THBB AKADEMİ

TEKNİK BÜLTEN

14

ÖZEL KONU

ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON

TÜRKİYE HAZIR BETON BİRLİĞİ YAYINIDIR.
Şubat, 2024

ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON

GİRİŞ

Ultra Yüksek Performanslı Beton (Ultra High Performance Concrete – UHPC), yüksek dayanıma ve ileri düzeyde dayanıklılığa sahip gelişmiş bir beton türüdür. Binaların ve diğer altyapı bileşenlerinin sürdürülebilirliğini geliştirmek için pratik bir çözüm olma potansiyeli sunmaktadır [1]. Son yirmi yılda UHPC'nin; bina bileşenleri, köprüler, mimari açıdan öne çıkan yapılar, onarım ve rehabilitasyon işleri, kuleler gibi dikey yapılar, petrol ve gaz endüstrisi uygulamaları, açık deniz yapıları ve kaplamalar gibi birçok alanda kullanımı dünya genelinde artan bir ilgi görmektedir [2]. Tüm bu uygulamalar arasında en popüler olanı yol ve köprü inşaatlarıdır [3]. Köprüler ve köprü bileşenleri için UHPC kullanımı Avustralya, Avusturya, Kanada, Çin, Çekya, Fransa, Almanya, İtalya, Japonya, Malezya, Hollanda, Yeni Zelanda, Slovenya, Güney Kore, İsviçre ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) gibi ülkelerde öne çıkmaktadır [2]. Bahsedilen ülkelerdeki projelerin çoğu, daha fazla uygulamayı teşvik etmeyi amaçlayan ilk tanıtım projeleri olarak devlet kurumları tarafından motive edilmiştir. Ancak çoğu ülke için bu tanıtım projeleri beklenen kabulü istenen düzeyde yaratmamıştır [4]. Tasarım kodlarının eksikliği, malzeme ve üretim teknolojisi hakkındaki sınırlı bilgi ve yüksek başlangıç maliyeti; bu üstün malzemenin ilk tanıtım projelerinin ötesinde uygulanmasını sınırlıyor gibi görünmektedir [2]. Yine de son yıllarda hem özel hem de devlet kurumları artık bu yenilikçi ve gelecek vaat eden malzemenin kullanılmasına yönelik ilgilerini artırmakta ve daha fazla çaba sarf etmeye çalışmaktadır.

Alman Araştırma Vakfı, 2005 yılında 20'den fazla yerel araştırma enstitüsünde 34 projeyi içeren 12 milyon Avro tutarında bir araştırma programı başlatmıştır [5]. Bu programın temel amacı, UHPC'yi güvenilir, yaygın olarak bulunabilen, ekonomik ve düzenli olarak uygulanabilen bir malzeme haline getirmek için farkındalığı artırmaktır.

2007 yılında Kore İnşaat Teknolojisi Enstitüsü, UHPC'nin kablolu köprülerde kullanımını incelemek için 11 milyon ABD Doları tutarında "Super 200" programını finanse etmiştir [6]. UHPC'nin Malezya'da tanıtılması, Dura Technology (DURA) tarafından 2010 yılındaki ilk köprü uygulamasıyla başlamıştır. Birkaç yıl süren yoğun araştırma ve geliştirme sırasında DURA, Malezya Bayındırlık Departmanı ile birlikte kırsal bölgelere odaklanan UHPC köprülerinin tasarlanması ve inşa edilmesi için iş birliği yapmıştır [4].

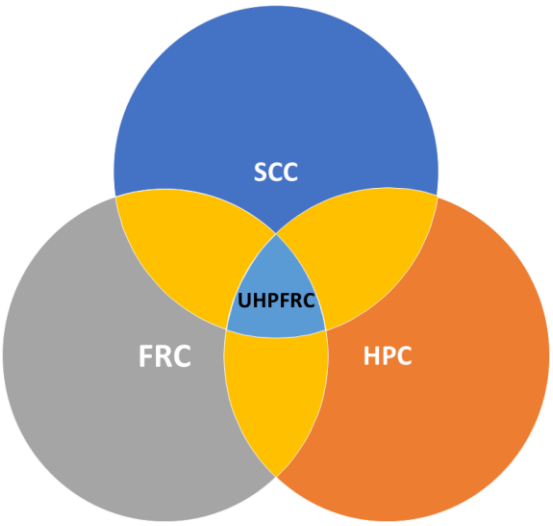
2010 yılından bu yana, 90 UHPC köprüsü inşa edilmiş ya da edilmeye devam etmektedir [2]. Bu sayede, UHPC uygulamasındaki başarılar dünya çapında görülmektedir. Ancak hâlâ uygulamaları sınırlayan engeller bulunmaktadır. Devam eden araştırma ve geliştirme çalışmaları; gelecekte yenilikçi, sürdürülebilir, uygulanabilir ve ekonomik UHPC kullanımını sağlamak için bilgi boşluklarını doldurmakta ve kabulünün arttırılmasında büyük bir etki yaratmaktadır.

UHPC'NİN TANIMI

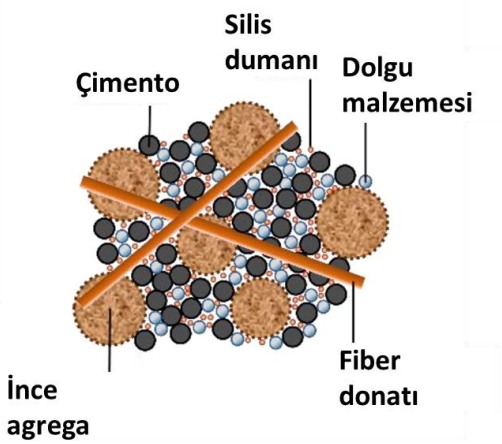
UHPC; çok yüksek dayanım, süneklik ve dayanıklılığa sahip nispeten yeni nesil olarak tarif edilebilecek çimentolu bir malzemedir [7]. Şekil 1, fiberle güçlendirilmiş UHPC'nin, kendiliğinden yerleşen beton

(SCC), fiberle güçlendirilmiş beton (FRC) ve yüksek performanslı betondan (HPC) oluşan üç beton teknolojisinin bir kombinasyonu olarak ele alınabileceğini göstermektedir [8].

UHPC; çekme altında sünek davranışı sağlamak için çelik fiber takviyesinin kullanıldığı, karakteristik basınç dayanımı en az 150 MPa olan beton olarak tanımlanabilmektedir [9]. Çelik veya diğer fiberlerle güçlendirilmiş, 130 MPa – 150 MPa basınç dayanımına sahip UHPC'ler, daha düşük dayanımlı UHPC olarak kabul edilmektedir [9]. Normalde UHPC terimi; çok düşük su/bağlayıcı oranına (S/B veya S/Ç) sahip, fiber takviyeli, silis dumanı gibi mineral katkı içeren beton karışımını tanımlamak için kullanılır. Bu karışım; sıradan agrega yerine 0,15-0,60 mm arasında değişen çok ince kuvars kumunun varlığıyla karakterize edilmektedir. Hatta bazı araştırmacılar, karışımda iri agrega bulunmamasından dolayı UHPC'nin beton olmadığını bile öne sürmektedir [10,11]. Bununla birlikte, sünekliği arttırmak için ince çelik lifler eklenen UHPC'yi tanımlamak için harç yerine beton terimi seçilmiştir [12-14].



