



## Feasibility of use of glass powder and/or ground granulated blast furnace slag in place of cement in ultra high performance concrete

Umut Hasgül\*<sup>1</sup>, Niyazi Bıçakçioğlu<sup>2</sup>

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Balıkesir University, 10145, Balıkesir, Turkey

### Highlights:

- Reducing the amount of cement in UHPC mixture is feasible with the partial uses of GP and/or GGBFS.
- The compressive strengths of 28 and 56 day of UHPC increased with 12.5% GGBFS use.
- The impacts of GP and GGBFS on compressive strength are more apparent with the steel fiber and steam curing

### Keywords:

- Compressive strength
- Glass powder
- Ground granulated blast furnace
- Steel fiber
- Steam curing

### Article Info:

Research Article  
Received: 26.01.2021  
Accepted: 23.12.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.868527

### Correspondence:

Author: Umut Hasgül  
e-mail:  
hasgul@balikesir.edu.tr  
phone: +90 266 612 1194 /  
(ext. 123202)

### Graphical/Tabular Abstract

Ultra High Performance Concrete (UHPC) is a new generation concrete type having very high concrete compressive strength, post-cracking tensile behavior, durability and mechanical properties. The amount of cement used in the UHPC is higher than conventional normal strength concrete. In recent years, some additive materials such as, glass powder (GP), ground granulated blast furnace slag (GGBFS) or fly ash can be used to reduce the negative effects of cement due to high cost, environmental effects and shrinkage. These materials fill voids between the cement particles, resulting a less permeable concrete. These materials react chemically with steam or pressure curing due to their pozzolanic properties. Thus, they exhibit binding agent and hence, have significant potential to improve the mechanical properties of concrete.

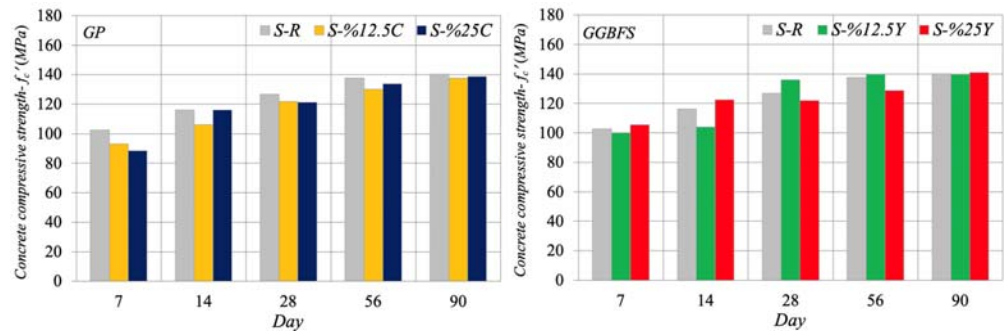


Figure A. The impacts of GP and GGBFS uses on concrete compressive strength

**Purpose:** In the study, the feasibility of GP and / or GGBFS uses in place of the cement in the UHPC content has been investigated in terms of concrete compressive strength. However, the effects of these additives on the compressive strength were investigated for the cases of steel fiber inclusion and / or steam curing application.

### Theory and Methods:

The total of 16 UHPC mixtures with single, double and triple binder systems were produced by the independence and dual-uses of GP and GGBFS of 12.5% and 25% by volume as well as additive-free control mixture. The compressive strengths of cube specimens for each mixture were determined for 7, 14, 28, 56 and 90 days by considering with and without steel fiber and steam curing.

### Results:

The test results showed that while the compressive strengths were decreasing trend at all concrete ages as the GP amount increases, relative differences were very small at 28 day and beyond. While the compressive strength of UHPC mixture containing the GGBFS of 12.5% increased at the concrete ages of 28 and 56 day, the strength decreased for the ratio of 25%. However, the compressive strengths showed a slightly decreasing trend for the dual-uses of GP and GGBFS in the mixture.

### Conclusion:

It can be deduced that the target compressive strengths of UHPC can be obtained with the partial uses of GP and/or GGBFS by reducing the amount of cement in the mixture in order to obtain eco-friendlier and more economical concrete. Noted that the effects of these additive materials on the compressive strength become more apparent with the inclusion of steel fiber to the UHPC mixture and steam curing application.



