳۸ متری تشکیل شده است. عرشه پل با استفاده از آجر قوس‌دار، تیر فولادی و رویه آسفالتی ساخته شده بود. به دلیل نفوذپذیری بالای رویه آسفالتی و خطر زنگ‌زدگی تیرهای فولادی زیر آن، تصمیم گرفته شد تا عرشه قدیمی پل برداشته شده و لایه‌ای نفوذناپذیر در برابر آب[۳۰] جایگزین آن گردد. با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب بتن فوق‌توانمند، عرشه جدید این پل با استفاده از قطعات پیش‌ساخته بتن

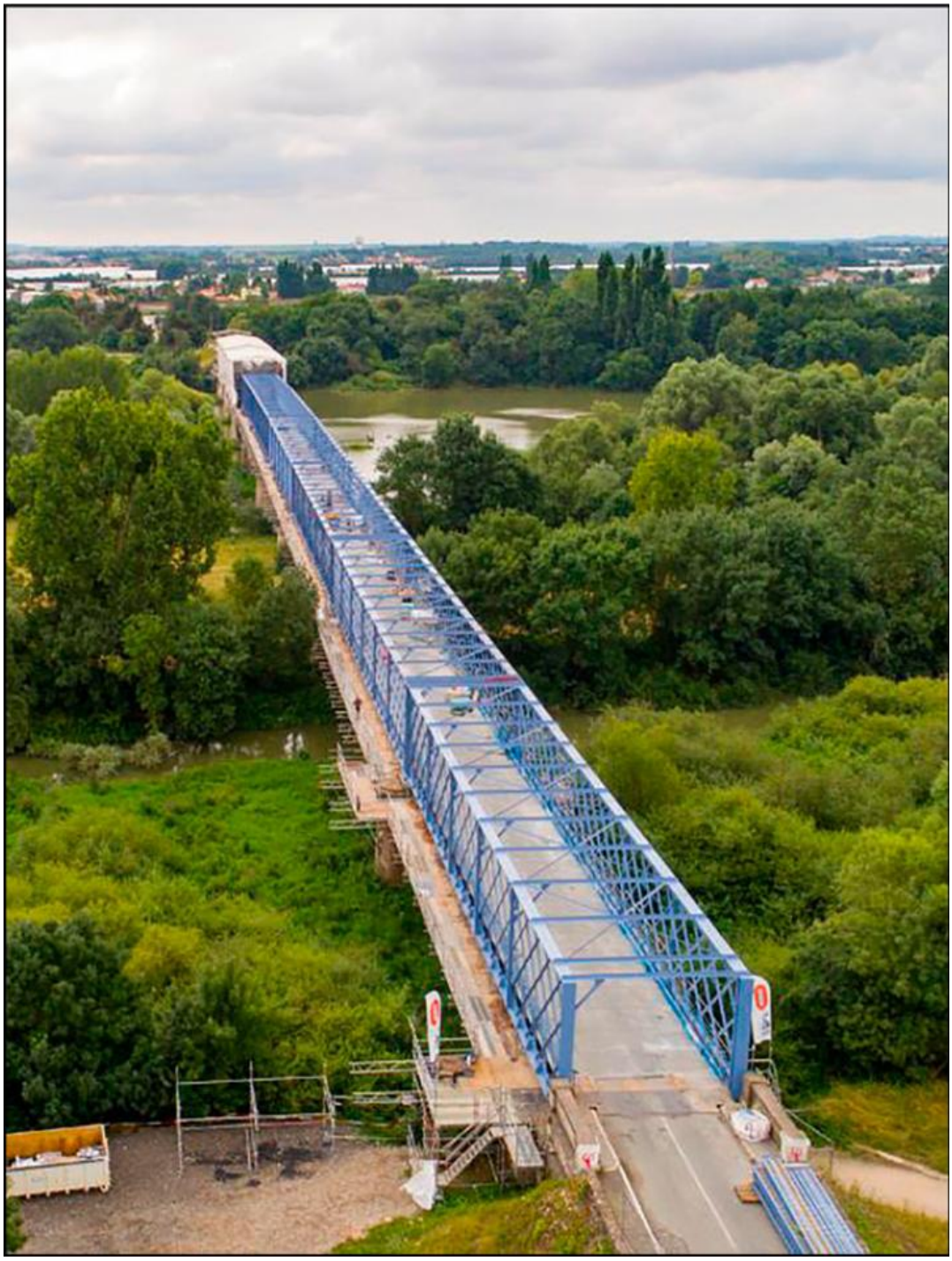
[30] waterproofing

فوق‌توانمند تقویت‌شده با آرماتور اجرا شد، که دارای ضخامت کمتر، وزن مرده کمتر و دوام بیشتر بوده و از خوردگی تیرهای فولادی جلوگیری می‌کند. عملیات نصب عرشه جدید طی شش ماه به انجام رسید و در این مدت پل از بهره‌برداری خارج شد. یکی از چالش‌های اساسی این پروژه، بازگرداندن سریع پل به حالت بهره‌برداری بود که با استفاده از قطعات پیش‌ساخته بتن فوق‌توانمند در کمترین زمان ممکن برطرف گردید. ضخامت عرشه جدید ۹۰ میلی‌متر بوده و بر روی تیرهای فولادی قرار داده شده است. در فرآیند تعمیر و تقویت این پل، ابتدا عرشه قدیمی برداشته شد و سپس قطعات پیش‌ساخته بتن فوق‌توانمند که با آرماتور تقویت شده بودند، بر روی پل نصب گردیدند. مطابق شکل ۲۸، از بتن فوق‌توانمند درجا برای اتصال قطعات پیش‌ساخته استفاده شد که موجب ایجاد