Şekil 1. Farklı özel beton türleri [8]

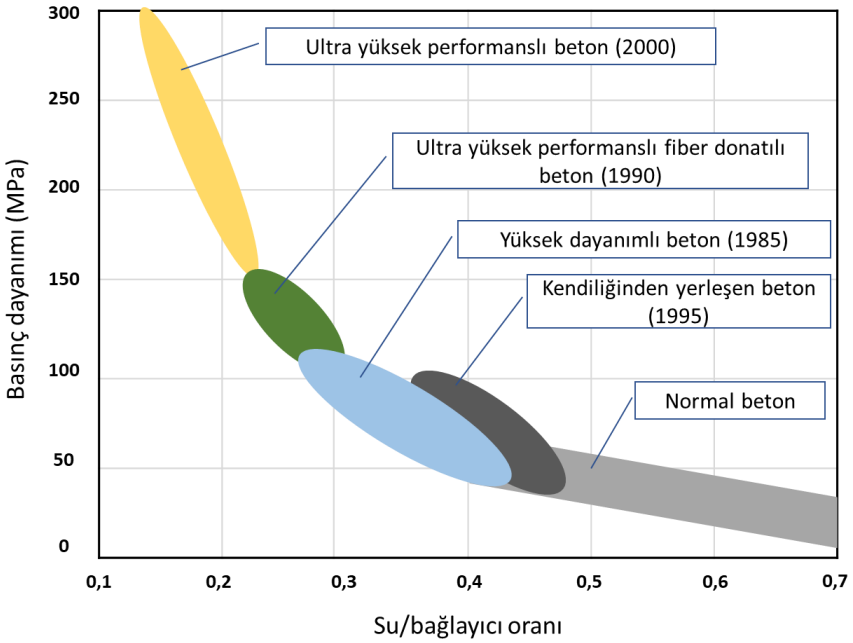


Şekil 2. Genel UHPC bileşenleri

Bugüne kadar farklı ülkelerde ve farklı üreticiler tarafından geliştirilen kompakt takviyeli kompozitler (CRC), çok ölçekli çimento kompozitler (MSCC) ve reaktif pudra betonu (RPC) gibi çeşitli UHPC türleri bulunmaktadır [15–17].

UHPC'NİN GELİŞTİRİLMESİ

Dünyanın en popüler insan yapımı malzemesi olan beton, gelecekte de talep görmeye devam edecek temel yapı malzemesidir. Dünya beton üretiminin yılda yaklaşık 10 milyar metreküp olduğu ve Çin'in şu anda dünya beton üretiminin yaklaşık %34'ünden sorumlu olduğu tahmin edilmektedir [18]. Betonun dayanım ve dayanıklılık gibi üstün özellikleri, birçok şekle kolayca girilebilmesi ve fiyatının göreceli olarak düşük olması, betonun inşaat sektörünün en popüler ve önemli malzemesi olarak görülmesini sağlamıştır. Yine de betonun kullanımında en çok öne çıkan özellik yüksek basınç dayanımıdır [20,21]. Şekil 3'te su/bağlayıcı oranına bağlı olarak beton teknolojisindeki önemli gelişmeler net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3. Farklı beton türleri için su/bağlayıcı oranına göre basınç dayanımları

1980'li yıllarda süperakışkanlaştırıcılar (SP) adı verilen yüksek oranlı su azaltıcıların, S/Ç'yi kademeli olarak 0,30'a kadar düşürmek için kullanılabileceği anlaşılmıştır. S/Ç'nin bu değerin altına düşürülmesi, yapılan bir çalışmada yüksek dozajda süperakışkanlaştırıcı ve silis dumanı (SF) ile S/Ç'yi 0,16'ya düşürmenin mümkün olduğunu bildirene kadar bir tabu olarak kabul edilmiştir [22]. Granül iskeletin tane boyutu dağılımı optimize edilerek sıkıştırılmış granül malzemeler aracılığıyla 280 MPa'a kadar beton basınç dayanımı elde edilebilmiştir. Bunlar, nihai dayanım ve dayanıklılık artışı elde etmek için mikro çatlaklar ve birbirine bağlı gözenek boşlukları gibi minimum sayıda kusura sahip bir malzemenin yaratılmasıyla sonuçlanmıştır.

Bu teknolojik gelişmeler; düşük gözenekli malzemelere ilişkin bazı temel bilgilerle birlikte, üstün mekanik özellikler sunan ultra yüksek performanslı Portland çimentosu bazlı malzemelerin geliştirilmesine yol açmıştır [1,14,23]. Genel olarak UHPC'deki gelişmeler en iyi şekilde 1980'ler öncesi, 1980'ler, 1990'lar ve 2000 sonrası olmak üzere dört aşamada tanımlanabilir.

1980'lerden önce; ileri teknoloji eksikliği nedeniyle UHPC üretimi yalnızca laboratuvarlarda sınırlı olup; vakumlu karıştırma, ısıyla kürleme gibi özel yöntemler gerektirmiştir. Bu dönemde araştırmacılar, betonun dayanımını artırmak amacıyla daha yoğun ve daha kompakt beton elde etmek için farklı yöntemler denemiştir. Vakumlu karıştırma ve ısıl kürleme ile betonun basınç

dayanımının 510 MPa'ya kadar çıkabileceği rapor edilmiştir [24]. Betonun yüksek basınç dayanımı elde edilebilmesine rağmen, hazırlanması çok zordu ve yüksek enerji tüketimine neden oluyordu.

1980'lerin başında; mikro hatasız çimento (MDF) icat edilmiştir [25,26]. MDF yaklaşımı, gözenekleri doldurmak ve çimento hamurundaki tüm kusurları gidermek için polimerleri kullanmaya dayanmaktadır. Bu işlem, malzemenin silindirlerden geçirilerek lamine edilmesi de dahil olmak üzere özel üretim koşulları gerektirmektedir. MDF betonu, 200 MPa basınç dayanımına sahip olabilmektedir. Ancak pahalı ham madde, karmaşık hazırlama süreci, yüksek sünme ve kırılganlık gibi durumlar bu uygulamayı sınırlamıştır [26].

MDF'nin icadından sonra Danimarka'da Bache tarafından yoğun silika parçacıklı çimento (DSP) hazırlanmıştır [22]. MDF'den farklı olarak DSP'nin hazırlanması aşırı üretim koşulları gerektirmemektedir. Parçacık paketleme yoğunluğunun iyileştirilmesi DSP'deki kusurları ortadan kaldırmaktadır. DSP betonu yüksek miktarda SP ve SF içermekte, aynı zamanda ısı ve basınç kürünü de kullanmaktadır. DSP'nin maksimum basınç dayanımı 345 MPa'ya kadar ulaşabilmektedir. Ancak ultra yüksek dayanım artışına rağmen bu malzemeler daha kırılgan hale gelmektedir. DSP betonlarının kırılganlık sorununu iyileştirmek için 1980'lerde çelik lifler kullanılmaya başlamıştır. Bu tip çelik lif katkılı beton nispeten yeni bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Son derece yoğun bir mikro yapı, çok yüksek dayanım, üstün dayanıklılık ve yüksek süneklik ile karakterize edilmektedir. İki iyi örnek, DSP'den hemen sonra ortaya çıkan CRC ve bulamaç infiltrasyonlu fiber betondur (SIFCON). Hem CRC hem de SIFCON mükemmel mekanik özellikler ve dayanıklılık sergilemektedir. Bununla birlikte, etkili SP'nin bulunmaması nedeniyle hem CRC hem de SIFCON'un yerinde uygulamayı engelleyen işlenebilirlik sorunları bulunmaktadır [26,27].