## Ultra yüksek performanslı betonda çimento yerine cam tozu ve/veya yüksek fırın cürufunun kullanılabilirliği

Umut Hasgül\*<sup>ID</sup>, Niyazi Bıçakcıoğlu<sup>ID</sup>

Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 10145, Balıkesir, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- UYPB karışımında CT ve/veya YFC kullanılarak çimento miktarı azaltılabilir
- UYPB'un 28 ve 56 günlük basınç dayanımları %12,5 oranında YFC kullanımı ile artmaktadır
- CT ve YFC'nun basınç dayanımı üzerindeki etkileri çelik lif eklenmesi ve buhar kürlenmesi ile daha belirgindir

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 26.01.2021

Kabul: 23.12.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.868527

### Anahtar Kelimeler:

Beton basınç dayanımı,  
cam tozu,  
yüksek fırın cürufu,  
çelik lif,  
buhar küri

### ÖZ

Bu çalışmada, Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) karışımında çimento yerine farklı oranlarda Cam Tozu (CT) ve Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) kullanılabilirliği beton basınç dayanımı bakımından incelenmiştir. Bu çerçevede, CT ve YFC'nun kullanılmadığı kontrol karışımı ile, %12,5 ve %25 oranlarında CT ve YFC'nun ayrı ayrı ve beraber kullanıldığı toplam 16 adet UYPB karışımı üretilmiştir. 7, 14, 28, 56 ve 90 günlük beton yaşları için üretilen UYPB'da çimento yerine katkı malzemelerinin eklenmesi ile çelik lif ve/veya buhar küri uygulamasına ilişkin ortalama basınç dayanımları kontrol numuneleri referans alınarak değerlendirilmiştir. Çalışmada ayrıca, basınç dayanımı bakımından en iyi performans gösteren CT ve YFC karışımlarının işlenebilirlik, kılcılık, elastisite modülü ve ultrasonik ses dalgası hızları ile yarmada-çekme dayanımları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, UYPB karışımında CT miktarı arttıkça tüm beton yaşları için basınç dayanımları azalmaya eğiliminde olmasına karşın, 28 gün ve sonrasında bu değişimlerin oldukça küçük olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, karışımdaki YFC miktarından bağımsız olarak, 90 günlük dayanımların kontrol numunesine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Daha çevre dostu ve ekonomik UYPB elde etmek amacıyla karışımdaki çimento miktarı azaltılarak yerine CT veya YFC'nun kullanılması ile hedef dayanımların elde edilebileceği görülmüştür. Çelik lif eklenmesi ve buhar küri uygulamasıyla bu katkı malzemelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkileri daha belirgin hale gelmiştir.

## Feasibility of use of glass powder and/or ground granulated blast furnace slag in place of cement in ultra high performance concrete

### H I G H L I G H T S

- Reducing the amount of cement in UHPC mixture is feasible with the partial uses of GP and/or GGBFS
- The compressive strengths of 28 and 56 day of UHPC increased with the 12.5% GGBFS use
- The impacts of GP and GGBFS on the compressive strength are more apparent with the steel fiber and steam curing

### Article Info

Research Article

Received: 26.01.2021

Accepted: 23.12.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.868527

### Keywords:

Concrete compressive  
strength,  
glass powder,  
ground granulated blast  
furnace slag,  
steel fiber,  
steam curing

### ABSTRACT

In the presented study, the partial use of Glass Powder (GP) and Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) in place of cement on Ultra High Performance Concrete (UHPC) was investigated in terms of concrete compressive strength. In this context, the total of 16 UHPC mixtures were produced by independence and dual-uses of GP and GGBFS of 12.5% and 25% by weight as well as additive-free control mixture. For the concrete ages of 7, 14, 28, 56 and 90 days, the use of additive materials as well as contributions of steel fiber and steam curing were discussed by the average compressive strengths. In addition, the parameters of workability, capillarity, elastic modulus, ultrasonic pulse velocity and tensile splitting strength were discussed for the mixtures showing best performance in terms of the compressive strength. The test results showed that while the strengths were decreasing trend as the GP amount increases at all concrete ages, relative differences were very small at 28 day and beyond. However, regardless of the GGBFS amount, the strengths of 90 day were very close the control specimen. It can be deduced that the target compressive strengths of UHPC can be obtained with the partial uses of GP and GGBFS by reducing the cement amount to obtain eco-friendlier and more economical concrete. The effects of additive materials become more apparent with the inclusion of steel fiber and the application of steam curing.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*hasgul@balikesir.edu.tr, niyazi\_bicakcioglu@hotmail.com /