یکپارچگی در سیستم پل گردید. این بتن دارای مقاومت فشاری و کششی بالاست و به ویبره برای تراکم نیاز ندارد. پس از اجرای عرشه جدید با استفاده از بتن فوق‌توانمند، وزن مرده پل به ۱۵۰۰ تن کاهش یافت، در حالی که وزن قبلی آن ۳۰۰۰ تن بود. کاهش ۱۵۰۰ تنی وزن پل باعث شد تا تقویت المان‌های آن برای بار ترافیکی جدید (افزایش بار ترافیکی در زمان تعمیر و تقویت) ضروری نباشد و از نظر اقتصادی بهینه‌ترین طرح برای عرشه جدید به شمار می‌رود [۳۳].

شکل ۲۶ - پل Thouaré-sur-Loire قبل از تعمیر و تقویت با رویه‌ی آسفالتی [۳۳].

شکل ۲۷ – قرارگیری قطعات پیش‌ساخته بتن فوق‌توانمند در طول پل برای اجرای عرشه جدید [۳۳].

شکل ۲۸ – استفاده از بتن فوق‌توانمند برای اتصال قطعات پیش‌ساخته به یکدیگر[۳۳].



شکل ۲۹ - پل **Thouaré-sur-Loire** [۳۳].

۱۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بتن‌های فوق توانمند (UHPC) به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین مصالح ساختمانی، امکان ایجاد سازه‌هایی با مقاومت بالا، دوام قابل توجه و ویژگی‌های منحصربه‌فرد را فراهم کرده‌اند. این مقاله به بررسی مزایا، معایب، چالش‌ها و کاربردهای گسترده این نوع بتن در صنعت ساخت‌وساز پرداخته است. با توجه به خواص مکانیکی و فیزیکی ویژه، از جمله مقاومت فشاری بیش از ۱۵۰ مگاپاسکال، نفوذپذیری بسیار