1990'lı yıllarda; ısıl işlem yoluyla RPC geliştirmek için inceliği ve reaktifliği arttırılmış bileşenler kullanmıştır [7]. RPC, UHPC'nin geliştirilmesinde önemli bir kilometre taşıdır. Bu konsept, farklı parçacıkların çok yoğun bir düzende yerleştirilmesine dayanmaktadır. RPC, laboratuvar ve saha deneylerinde kullanılan en yaygın UHPC türüdür ve yüksek bağlayıcı içeriği, çok düşük S/Ç oranı, silis dumanı (SF), ince kuvars tozu/kuvars kumu, etkili SP ve çelik lif kullanımı ile karakterize edilmektedir [7,23,28]. Kullanılan çelik lifler genellikle 12,5 mm uzunluğunda ve 180 µm çapındadır [7]. Matrisin homojenliğini arttırmak için kaba agregalar elimine edilmektedir. RPC'nin basınç dayanımı 200 MPa ile 800 MPa arasında değişmektedir. RPC'nin tipik bileşimi ve mekanik özellikleri Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. UHPC'nin tipik bileşimi ve mekanik özellikleri [7]

Bileşenler (kg/m³)	RPC 200	RPC 800
Portland Çimentosu	955	1000
Kum (150–600 µm)	1051	500
Öğütülmüş kuvars d50 = 10 µm)	–	390
Silis dumanı	239	230
Süperakışkanlaştırıcı	15	19
Çelik fiber	168	630
Su	162	190
Sıkıştırma basıncı	–	50 MPa
Isıl kür sıcaklığı	20 °C/90 °C	250 °C – 400 °C
Basınç dayanımı (MPa)	170 – 230	490 – 680
Çekme dayanımı (MPa)	25 - 60	45 - 102

RPC diğerlerinden farklı olarak çok iyi düzeyde işlenebilirlik göstermektedir. Bu işlenebilirlik özelliği, çimento esaslı malzemelerin büyük ölçekli uygulamaları için bir avantaj ve en temel gerekliliktir. 1990'ların sonlarında, RPC teknolojisiyle geliştirilen ilk UHPC, Ductal adı altında ticarileştirilmiştir. 1997 yılında Şekil 4'te gösterilen dünyanın ilk RPC ile üretilen yapısı, Kanada'nın Sherbrooke kentindeki yaya köprüsüdür [1,12,29–31].

Şekil 4. Kanada'daki Sherbrooke yaya köprüsü

2000 yılından bu yana UHPC'nin geliştirilmesinde büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Beton teknolojisinin daha da gelişmesiyle birlikte mühendisler, gelişmiş betonun yüksek dayanımının yanı sıra başka gelişmiş özelliklere de sahip olması gerektiğini fark etmiş ve bu da UHPC ve UHPFRC terimlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur [29]. Artan sayıda uygulamayı kapsayacak şekilde geniş bir yelpazede yeni beton formülasyonları geliştirilmiştir. Şu anda hem malzemeyi hem de başlangıç maliyetini düşürmeyi amaçlayan çeşitli araştırmacılar tarafından sürdürülebilir UHPC formülasyonları önerilmektedir [32-40]. Uçucu kül (FA), öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (GGBS), pirinç kabuğu külü (RHA) ve silis dumanı (SF) gibi tamamlayıcı çimentolu malzemeler; sürdürülebilir UHPC üretmek ve mevcut çimento kullanımını azaltmak amacıyla çimentonun bir kısmını ikame etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca UHPC'nin özelliklerinden ödün vermeden normal sıcaklıkta kürleme ile hazırlanabileceği de bildirilmektedir. Nispeten düşük maliyetli ve çevre dostu UHPC'nin ortaya çıkması nedeniyle, UHPC uygulamaları daha fazla ilgi görmektedir. 2000'li yıllardan itibaren birçok ülkede UHPC'nin çeşitli uygulamaları hayata geçmektedir. Fransa'da köprüler, cephe kaplamaları ve döşemeler gibi birçok yapı ve yapı elemanı UHPC ile inşa edilmiştir [41]. UHPC'nin ayrıca ABD otoyollarının bakımı ve geliştirilmesinde de artan uygulamaları vardır [42]. Avustralya'da köprü yapıları için UHPC geliştirme konusunda önemli faaliyetler yürütülmektedir [43]. İsviçre'de UHPC çoğunlukla yapıların yerinde güçlendirilmesi için uygulanmaktadır [44]. UHPC köprüleri Hollanda ve İspanya'da inşa edilmiştir [45-48].

UHPC ÜRETİM PRENSİPLERİ

Son 15 yılda kayda değer somut ilerlemeler kaydeden birçok araştırmacı, UHPC'yi uygulamalara hazır hale getirecek seviyeye kadar geliştirmiştir. Tasarlanan UHPC'nin basınç dayanımı 200 MPa'ya kadar ulaşabilmektedir. Çok yüksek dayanıma ve yoğun mikro yapıya sahip beton üretmenin temel fikri 1980'li yıllarda ortaya atılmıştır. En etkili ilerleme, son derece düşük S/Ç kullanarak kompozit gözenekliliğini en aza indirmek için yüksek oranda optimum şekilde paketlenmiş ultra ince parçacıklarla kolay akıcı betonun üretilmesini sağlayan verimli SP'nin geliştirilmesinden sonra gerçekleşmiştir.

Çeşitli araştırmacılar [1,7,21,35,34,37,49] UHPC tasarımında aşağıdaki temel prensipleri belirlemiştir:

1. Çok ince malzeme kullanarak granüler karışımın optimize edilmesi ve S/Ç'nin azaltılması yoluyla kompozit gözenekliliğin en aza indirilmesi.
2. SF'nin puzolanik reaksiyonunu hızlandırmak ve mekanik özellikleri arttırmak için sertleşme sonrası ısıl işlemle mikro yapının iyileştirilmesi.
3. İri agreganın ortadan kaldırılmasıyla homojenliğin iyileştirilmesi ve bunun sonucunda heterojenliğin mekanik etkilerinin azaltılması.
4. Küçük çelik fiberlerin eklenmesiyle sünek davranışın arttırılması.

İlk üç prensibin uygulanması, çok yüksek basınç dayanımına sahip bir beton elde edilmesini sağlamakta ve çelik liflerin eklenmesi, betonun hem çekme dayanımını hem de sünekliğini artırmaya yardımcı olmaktadır [7].

UHPC KARIŞIM BİLEŞİMLERİ

UHPC üretiminde anahtar faktörler; homojenlik, maksimum parçacık paketleme yoğunluğu ve minimum kusur boyutu sağlamak amacıyla karışım bileşenlerinin mikro ve makro özelliklerini geliştirmektir [1,23,50, 51-53]. UHPC bileşimlerinin seçimi yalnızca farklı tane boyutlarının göreceli oranlarına odaklanmamalı, aynı zamanda uygun fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip malzemelerin uygun seçimine de odaklanmalıdır. Ticari olarak temin edilebilen bazı UHPC karışımları Tablo 2'de gösterilmektedir. UHPC'nin başlangıç maliyeti geleneksel betonun çok üzerindedir. UHPC'nin faydalı özelliklerinden ödün vermeden malzeme maliyetini en aza indirmek için büyük çaba sarf edilmektedir.

Tablo 2. Ticari UHPC bileşimleri [26,54,55]

Bileşenler (kg/m^3)	BCV	BSI	Cemtec	Ductal	Dura
Portland çimentosu	2115	1114	1050	712	911
Kum	(Premix)	1072	514	1020	911
Silis dumanı		169	268	231	225
Öğütülmüş kuvars		–	–	211	–
Priz hızlandırıcı	–	–	–	30	–
Çelik fiber	156	234	858	156	173
Süperakışkanlaştırıcı	21.5	40	44	30.7	38
Su	159	211	180	109	200

UHPC STANDARTLARI

2016 ortalarında, UHPC tasarımında genel olarak kullanılan teknik yönergelerin ve profesyonel önerilerin yerine geçmek üzere UHPC için NF P18-470 ve NF P18-710 olarak bilinen iki Fransız ulusal standardı yayımlanmıştır. Bu standartlar geliştirilmeden önce, UHPC'nin tasarlanması ve üretilmesi için çeşitli önerilere ve kılavuzlara başvurulmaktaydı [56, 58-60]. Ancak, bu kılavuzların resmi bir statüye sahip olmaması ve bu nedenle projelerde bunlara referans verilmesini ve kullanılmasını zorlaştırması nedeniyle bu teknik kılavuzların ve profesyonel önerilerin yetersiz olduğu görüldü. Yeni standartların mevcudiyeti, UHPC'nin uluslararası düzeyde daha fazla kabul görmesine yardımcı olmaktadır.