Tel: +90 266 612 1194 / 124202

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde yüksek binalara, büyük açıklıklı ve özel yapı türlerine olan gereksinimlerin artması, beraberinde çok daha yüksek dayanımlı betonlara olan talebi de artırmaktadır. Bu bağlamda, beton teknolojisinin son yıllarda ortaya koyduğu önemli ürünlerden birisi de Ultra Yüksek Performanslı Betondur (UYPB). UYPB, başta çok yüksek basınç dayanımı olmak üzere çatlama sonrası sünek çekme davranışı, çok sıkı mikro iç-yapı ve üstün mekanik özelliklere sahip yeni nesil bir beton türüdür. Hızla gelişen beton teknolojisi ile birlikte bu beton sadece yüksek basınç dayanımına sahip olmasının yanı sıra, süneklik, durabilite, işlenebilirlik gibi parametreler açısından geleneksel normal dayanımlı betonun birçok dezavantajını gidermede önemli bir potansiyele sahiptir [1-4]. UYPB karışımı genel olarak ince agrega, çimento, su, akışkanlaştırıcı katkı ve silis dumanından oluşmaktadır. Çok yüksek mekanik özellikler elde etmek amacıyla bu tür betonlarda su / çimento oranı düşük olması gerektiğinden, çimento miktarı geleneksel betonlara göre oldukça yüksektir. Bu durum, betonun işlenebilirliğini azaltan önemli bir faktördür. Bu sebeple, betonun daha akışkan olmasını sağlamak amacıyla karışımında süper akışkanlaştırıcı, hava sürükleyici vb. katkıları kullanılmaktadır [5-7]. UYPB karışımında belirli miktarda çimento ve / veya silis dumanı yerine cam tozu, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve zeolit gibi katkı maddeleri de kullanılabilmektedir. Burada, çok ince malzemeler olan silis dumanı, cam tozu, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi katkı maddeleri betonun iç-yapısındaki çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurmaktadır. Bununla birlikte, bu katkıları puzolanik özellikleri nedeniyle buhar veya basınç kürlenmesi sonucunda kimyasal reaksiyona girerek çimento gibi bağlayıcı özellik kazanmakta ve betonun mekanik özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip olmaktadır [8].

UYPB karışımında uygun oranda bağlayıcı malzemeler kullanıldığında, standart kür koşulları altında 120 MPa ve üzerinde beton basınç dayanımlarına ulaşılabilmektedir. Bununla birlikte, uygun lif içeriği, düşük su / bağlayıcı oranı ve karışımındaki bağlayıcı malzemelerin optimum oranı sonrasında, standart kür koşulları veya özel kür koşulları (buhar kürü, basınç kürü, kaynar su kürü vb.) altında genel olarak 150 MPa'lık bir basınç dayanımı hedeflenmektedir [9-12]. Özellikle çelik lif içeren UYPB'un yüksek basınç dayanımı ve şekildeğiştirme kapasitesi sayesinde geleneksel betonarme elemanlarda daha estetik ve daha narin enkesitli elemanlar üretilebilmektedir. Bunun sonucu olarak, farklı yapısal uygulamalarda (endüstriyel yapılar, büyük açıklıklı köprü kirişleri, viyadükler, köprü ayakları, plaklar, zemin döşemeleri, prefabrik elemanların ıslak birleşimleri vb.) ve ayrıca, yapıların onarım ve güçlendirilmesinde UYPB kullanımı yaygınlaşmaktadır [4, 9, 13]. UYPB'un özel kür koşulları ve malzeme gereksinimi, hızlı dayanım kazanma özelliği gibi özellikleri nedeniyle ön üretimli betonarme elemanların üretiminde de yer almaya başlamıştır [14-17]. UYPB'da kullanılan çimento miktarı geleneksel normal dayanımlı betonlara göre daha yüksektir. Son dönemlerde