کم و دوام بالا، بتن‌های فوق توانمند به‌طور گسترده‌ای در پروژه‌های زیرساختی نظیر پل‌ها، عرشه‌های راه‌ها و ساختمان‌های مقاوم در برابر شرایط محیطی استفاده شده‌اند. مطالعات انجام‌شده بر روی پروژه‌های خاص نظیر پل‌های Kampung Ulu Geroh و Thouaré-sur-Loire نشان داده‌اند که استفاده از این نوع بتن می‌تواند به کاهش وزن مرده سازه، کاهش زمان اجرا و افزایش بهره‌وری در فرآیند ساخت منجر شود. در این پروژه‌ها، از تکنولوژی پیش‌تنیدگی و قطعات پیش‌ساخته استفاده شده است که علاوه بر بهینه‌سازی هزینه‌ها، راهکاری موثر برای کاهش مشکلات مربوط به حمل‌ونقل و نصب قطعات سنگین ارائه کرده‌اند. استفاده از بتن فوق توانمند در عرشه‌های پیش‌ساخته و درجا، به دلیل مقاومت بالا و عدم نیاز به تقویت‌های اضافی نظیر آرماتور برشی، باعث کاهش زمان اجرا و هزینه‌های مرتبط با پروژه شده است. با این حال، چالش‌های اساسی در استفاده از بتن‌های فوق توانمند وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها شامل هزینه بالای تولید، نیاز به تجهیزات خاص برای عمل‌آوری و وابستگی به مواد اولیه با کیفیت بالا است. این مشکلات به‌ویژه در مناطقی با محدودیت‌های منابع یا زیرساخت‌های ناکافی می‌توانند چالش‌برانگیز باشند. با وجود این، دوام بلندمدت و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، مزایای قابل‌توجهی را برای این نوع بتن فراهم می‌کند که می‌تواند این محدودیت‌ها را جبران کند. علاوه بر مزایای اقتصادی، این نوع بتن به دلیل خواص پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی، به عنوان یکی از مصالح کلیدی در توسعه پایدار شناخته می‌شود. کاهش مصرف مواد اولیه نظیر سیمان و استفاده از مواد پوزولانی در ترکیبات UHPC ، نشان‌دهنده امکان‌پذیری تولید این بتن با کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی است. در مجموع، استفاده از بتن فوق توانمند در پروژه‌های عمرانی نه تنها امکان کاهش هزینه‌ها و زمان اجرا را فراهم کرده، بلکه پایداری و کارایی سازه‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده است. این مصالح با ویژگی‌های برجسته خود می‌توانند به عنوان راه‌حلی موثر برای رفع چالش‌های زیرساختی و ارتقاء کیفیت پروژه‌های عمرانی در آینده به‌کار گرفته شوند. انتظار می‌رود که با پیشرفت‌های فناوری در زمینه تولید و توسعه روش‌های جدید عمل‌آوری، کاربرد بتن فوق توانمند در پروژه‌های ساختمانی و زیرساختی به طور چشمگیری گسترش یابد.

مراجع

[1] E. Dong, R. Yu, D. Fan, Z. Chen, and X. Ma, "Absorption-desorption process of internal curing water in ultra-high performance concrete (UHPC) incorporating pumice: From relaxation theory to dynamic migration model," Cement and Concrete Composites, vol. 133, p. 104659, 2022.
[2] S. Wang et al., "Ultra-high performance concrete: Mix design, raw materials and curing regimes-A review," Materials Today Communications, vol. 35, p. 105468, 2023.
[3] J. Resplendino, S. TPI, and F. Vitrolles, "French recommendations and feedback of experience on ultra high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC)," in Proc. of 1st ACI-fib FRC Workshop, 2014, pp. 44-57.
[4] J. Min et al., "The effect of carbon dioxide emissions on the building energy efficiency," Fuel, vol. 326, p. 124842, 2022.