NF P18-470'de [57] önerildiği gibi UHPC; çekme altında sünek davranış elde etmek için çelik lifler içeren, çimento matrisli ve yaklaşık 150 MPa karakteristik basınç dayanımına sahip bir malzemeyi ifade etmektedir. SP gibi katkıların kullanılması nedeniyle UHPC karışımları genellikle düşük bir S/Ç'ye sahiptir. Karışım suyu, agrega içindeki su ve katkılardan oluşan farklı bileşenler tarafından betona eklenen su miktarının kontrol edilmesinde özel dikkat gösterilmelidir. Tüm UHPC malzemeleri, Tablo 3'te belirtildiği gibi NF P18-470 [57]'te belirtilen gereksinimleri karşılamalıdır.

Tablo 3. NF P18-470'e göre UHPC malzemeleri gereksinimi [57].

Özellikler	Önerilen değerler
Maksimum agrega çapı	≤ 10mm
Taze beton birim ağırlık	2200 – 2800 kg/m3
Çekme dayanımı (28 gün)	≥ 6 MPa
Porozite (90 gün)	≤ %9
Klorür iyonu geçirimlilik katsayısı (90 gün)	≤ 0.5 x 10^{-12} m^2/s
Görünür gaz geçirimliliği (90 gün)	≤ 9.0 x 10^{-19} m^2

Bir diğer ilgili standart ise 2017 yılında yayımlanan ASTM C1856/C1856M-17 “Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete” standardıdır. Bu standart, malzemenin özelliklerini belirlemek amacıyla ultra yüksek performanslı betonun (UHPC) temsili bir numunesi kullanılarak laboratuvarda ve sahada numunelerin üretilmesi ve test edilmesine yönelik prosedürleri kapsamaktadır. Standarda göre UHPC; basınç dayanımı en az 120 MPa, agrega maksimum boyutu 5 mm'den küçük olan ve 200 ila 250 mm arasında bir yayılma değerine sahip olan bir beton karışımıdır.

Avrupa’da ise CEN/TC 104/SC 2/WG 7 çalışma grubu tarafından “Execution Of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)” standardizasyon çalışmaları devam etmektedir.

UHPC UYGULAMALARI

UHPC'nin üstün performansı; son yıllarda artan uygulama sayısıyla altyapı işleri, bina inşaatları ve birçok niş pazar için yeni fırsatlar sunmaktadır. Grand View Research (GVR) tarafından rapor edilen pazar araştırmasına göre, UHPC küresel pazar büyüklüğü 2016 yılında 892 milyon ABD Doları değerinde olup, bu rakamın 2025 yılında %8,6 artarak 1867,3 milyon ABD Dolarına ulaşması

beklenmektedir [3]. UHPC, Avustralya ve Yeni Zelanda [62], Avusturya [63], Kanada [12,64], ABD [65,66], Almanya [5], Fransa [67], İtalya [68], Japonya [61], Malezya [69], Hollanda [70], Slovenya [71] ve Güney Kore [72] gibi birçok ülkede ticarileştirilmesiyle dünya çapında ilgi odağı haline gelmiştir. Son yirmi yılda, UHPC teknolojisini geleceğin sürdürülebilir inşaat malzemesi olarak sanayileştirmek amacıyla dünya çapındaki akademisyenler ve mühendisler tarafından kapsamlı araştırma projeleri yürütülmüştür [73]. Bir veya daha fazla bileşeninde UHPC kullanılarak inşa edilmiş 200'den fazla tamamlanmış köprü bulunmaktadır [2].

Altyapılar

UHPC'nin inşaatlarda uygulanmasını amaçlayan ilk araştırma ve geliştirmeler 1985 yılında başlamıştır [1]. O zamandan bu yana, inşaatların ve mimari yaklaşımların özel gereksinimlerini karşılamak için farklı teknik çözümler ve UHPC formülasyonları kullanıma sunulmuştur. UHPC uygulamasındaki atılımlar arasında 1997 yılında inşa edilen Kanada Sherbrooke'taki Magog Nehri üzerindeki ilk öngerilmeli hibrit yaya köprüsü [12], Fransa'daki Cattenom ve Civaux nükleer soğutma kulelerinin agresif ortamındaki aşınmış çelik kirişlerin değiştirilmesi [29,74] ve 2005 yılında Fransa'da otomobil ve kamyonlar için yapılmış Bourg-les-Valence köprüsü yer almaktadır [75]. UHPC'nin gelişmiş mekanik özellikleri ve dayanıklılığı, birçok yaygın köprü bileşeni için geleneksel tasarım yöntemlerinin yeniden değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. 2004 yılında Güney Kore'deki Seonyu yaya köprüsü UHPC kullanılarak 120 m ana açıklığa sahip olarak inşa edilmiştir [76]. UHPC kullanılarak inşa edilen dünyanın en uzun açıklıklı köprüsü olan Seonyu yaya köprüsünün inşası, geleneksel betonda kullanılan malzeme miktarının yalnızca yarısını gerektirmiş ve buna rağmen eşdeğer dayanım özellikleri sağlamıştır [48]. Japonya'da 50 m açıklıklı Sakata-Mirai yaya köprüsü 2003 yılında tamamlanmıştır. Köprü, UHPC üst yapısındaki delikli bir ağın hem yapının ağırlığını nasıl azaltabildiğini hem de aynı zamanda estetik açıdan hoş olabileceğini göstermiştir [77]. Bu inşaatların başarısının ardından Avrupa, Kuzey Amerika (ABD ve Kanada), Asya ve Avustralya'da yaya trafiğine yönelik UHPC köprüleri inşa edilmiştir [78].

Şekil 5. Bourg-les-Valence köprüsü, Fransa

Şekil 6. Seonyu yaya köprüsü, Güney Kore (2004)

UHPC teknolojisi kullanılarak inşa edilen ilk karayolu köprüleri 2005 yılında ortaya çıktı ve aynı dönemde dört köprü inşa edildi. Avustralya'da bulunan Shepherd's Gully köprüsü [70,79], Fransa'daki Bourd-les-Valence köprüsü [80] ve Japonya'daki Horikoshi C-rampa köprüsü [77] bu dönemde yapılmıştır. Wapello Country Iowa'daki Mars Hill Köprüsü, 2006 yılında ABD'de inşa edilen ilk UHPC karayolu köprüsüdür [81]. Tokyo Monoray ve Taisei Corporation, 2007 yılında 40 m uzunluğunda bir monoray UHPC kirişi inşa etmiştir [77]. 2008 yılında dünyanın ilk bölümsel UHPC kompozit tabliyeli yol köprüsü Tokyo Uluslararası Havalimanı'nda inşa edildi ve bu köprü dünyanın en büyük UHPC karayolu köprüsü olmuştur [77].

ABD Federal Karayolu İdaresi'nin (FHWA) 2013 yılında yayımladığı rapora göre ABD ve Kanada'da UHPC kullanılan toplam 55 köprü inşa edilmiştir. Avrupa'da yaklaşık 22 UHPC köprüsü, Asya ve Avustralya'da ise 27 UHPC köprüsü bulunmaktadır [42]. Bu uygulamalarda UHPC kirişler, güverte panelleri, koruyucu katmanlar, farklı bileşenler arasında sahada dökülmüş bağlantılar vb. kullanılmıştır [82–87]. Geleneksel betonarme köprülerle karşılaştırıldığında, UHPC bileşenleri veya bağlantıları ile inşa edilen köprülerin çoğu; hacimde ve öz ağırlıkta önemli azalma, basitleştirilmiş uygulama ve daha iyi dayanıklılık ile birlikte ince bir görünüm sergilemektedir [54]. Çoğu UHPC yapısı, geleneksel güçlendirilmiş veya öngerilmeli beton elemanların yalnızca yarısı kadar kesit derinliği gerektirmekte; bu da ağırlığını %70 kadar azalmasını sağlamaktadır [88]. UHPC yapılarında kullanılan bu daha hafif yapı ve malzeme verimliliği, daha düşük karbon ayak izleri sayesinde sürdürülebilir bir yapıya yol açmaktadır.