yapılan çalışmalarda, karışımında kullanılan çimentonun yüksek maliyeti, çevresel etkileri ve büzülme gibi olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla alternatif katkı maddeleri (cam tozu, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, zeolit gibi) kullanılarak beton davranışı farklı parametreler (basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, sünme, iç-yapı, işlenebilirlik) açısından incelenmiştir [3, 18-20]. Cam'ın mikro boyutta öğütülmesi sonucu üretilen cam tozu, düşük miktarda puzolanik reaksiyona girerek UYPB karışımında çimento ve diğer bağlayıcılar yerine kısmi olarak kullanılabilmektedir [21]. Beton karışımında çimentonun azaltılarak yerine cam tozu kullanılması, çimento üretimi sırasındaki enerji tüketimini ve karbon salınımını azaltarak çevre kirliliğine karşı olumlu bir etki oluşturmaktadır [22, 23]. Bu şekilde, UYPB'a ait kriterlerin sağlandığı betonun üretilebileceği görülmüştür [21]. Benzer şekilde, yüksek fırın cürufu yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesi olmakla birlikte, pik demir imalatından üretilen bir yan üründür. Bu katkı, betonun geçirimsizliğini azaltarak daha sıkı bir iç-yapı oluşumuna olanak sağlaması ile betonun mekanik özelliklerini artırmak için kullanılan alternatif bir malzemedir. UYPB karışımında kullanılan yüksek fırın cürufu, beton üretimine bağlı karbon salınımını azalttığından çevre kirliliği açısından olumlu bir etki de yaratmaktadır [24]. Ayrıca, çimento yerine kısmi olarak yüksek fırın cürufunun kullanılması çimento üretiminde gerekli olan enerjiden tasarruf sağlanmakla birlikte, ekonomik ve çevresel etkileri azaltan pozitif yönde bir katkı sunmaktadır. Çevre dostu bu tür betonlar yeşil beton (green concrete) olarak da isimlendirilmektedir [25].

Vaitkevičius vd. [21], UYPB karışımında kuvars unu ve silis dumanının tamamı yerine cam tozu kullanılarak hedef basınç dayanımına ulaşılabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmada, karışımada silis dumanının tamamı yerine cam tozu kullanılması halinde basınç dayanımının azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi olarak, cam tozunun betonun iç-yapısını ve mekanik özelliklerini iyileştirmesine karşın, silis dumanı kadar iyi bir puzolanik bağlayıcı olmaması olarak belirtilmiştir. Soliman ve Tagnit-Hamou [26], UYPB karışımında silis dumanı yerine cam tozunun kullanılabilirliğini farklı oranlar için araştırmıştır. Standart kür ve buhar kürü uygulanmış numuneler için %70SD+%30CT ve %50SD+%50CT içeren karışımlara ait basınç dayanımlarının daha yüksek olduğu ve karışımındaki cam tozu oranı arttıkça dayanımların azalan eğilimde olduğu belirlenmiştir. Aynı yazarların diğer çalışmasında [22], UYPB karışımında çimento yerine %20'ye kadar cam tozu kullanımının basınç dayanımını çok az oranda artırdığı belirlenmiştir. Karışımındaki cam tozunun daha yüksek oranları için dayanımlar erken beton yaşlarında azalmasına karşın, 56 ve 90 günlük dayanımların kontrol karışımına oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Yazıcı [27], UYPB karışımında çimento yerine farklı oranlarda yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkilerini farklı kür koşulları altında incelemiştir. Karışımında, silis dumanı sabit tutularak çimento yerine %20-%80 arasında değişen oranlarda yüksek fırın cürufu ve uçucu