[5] M. Amran, S.-S. Huang, A. M. Onaizi, N. Makul, H. S. Abdelgader, and T. Ozbakkaloglu, "Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects," Construction and Building Materials, vol. 352, p. 129029, 2022.
[6] M. Khan and C. McNally, "Recent developments on low carbon 3D printing concrete: Revolutionizing construction through innovative technology," Cleaner Materials, p. 100251, 2024.
[7] M. Zhou, W. Lu, J. Song, and G. C. Lee, "Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering," Construction and Building Materials, vol. 186, pp. 1256-1267, 2018.
[8] A. M. Zeyad, A. H. Khan, and B. A. Tayeh, "Durability and strength characteristics of high-strength concrete incorporated with volcanic pumice powder and polypropylene fibers," Journal of Materials Research and Technology, vol. 9, no. 1, pp. 806-818, 2020.
[9] C. Umbach, A. Wetzel, and B. Middendorf, "Durability properties of ultra-high performance lightweight concrete (UHPLC) with expanded glass," Materials, vol. 14, no. 19, p. 5817, 2021.
[10] M. Li et al., "A State-of-the-Art Assessment in Developing Advanced Concrete Materials for Airport Pavements with Improved Performance and Durability," Case Studies in Construction Materials, p. e03774, 2024.
[11] Y. Huang, S. Grünewald, E. Schlangen, and M. Luković, "Strengthening of concrete structures with ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC): A critical review," Construction and Building Materials, vol. 336, p. 127398, 2022.
[12] R. Martins, R. do Carmo, H. Costa, and E. Júlio, "Low cement concretes with ultra-high durability for innovative composite lightweight precast walls," Journal of Building Engineering, vol. 86, p. 108922, 2024.
[13] V.-Y. Lei, B. Nematollahi, A. B. M. Said, B. A. Gopal, and T. S. Yee, "Application of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete â€“The Malaysia Perspective," International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology, vol. 3, no. 1, pp. 26-44, 2012.
[14] BS1881-Part 114, 1983. Testing concrete. Methods for determination of density of hardened concrete. British Standard, British Standards Institution, ISBN. 0-580-12948-9, 8 pp.
[15] AS 1012.9, 1999. Determination of the compressive strength of concrete specimens. Australian Standard, Standards Australia, 12 pp.
[16] BS6319-2, 1983. Testing of resin and polymer/cement compositions for use in construction. Method for measurement of compressive strength. British Standard, British Standards Institution, 4 pp.
[17] AS1012.16, 1996. Determination of creep of concrete cylinders in compression. Australian Standard, Standards Australia, 8 pp.
[18] BS1881-Part 121, 1983. Testing concrete. Methods for determination of static modulus of elasticity in compression. British Standard, British Standards Institution, 7 pp.
[19] BS EN 12390-6, 2000. Testing hardened concrete. Tensile splitting strength of test specimens. British Standard, British Standards Institution, ISBN: 0-580-36606-5, 14pp .
[20] ASTM C496, 2004. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. ASTM Standards, ASTM International, United States, 5 pp.
[21] ASTM-C1018, 1997. Standard test method for flexural toughness and first crack strength of fiber reinforced concrete (using beam with third point loading). ASTM Standards, ASTM International, United States, 8 pp.
[22] ASTM C1202, 2005. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 6 pp.
[23] ASTM C1556, 2004. Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion. ASTM Standards, ASTM International, United States, 7 pp.
[24] BS EN 14630, 2006. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. British Standard, British Standards Institution, ISBN: 0-580-49622-8, 12 pp.
[25] ASTM C944-99, 2005. Standard test method for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method. ASTM Standards, ASTM International, United States, 4 pp.
[26] BS1881-Part 122, 1983. Testing concrete. Method for determination of water absorption. British Standard, British Standards Institution, ISBN: 0-580-12959-4, 4 pp.
[27] ACI. (2018). ACI 239R-18: Ultra-High Performance Concrete: An Emerging Technology Report.USA: Farmington Hills.
[28] H. Huang, X. Gao, H. Wang, and H. Ye, "Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete," Construction and Building Materials, vol. 149, pp. 621-628, 2017.
[29] N. M. Azmee and N. Shafiq, "Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications," Case Studies in Construction Materials, vol. 9, p. e00197, 2018.
[30] M. Bajaber and I. Hakeem, "UHPC evolution, development, and utilization in construction: A review," Journal of Materials Research and Technology, vol. 10, pp. 1058-1074, 2021.

[31] P. R. Prem, A. Ramachandra Murthy, and B. H. Bharatkumar, "Influence of curing regime and steel fibres on the mechanical properties of UHPC," Magazine of Concrete Research, vol. 67, no. 18, pp. 988-1002, 2015.
[32] M. Hafezolghorani and Y. L. Voo, "Design of 38m span post-tensioned ultra high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) composite bridge," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 431, no. 4: IOP Publishing, p. 042007.
[33] E. Vonk, "Innovative Approaches to Steel Bridge Repair and Strengthening Around the Globe," Structural Engineering International, vol. 29, no. 4, pp. 537-541, 2019.