Klorürün neden olduğu korozyon, deniz yapıları için her zaman en büyük tehdit olmuştur. UHPC'nin yüksek dayanıklılığı ve klorüre karşı direnci, onu dış mekanlarda veya ciddi şekilde maruz kalan ortamlarda kullanım için ideal bir malzeme haline getirmektedir. Deniz yapılarında UHPC kullanılması, klorüre karşı büyük direnç sağlayan dayanıklılığı nedeniyle donatının korozyonunu önleme çözümlerinden biridir. UHPC'nin deniz yapılarındaki uygulamaları umut verici sonuçlarla rapor edilmiştir [77,89,91]. UHPC ile inşa edilen çoğu çapraz deniz köprüsü; çok daha düşük ağırlık, daha iyi dayanıklılık, daha az bakım ve daha az kesit elemanıyla basitleştirilmiş uygulama

sergilemektedir. UHPC ayrıca iskeleler ve petrol platformları gibi deniz yapılarının inşaatı, kaplaması, onarımı ve güçlendirilmesi potansiyeline de sahiptir. UHPC, klorürlerin yanı sıra çoğu kimyasal ve fiziksel saldırıya karşı da büyük bir dirence sahiptir. Bu, UHPC'nin daha zorlu çevre koşullarında uygulanma olasılığını sağlamaktadır.

Binalar

Son on yılda UHPC ile güneş kırıcılar, cephe kaplamaları ve çatı bileşenleri gibi yapı elemanları alanına da ilgi duyulmaya başlanmıştır. UHPC; ince, hafif, dayanıklı ve estetik yapılar üretme kabiliyeti nedeniyle tercih edilmektedir. UHPC teknolojisini benimseyen en son binalar arasında Paris'teki Louis Vuitton Pour la Creation Vakfı bulunmaktadır [30,90]. 2014 yılında tamamlanan bu proje, yüksek geometrik karmaşıklığıyla öne çıkmaktadır. Kaplama, her biri vakum dolum kalıpları aracılığıyla benzersiz şekilde tasarlanmış prefabrik UHPC panellerden oluşmaktadır. Bir diğer harika örnek ise Fransa'nın Marsilya liman bölgesinde yer alan Avrupa ve Akdeniz Medeniyetleri Müzesi'dir (MUCEM) [91]. Dünyada UHPC'den bu kadar kapsamlı yararlanan ilk binadır. Daha önce de belirtildiği gibi UHPC, Kanada'daki Shawnessy LRT istasyonunda görüldüğü gibi çatılarda ve kanopilerde de kullanılabilmektedir. Fransa'da inşa edilen atık su arıtma tesisindeki prekast ince eğri kabuklar gibi benzer uygulamaların başka örnekleri de vardır [92]. Bunlar Paris'teki Jean Bouin stadyumunun çatısı [91]; İsviçre'nin Lozan kentindeki Olimpiyat müzesinin çatısı [93]; Katar Ulusal Müzesi'nin kaplaması [94] ve Fas'taki Rabat havaalanının Terminal 1'inin cephesidir [95].

Şekil 7. Avrupa ve Akdeniz Medeniyetleri Müzesi (MUCEM), Marsilya

Şekil 8. Shawnessy LRT İstasyonu, Kanada

Yapısal olmayan ürünler

UHPC, mevcut beton yapıların onarımında bir kaplama olarak yaygın şekilde kullanılmakta ve daha az bakım işi için mekanik ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmektedir [96,97]. UHPC kaplamasına ilişkin ilk uygulama İsviçre'deki La Morge Nehri üzerindeki bir köprüde rapor edilmiştir [98]. Ağır hasar gören köprü tabliyesi ve bordürler UHPC ile değiştirilmiştir. Prefabrik UHPC bordür uygulamasından 1 yıl sonra herhangi bir çatlak tespit edilmemiştir. Bu malzemelerin onarım ve rehabilitasyon uygulamalarındaki başarısı, benzer teknolojinin bakım ihtiyacı olan köprülerde kullanılmasının önünü açmıştır. UHPC kullanılarak hidrolik yapı onarımı ve rehabilitasyonu Japonya'daki Hosokawa Nehri Tüneli'nde [99], Fransa'daki Caderousse ve Beaucaire Barajlarında [100] yapılmıştır.

UHPC, yüksek eğilme dayanımı ve yoğun mikro yapısı gibi gelişmiş özellikleri nedeniyle özel koşullar için kullanılma potansiyeline sahiptir. UHPC'nin, Çin'deki yüksek hızlı demiryolları boyunca kapak plakaları için [101,102] ve Fransa'daki nükleer reaktör muhafaza duvarlarının güçlendirilmesi için kullanıldığı rapor edilmiştir [103]. Önceki araştırmacıların [104-107] bildirdiği gibi, denizdeki birçok rüzgâr değirmeni başarılı bir şekilde tasarlanmıştır ve denizcilik sinyalizasyon yapılarının UHPC ile yenilenmesinin de çok etkili olduğu kanıtlanmıştır [89]. Japonya'da Haneda Havaalanı, deniz üzerine inşa edilen devasa bir UHPC levhası kullanılarak genişletilmiştir [77]. Bu inşaat bugüne kadar gerçekleştirilen en büyük UHPC projesidir.

Ülkemizde RPC üzerine yapılan uygulamalı çalışmalardan biri, İstanbul Teknik Üniversitesi ve İSTON İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları A.Ş'nin ortak çalışması olan yağmur suyu ızgarası ve rögar kapaklarıdır. Bu proje sayesinde çelikten yapılan ızgara ve kapakların çalınması sorununun önüne geçilebilmekte, kalıcı ve taşıt yüklerine mukavim elemanlar üretilebilmektedir [108].

Şekil 9. RPC rögar kapağı ve ızgara [109]

ZORLUKLAR

Son yirmi yılda, UHPC birçok ülkede hem yapısal hem de yapısal olmayan prekast bileşenler için kullanılmaktadır. Ancak bu olağanüstü teknoloji, yüksek başlangıç maliyetleri ve tasarım kodlarının eksikliği nedeniyle günlük kullanımda ana akım teknoloji haline gelmekte zorlanmaktadır. Ayrıca, yüksek UHPC malzeme maliyeti ve yüksek enerji tüketimi, geleneksel beton tasarımlarıyla rekabet etmeyi zorlaştırmakta ve dolayısıyla uygulamasını kısıtlamaktadır. Portland çimentosu, çelik fiber ve SP miktarının azaltılması amacıyla yerel ham madde ve atık ürünlerin kullanımıyla malzeme karışımlarını değiştirmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [110]. Bu nedenle maliyeti ve çevreye etkisi daha düşük olan UHPC'nin altyapı pazarı tarafından kabul edilmesi ve altyapı sahiplerinin ilgisini çekmesi çok daha kolay olacaktır. Maliyetle ilgili bir diğer konu da UHPC yapılarının yaşam döngüsü maliyetidir. UHPC'nin başlıca avantajlarından biri üstün dayanıklılığıdır. UHPC ile yapılan yapılar,

geleneksel beton yapılarına kıyasla gelecekte daha düşük bakım ve onarım maliyetiyle çok daha uzun hizmet ömrüne sahip olabilmektedir [111].