kül eklenmesi sonucunda, kür yönteminden bağımsız olarak %40'a kadar yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanımlarının basınç dayanımını artırdığı, daha yüksek oranlarda ise dayanımları hızla azaltmıştır. Yalçınkaya ve Yazıcı [28], katkısız UYPB karışımı ile çimento yerine %50 oranında yüksek fırın cürufu ve %30 oranında uçucu külün eklendiği üç karışım için standart kür koşullarında basınç dayanımlarında belirgin bir değişim olmamasına karşın, otoklav kürü sonucunda dayanımların azalım eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir. Yazıcı vd. [19]'da, Reaktif Pudra Beton (RPB) karışımında çimento yerine yüksek fırın cürufu ve uçucu külün kullanılabilirliği araştırılmıştır. Karışıma %40'a kadar eklenen katkı malzemeleri kontrol karışımına göre basınç dayanımlarını çok az oranda azalttığı, daha yüksek oranlarda ise dayanımlarda ani kayıpların oluştuğu belirlenmiştir. Buna karşın, RPB için 200MPa'lık hedef dayanıma ulaşılmıştır.

UYPB, tek başına kullanıldığında gevrek bir davranışa sahip olduğundan karışıma uygun oranda çelik veya sentetik lif eklendiğinde, şekildeğiştirme ve buna bağlı olarak tokluk kapasitesi artmaktadır. Bu nedenle, betonun basınçta ve çekmedeki mekanik özellikleri ile enerji yutma kapasitesini iyileştirmek için farklı geometrilere (düz, tek veya çift kancalı, dalgalı, kıvrımlı, vb.) lifler eklenmektedir. Betonun basınç kapasitesinin yanısıra, eksenel çekme altındaki pekleşme davranışı ve liflerin çatlakları sınırlama özelliği sayesinde optimum oranda çelik lif içeren bu tür özel betonlar için *Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB)* veya *Yüksek Performanslı Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozit* gibi tanımlar kullanılmaktadır [4, 10, 29, 30]. UYPLB karışımında kullanılan çelik liflerin hacimsel oranı, geometrisi, narinliği (boy/çap) ve çekme dayanımı betonun mekanik özelliklerini etkilemekle birlikte, işlenebilirliği azaltmaktadır. Burada, kısa lif kullanımı mikro boyuttaki kılcal çatlakların oluşumunu ve yayılımını geciktirmesi sayesinde rijitlikte ve dayanımda önemli artışlar sağlamaktadır. Liflerin narinlik ve hacimsel oranlarındaki artışlar, karışımdaki boşlukları azaltması, aderans mukavemetini ve lif-beton arayüzünü geliştirmesi gibi nedenlerle mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Diğer taraftan makro boyuttaki kancalı liflerin kullanımı, dayanımdan ziyade betonun şekildeğiştirme ve buna bağlı tokluk kapasitesi üzerinde etkin olmakla birlikte, lif miktarı arttıkça karışımdaki liflerin üniform dağılımı ve yeterli yönelimi sağlanamamaktadır. Kancalı liflere göre düz lifler ile daha homojen ve işlenebilir bir karışım üretilebilmesine karşın, liflerin hacimsel oranı arttıkça betonun işlenebilirlik ve akıcılık parametreleri olumsuz etkilenmektedir [6, 31-33]. Ayrıca, UYPLB karışımında tek tip lif kullanımı yerine farklı tiplerde ve oranlarda lifler karma (hybrid) olarak da kullanılabilir [4, 33-35]. Diğer taraftan, bu tür özel betonlarda kür uygulaması, çimento ve puzolanik bağlayıcıların hidrasyon tepkimelerini hızlandırmak ve buna bağlı olarak betonun erken nihai dayanımını kazanmasını sağlamak amacıyla kullanılan yaygın bir tekniktir. Kür sıcaklığının artmasıyla birlikte çimentonun hidrasyon hızı artmakta ve bunun sonucunda basınç

dayanımlarında belirgin bir kazanç sağlanmaktadır. Buna karşın, hidrasyon hızının yüksek olması matrisin homojenliğini negatif yönde etkilediğinden, daha yavaş hidrasyon yapan karışımlarda daha yüksek dayanımlar elde edilmektedir. Standart su kürü ile 28 günde kazanılan basınç dayanımları, buhar ve basınç kürü ile çok daha kısa sürelerde elde edilebilmektedir [27, 36-38]. Bununla birlikte, kür uygulamasının sünme ve büzülme gibi olumsuz durumları önlemede önemli katkı sağladığı bilinmektedir.