UHPC'nin son birkaç yıldaki uygulamalarıyla, UHPC yapılarının tasarımı ve inşası konusunda ampirik beceri ve bilgi birikimi kazanılmıştır [67]. UHPC yapılarının tasarımı ve inşasına yönelik kılavuzlar, sahadan elde edilen önceki deneyim ve bilgilere, deneysel araştırmalara ve bilimsel hesaplamalara dayanarak geliştirilmelidir. Farklı ülkelerdeki UHPC deneyimlerinin önemli çeşitliliği nedeniyle uluslararası öneriler üretmek zordur [67]. UHPC'ye olan ilginin ve uygulamaların artması nedeniyle Fransa, Japonya, Çin, Almanya ve İsviçre gibi ülkeler standardizasyon çalışmalarına başlamıştır. 2016 yılının ortalarında Fransa, UHPC ile ilgili ilk ulusal standardı yayımlamıştır [57].

UHPC yapılarının tasarım ve yapım yöntemleri, geleneksel betonarme hükümlerden farklıdır. Bugüne kadar UHPC tasarımı ve inşasında yetenekli mimar, mühendis ve uzmanların sayısı hala sınırlıdır. UHPC için geniş bir uygulama beklentisi görülebildiğinden, UHPC teknolojisine ve özel tasarım konularına aşina olan yetenekli ekiplere ihtiyaç vardır [67]. Şu anda, küresel UHPC pazarı için sadece yaklaşık beş büyük oyuncu belirlenebilmiş olup, ürünler çoğunlukla Avrupa ve Kuzey Amerika'da dağıtılmaktadır [102].

SONUÇLAR

UHPC, homojenlik ve paketleme yoğunluğu iyileştirmeleri sayesinde elde edilen gelişmiş dayanıklılığa sahip yeni bir malzemedir. 1990'ların başındaki tanıtımından bu yana, çeşitli ülkelerin bunu bina ve köprü uygulamalarına tanıtmaya çalışmasıyla, UHPC yapılarının malzemesi, tasarımı ve inşası hakkında büyük bir bilgi birikimi elde edilmiştir. Teknik kılavuzlar Fransa, Japonya, Almanya ve İsviçre'de yayınlanmıştır. UHPC tasarımında genel olarak atıfta bulunulan teknik yönergelerin ve profesyonel önerilerin yerine geçmek üzere UHPC için 2016 yılında iki Fransız ulusal standardı yayımlanmıştır. Bu yeni standartlar, UHPC'nin uluslararası düzeyde daha fazla kabul edilmesine yardımcı olması beklenen açık ve kodlanmış spesifikasyonlara izin vermektedir. Avrupa, Kuzey Amerika ve Asya'daki bazı uygulamalar, sürdürülebilirlik ve hizmet ömrüne odaklanan UHPC teknolojisinin kanıtlanmış faydalarını göstermektedir.

UHPC uygulamasındaki başarılar dünya çapında görülmektedir. Ancak UHPC, uygulamalarını sınırlayan engeller nedeniyle ilerleme hızı yavaştır. Yüksek başlangıç maliyeti, sınırlı kodlar, tasarım zorlukları ve karmaşık üretim teknikleri, sınırlı mevcut kaynaklarla birlikte, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, modern inşaat endüstrisinde ticari gelişimini ve uygulamasını ciddi şekilde engellemektedir. UHPC'nin büyük potansiyelinden yararlanmak için sektörün akademik kurumlarla, devlet kurumlarıyla ve son kullanıcılarla çok daha iyi iş birliği yapması gerekmektedir. Bu yeni malzemeye ilişkin bilgi ve pratik deneyimler masaya yatırılmalı ve tüm taraflar arasında paylaşılmalıdır.

UHPC'nin malzeme hassasiyeti nedeniyle yerel öneriler ve tasarım standartları oluşturulmalıdır. Daha fazla UHPC kabulü için, pahalı UHPC kompozitlerinin yerini alacak ve çevresel etkiyi en aza indirecek benzer işlevlere sahip alternatif malzemeler kullanan sürdürülebilir ve uygun maliyetli UHPC'nin geliştirilmesine yönelik daha fazla çalışmaya ihtiyaç bulunmaktadır. Tasarımcıların, mimarların ve mühendislerin bu yeni malzeme ve teknolojiye daha açık olmaları gerekmektedir. Bahsedilen tüm bu çabalarla birlikte UHPC, sürdürülebilir inşaatlar için daha eksiksiz bir çözümle hem mevcut kullanımlar hem de gelecekteki kullanımlar için inşaat malzemesi haline gelecektir.

KAYNAKLAR

1. M. Schmidt, E. Fehling, Ultra-High performance concrete: research development and application in Europe, The 7th International Symposium on the Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete (2005) 51–78.
2. Y.L. Voo, S. Foster, L.G. Pek, Ultra-High Performance Concrete – Technology for Present and Future. ACI Singapore, Building Construction Authority Joint Seminar on Concrete for Sustainability, Productivity and The Future, (2017) .
3. Grand View Research (GVR). Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Market Analysis By Product, By Application, And Segment Forecasts 2014 – 2025. 2017.
4. K.T. Maher, Y.L. Voo, Taking ultra-high performance concrete to new height – the malaysian experience, Aspire the Concrete Bridge Magazine, Summer 2016 (2016) 36–38.
5. M. Schmidt, Sustainable building with ultra-High performance concrete (UHPC) – coordinated research program in Germany, Proceedings of Hipemat, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, (2012) , pp. 17–25.
6. B.S. Kim, S. Kim, Y.J. Kim, S.Y. Park, K.T. Koh, C. Joh, R&D activities and application of ultra-High performance concrete to cable-stayed Bridges, Proceedings of Hipemat, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, (2012) , pp. 865– 872.
7. P. Richard, M. Cheyrezy, Composition of reactive powder concretes, Cem. Concr. Res. 25 (7) (1995) 1501–1511.
8. E.T. Camacho, Dosage Optimization and Bolted Connection for UHPFRC Ties. PhD Thesis, University of Valencia, 2013.
9. Association Française de Génie Civil (AFGC), French Interim Recommendations of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC), French association of civil engineering, 2002.
10. A. Sadrekarimi, Development of light weight reactive powder concrete, J. Adv. Concr. Technol. 2 (3) (2004) 409–417.
11. L.V.N. Raja, T. Sujatha, Study on properties of modified reactive powder concrete, Int. J. Eng. Res. Technol. 3 (10) (2014) 937–940.
12. P.Y. Blais, M. Couture, Precast, prestressed pedestrian Bridge - world's first reactive powder concrete structure, PCI J. 44 (5) (1999) 60–71.
13. P. Aitcin, Cements of yesterday and today—concrete of tomorrow, Cem. Concr. Res. 30 (9) (2000) 1349–1359.
14. V.T. Nguyen, G. Ye, The use of rice husk ash to produce ultra-High performance concrete in sustainable construction, The International Conference on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering (2011).
15. T.L.V. Voort, M.T. Suleiman, S. Sritharan, Design and Performance Verification of UHPC Piles for Deep Foundations: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, Iowa Highway Research Board & Iowa Department of Transportation, 2008.
16. B. Nematollahi, R.M. Saifulnaz, M.S. Jafaar, Y.L. Voo, Review on ultra High performance 'Ductile' concrete (UHPdC) technology, Int. J. Civil Struct. Eng. 2 (3) (2012) 1003–1018.
17. Y.L. Voo, B. Nematollahi, A.B.M. Said, B.A. Gopal, T.S. Yee, Application of ultra-High performance fiber reinforced concrete – the Malaysia perspective, Int. J. Sustain. Constr. Eng. Technol. 3 (1) (2012) 26–44.
18. Global Concrete Report 2023, https://www.global-concrete.com/reports
19. M. Malesev, V. Radonjanin, S. Marinkovic, Recycled concrete as aggregate for structural concrete production, Sustain. J. (2010) 1204–1225.
20. E.F. O'Neil, B.D. Neeley, J.D. Cargile, Tensile Properties of Very High Strength Concrete for Penetration-Resistant Structures, US Army Engineers Research and Development Center, 2001.
21. A. Spasojevic, Structual Implications of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete in Bridge Design, PhD Thesis Lausanne, Switzerland, (2008) .
22. H.H. Bache, Densified cement ultrafine particle-base materials, 2nd International Conference on Superplasticizers in Concrete (1981) 185–213.
23. C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, Z. Fang, A review on ultra-High performance concrete: part I. Raw materials and mixture design, Constr. Build. Mater. (2015) 741–751.
24. R. Pierer, C. Marcel, Composition of reactive powder concretes, Cem. Concr. Res. 25 (1995) 1501–1511.
25. J.D. Birchall, A.J. Howard, K. Kendal, Flexural strength and porosity of cements, Nature 289 (1981) 388–389.
26. P. Rossi, A. Arca, E. Parant, P. Fakhri, Bending and compressive behaviors of a New cement composite, Cem. Concr. Res. 35 (1) (2005) 27–33.
27. N.A. Soliman, Development of UHPC Using Waste Glass Materials – Towards Innovative Eco-Friendly Concrete PhD Thesis, University Sherbrooke, Canada, 2016.
28. J.J. Buck, D.L. McDowell, M. Zhou, Effect of microstructure on load carrying and energy dissipation capacities of UHPC, Cem. Concr. Res. 43 (2013) 34–50.
29. P. Acker, M. Behloul, Ductal1 technology: a large spectrum of properties, ultra-High performance concrete, Kassel, Germany (2004) 11–23.
30. T. Zdeb, UHPC - properties and technology. Bulletin of the Polish academy of sciences, Tech. Sci. 61 (1) (2013) 183–193.
31. S. Abbas, A.M. Soliman, M.L. Nehdi, Exploring mechanical and durability properties of ultra-High performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages, Constr. Build. Mater. 75 (2015) 429–441.
32. S.L. Yang, S.G. Millard, M.N. Soutsos, S.J. Barnett, T.T. Le, Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-High performance fibre reinforced concrete (UHPFRC), Constr. Build. Mater. 23 (6) (2009) 2291–2298.
33. N.V. Tuan, G. Ye, K.V. Breugel, et al., The study of using rice husk ash to produce ultra-High performance concrete, Constr. Build. Mater. 25 (4) (2011) 2030–2035.

34. A.M.T. Hassan, S.W. Jones, G.H. Mahmud, Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra High performance fibre reinforced concrete (UHPFRC), Constr. Build. Mater. 37 (2012) 874–882.
35. B.A. Tayeh, B.H.A. Bakar, M.A.M. Johari, Y.L. Voo, Utilization of ultra-High performance fibre concrete (UHPFC) for rehabilitation – a review, The 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering, (2013) , pp. 525–538.
36. S.H. Park, D.J. Kim, G.S. Ryu, K.T. Koh, Tensile behaviour of ultra-High performance hybrid fibre reinforced concrete, Cem. Concr. Composite 34 (2012) 172–184.
37. P. Rossi, Influence of fibre geometry and matrix maturity on the mechanical performance of ultra-high-performance cement based composites, Cem. Concr. Compos. 37 (2013) 246–248.
38. W. Wang, J. Liu, F. Agostini, C.A. Davy, F. Skoczylas, D. Corvez, Durability of an ultra High performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) under progressive aging, Cem. Concr. Res. 55 (2014) 1–13.
39. R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Mix design and properties assessment of ultra- High performance fibre reinforced concrete (UHPFRC), Cem. Concr. Res. 56 (2014) 29–39.
40. R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Development of an eco-Friendly ultra-High performance concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses, Cem. Concr. Compos. 55 (2015) 383–394.
41. J. Resplendino, F. Toutlemonde, Marseille, FranceThe UHPFRC Revolution in Structural Design and Construction, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete2013, The UHPFRC Revolution in Structural Design and Construction, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 791–804.
42. The Federal Highway Administration (FHWA), Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for The Bridge Community Publication No. FHWA-HRT-13-060, McLean, VA, (2013) , pp. 22101–22296.
43. B. Cavill, G. Chirgwin, The world's first RPC Road Bridge spepherds gually Creek Bridge, NSW, B. Cavill, G. Chirgwin (Eds.), Proceedings of 5th Austroads Bridge Conference (2004).
44. E. Bruhwiler, E. Denarie, Rehabilitation of concrete structures using ultra-High performance fiber reinforced concrete, Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2008) 895–902.
45. S. Grunewald, H. Kohne, M. Nio, et al., Optimization of a slender Bridge in UHPFRC, Proceedings of International SympoSium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 379–388.
46. D. Tirimanna, J. Falbr, FDN modular UHPFRC Bridges, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 0395–0404.
47. A.E. Naaman, K. Wille, The path to ultra-High performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC): Five decade of progress, Proceedings of 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials (2012) 3–13.
48. Y.L. Voo, S.J. Foster, C.C. Voo, Ultrahigh-performance concrete segmental bridge technology: toward sustainable bridge construction, J. Bridge Eng. (2014).
49. J. Ma, H. Schneider, Properties of ultra-High-performance concrete, Leipzig Annu. Civil Eng. Rep. (LACER) (2002) 25–32.
50. B.A. Tayeh, B.H.A. Bakar, M.A.M. Johari, Y.L. Voo, Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra-high performance fiber concrete overlay, Constr. Build. Mater. 36 (2012) 538–548.
51. C.P. Vernet, Ultra Durable Concrete: Structure at The Micro and Nanoscale, MRS Bulletin Retrived from, (2004) . http://www.mrs.org/publications/ bulletin.
52. S. Shah, W. Weiss, Ultra High strength concrete; Looking toward the future, ACI Special Proceedings (1998).
53. K. Wille, A. Naaman, G. Montesinos, Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): a simpler way, ACI Mater. J. 108 (1) (2011) 46–54.
54. B. Graybeal, Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete, Report No. FHWA-HRT-06-103, FHWA, U.S. Department of Transportation, 2006.
55. L.Y. Voo, Shear strength of 160 MPa steel fiber reinforced reactive powder concrete bridge girders without stirrups, The Institution Eng. J., Malays. 67 (2) (2006) 41–46.
56. R. Jacques, L. Cete, First recommendation for ultra-High-performance concrete and example of application, in: M. Schmidt, E. Fehling, C. Geisenhansluke (Eds.), Ultra-High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, 2004, pp. 79–90.
57. NF P 18-470, Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete – Specifications, Performance, Production and Conformity, AFNOR, Paris, 2016.
58. NF P 18-710, Design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC), AFNOR, Paris, 2016.
59. Association Française de Génie Civil (AFGC), French Interim Recommendations of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC), French association of civil engineering, 2002.
60. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Progress Report on Ultra-High Performance Concrete No. 561, German Committee of Reinforced Concrete, Berlin, Germany, 2008.
61. Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structure (Draft), JSCE Guideline for Concrete, 2009 No.9.
62. M. Rebentrost, G. Wight, Perspective on UHPCs from a specialist construction Company Chapter 13, in: F. Toutlemonde, J. Resplendino (Eds.), Designing and Building With UHPFRC: State of the Art and Development, ISTE, London, 2011, pp. 189–206.
63. B. Freytag, G. Heinzle, M. Reichel, L. Sparowitz, WILD- Bridge scientific preparation for smooth realisation, Proceeding of 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials (2012) 881–888.
64. B. Graybeal, UHPC in US Highway Infrastructure. Designing and Building With UHPFRC: State of the Art and Development Chapter 15, John Wiley & Sons, Great Britian, 2011, pp. 221–234.

65. H. Park, E. Chuang, F.J. Ulm, Model-Based Optimization of Ultra-High Performance Concrete Highway Bridge Girders, Mass Institute Technology, Cambridge, 2003.
66. B.A. Graybeal, J.L. Hartmann, Construction of an optimized UHPC vehicle Bridge, 7th International Symposium on the Utilization of High-Strength High Performance Concrete 2 (2005) 1109–1118.
67. J. Resplendino, F. Toutlemonde, The UHPFRC revolution in structural design and construction, International Symposium on Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (2013) 791–804.
68. A. Meda, G. Rosati, Design and construction of a Bridge in very High performance fiber-reinforced concrete, ASCE J. Bridge Eng. 8 (5) (2003) 281–287.
69. Y.L. Voo, P.C. Augustin, T.A.J. Thamboe, Construction and design of a 50M single span UHP ductile concrete composite Road Bridge, Struct. Eng. 89 (15– 16) (2011) 24–31.
70. N. Kaptijn, J. Blom, A New Bridge deck for the Kaag bridges— the first CRC (compact reinforced composite) application in civil infrastructure, International Symposium on Ultra-High Performance Concrete (2004) 49–57.
71. A. Sajna, E. Denarié, V. Bras, Assessment of a UHPFRC based Bridge rehabilitation in Slovenia, Two years after application, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Material (2012) 937–944.
72. R. Ricciotti, The Footbridge of Peace, Seoul, South Korea, Concrete (London) 36 (10) (2002) 11–13.
73. Y.L. Voo, W.K. Poon, Ultra High performance ductile concrete (UHPdC) for Bridge engineering, Proceedings of the International Conference and Exhibition on Bridge Engineering (2009).
74. J. Resplendino, First recommendations for ultra-High performance concretes and examples of application, Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete (2004) 79–89.
75. Z. Hajar, A. Simon, D. Lecointre, J. Petitjean, Design and construction of the world first ultra-High performance Road Bridges, Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete (2004) 39–48.
76. M. Behloul, K.C. Lee, Ductal! Seonyu footbridge, Struct. Concr. 4 (4) (2003) 195–201.
77. Y. Tanaka, K. Meakawa, Y. Kameyama, et al., The Innovation and Application of UHPFRC Bridges in Japan. Designing and Building With UHPFRC – State of the Art and Development, ISTE Ltd, London, 2011, pp. 149–187.
78. F. Toutlemonde, J. Resplendino, Designing and Building With UHPFRC: State of the Art and Development, ISTE, London, 2011.
79. S.J. Foster, The application of steel fibres as concrete reinforcement in Australia: from material to structure, Mater. Struct. 42 (9) (2009) 1209–1220.
80. J. Resplendino, Ultra-High performance concretes—recent realizations and research programs on UHPFRC Bridges in France, 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete (2008) 31–43.
81. S. Aaleti, S. Sritharan, D. Biewagen, B. Moore, Precast UHPC waffle deck panels and connections for accelerated Bridge construction, Proceedings of the PCI National Bridge Conference (2011) Paper 84.
82. D. Tirimanna, J. Falbr, FDN modular UHPFRC Bridges, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 395–404.
83. B. Graybeal, UHPC in the U.S. Highway infrastructure: experience and outlook, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber- Reinforced Concrete (2013) 361–370.
84. H. Musha, H. Ohkuma, T. Kitamura, Innovative UFC structures in Japan, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber- Reinforced Concrete (2013) 17–26.
85. S.Y. Park, S.T. Kim, J.R. Cho, et al., Trial construction of UHPC highway Bridge, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber- Reinforced Concrete (2013) 371–378.
86. Y. Brugeaud, Express Bridge deck and light duty Bridge, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 389–394.
87. B.S. Kim, S. Kim, Y.J. Kim, et al., Application of ultra High performance concrete to cable stayed Bridges, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 413–422 63.
88. V. Perry, Ductal1 - A Revolutionary New Material for New Solutions Retrieved from, Association of Professional Engineers and Geoscientists of the Province of Manitoba (APEGM), 2006. http://www.apegm.mb.ca/pdnet/papers/ductal.pdf.
89. E. Denarie, D. Jacomo, N. Fady, D. Corvez, Rejuvenation of Maritime signalisation structures with UHPFRC, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (2013) 157–166.
90. S. Aubry, P. Bompas, B. Vaudeville, D. Corvez, T. Lagrange, P. Mazzacane, A. Brizou, A UHPFRC cladding challenge: the fondation Louis vuitton pour La creation 'Iceberg', Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (2013) 37–48.
91. P. Mazzacane, R. Ricciotti, F. Teply, E. Tollini, D. Corvez, MUCEM: the builder's perspective, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (2013) 3–16.
92. G. Delplace, Z. Hajar, A. Simon, S. Chanut, L. Weizmann, Precast thin UHPFRC curvedshells in a waste Water treatment plant, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 49–58.
93. A. Muttoni, U. Brauen, J.L. Jaquier, D. Moullet, A New roof for the olympic Museum in Lausanne, Switzerland, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 69–76.
94. P. Menetrey, UHPFRC cladding for the Qatar national Museum, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 351–360.
95. R. Fabbri, D. Corvez, Rationalisaztion of complex UHPFRC façade shapes, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber- Reinforced Concrete (2013) 27–36.
96. Z. Hajar, M. Novarin, C. Servant, G. Genereux, D. Przybyla, D. Bitar, Innovative solution for strengthening orthotropic decks using UHPFRC: the illzach Bridge, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 117–126.

97. L. Moreillon, P. Menetrey, Rehabilitation and strengthening of existing RC structures with UHPFRC: various applications, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 127–136.
98. SAMARIS Management Group, Full Scale Application of UHPFRC for the Rehabilitation of Bridges–From the Lab to the Field Document number: SAM_GE_DE22v03_01, (2005) .
99. T. Ono, Application of UHSFRC for Irrigation Chanel Repair Works. Designing and Building With UHPFRC—State of the Art and Development, ISTE Ltd., London, 2011, pp. 541–552.
100. L. Guingot, D. Dekhil, P. Souolier, Strengthening of hydraulic structures with UHPC, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (2013) 137–146.
101. C. Gu, S. Zhao, W. Sun, Q. Wang, Production of precast UHPFRC pavement cover plates in High-speed railway construction, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 463–470.
102. C.P. Gu, G. Ye, W. Sun, Ultra High performance concrete – properties, application and perspectives, Sci. China Technol. Sci. 58 (2015) 587–599.
103. D. Corvez, B. Masson, UHPFRC solutions for the retrofit of nuclear reactor containment walls, Proceedings of International Symposium on Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 147–156.
104. F.X. Jammes, X. Cespedes, J. Resplendino, Design of offshore wind turbines with UHPC, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 443–452.
105. S. Sritharan, G.M. Schmitz, Design of tall wind turbine towers utilizing UHPC, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 433–442.
106. W. Sobek, M. Plank, B. Frettlöhr, J. Röhm, D. Corvez, Conceptual design of an UHPFRC Tower structure in segmental construction for offshore wind turbines, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (2013) 423–432.
107. H.W. Ma, R. Meng, Optimization design of prestressed concrete wind-turbine Tower, Sci. China Technol. Sci. 57 (2014) 414–422.
108. Yazıcı, Halit & Yalçınkaya, Çağlar. (2011). Yeni Nesil Yüksek Performanslı Beton: Reaktif Pudra Betonu. Turkish Chamber of Civil Engineers, Bulletin of Izmir Branch. 156. 26-29.
109. https://iston.istanbul/urun/rpc-rogar-kapagi-675
110. T. Stengel, P. Schießl, Sustainable concrete with uhpc—from life cycle inventory data collection to environmental impact assessment, Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete (2008) 461–468.
111. P. Racky, Cost effectiveness and sustainability of UHPC, Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete (2004) 797–805.

www.thbb.org

www.thbbakademi.org