Wu vd. [39], 3, 7, 28 ve 90 günlük UYPB numunelerin basınç dayanımları esas alınarak, karışımdaki çelik lif miktarı ve beton yaşı arttıkça basınç dayanımlarının artış eğiliminde olduğunu belirtmektedir. Bununla birlikte, düz liflere kıyasla kancalı ve kıvrımlı lif kullanımlarının basınç dayanımını %60'a ulaşan oranlarında arttırabildiği görülmüştür. Birol vd. [40], UYPB karışımında farklı oranlarda silis dumana ve yüksek fırın cürufu kullanımlarının taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Toplam 24 adet hazırlanan lifsiz UYPB karışımı içinde basınç dayanımı bakımından en iyi performans gösteren karışım seçilerek, farklı çelik lif içeriklerinin basınç ve eğilme dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Üç farklı tip çelik lif içeren karışımların 28 günlük sonuçları ışığında, hacimsel olarak %1,0 ve %1,5 oranlarında lif kullanımının beton basınç dayanımını artırdığı belirtilmiştir. Arel [41], çelik lif kullanımının UYPB'un basınç dayanımına etkisini üç farklı kür koşulu (standart kür, buhar kürü ve sıcak su kürü) için araştırmıştır. Hazırlanan küp numunelere ait 7, 28, 56 ve 90 günlük sonuçlar, karışımdaki çelik lif uzunluğunun artması ile basınç dayanımlarının arttığını göstermiştir. Ayrıca, kür yönteminden bağımsız olarak 56 ve 90 günlük dayanımların birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Smarzewski [42], sentetik ve çelik lif içeren UYPB'un mekanik özelliklerinde kür süresinin etkisini araştırmıştır. Çekimada, küp numunelerin 28, 56 ve 730 günlük basınç dayanımları belirlenmiş ve karışıma minimum %1,0 oranında sentetik veya çelik lif eklenmesinin iki yıllık kür süresi sonrasındaki basınç dayanımlarını önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, UYPB'da çelik lif kullanımı sentetik liflere göre daha iyi performans göstermiştir.

Askar vd. [43], çelik lif içeren UYPLB'un mekanik özelliklerine farklı kür koşullarının etkisini araştırmıştır. Hazırlanan test numunelerine, standart su kürü, sprey ile su püskürtme, kaynar suda bekletme, kalıptan alındıktan 1 ve 2 gün sonra buhar kürü yöntemleri uygulanmış ve 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Buhar kürü ve kaynar su kürü yöntemlerinin betonun mekanik özelliklerini orantılı olarak arttırdığı ve 28 günlük en yüksek dayanımlara bu yöntemler ile ulaşıldığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, Shen vd. [44], hacimsel olarak %2,0 düz çelik lif içeren prizma numuneler üzerinde yaptıkları testler sonucunda, buhar kürü ve otoklav kürünün standart su kürüne göre basınç dayanımlarını belirgin bir şekilde arttırdığı belirlenmiştir. Park vd. [36], farklı kür koşullarının çelik lifsiz UYPB'un erken basınç dayanımına etkilerini araştırmışlardır. Bunun için, kür sıcaklığı ve süresi, küreleme

öncesi bekletme zamanı ve ortam nemi değiştirilerek hazırlanan test numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Çalışmada, kür sıcaklığı ve süresiyle erken basınç dayanımlarının orantılı olarak arttığı belirlenmiştir. 2 gün boyunca 60°C'lik kür uygulanan bazı numunelerde 7 günlük dayanımların 28 günlük hedef dayanıma oldukça yaklaştığı görülmüştür. Hiremath ve Yaragal [37], RPB numunelerine 2 günlük sıcak hava kürü uygulaması ile 28 günlük basınç dayanımının yaklaşık %82'sinin elde edilebileceğini göstermişlerdir.

Bu çalışmada, UYPB içeriğinde çimento yerine farklı oranlarda cam tozu ve/veya yüksek fırın cürufunun kullanılabilirliği beton basınç dayanımı açısından araştırılmıştır. Bununla birlikte, UYPB karışımlarına çelik lif eklenmesi ve/veya buhar kürü uygulanması durumlarında, katkı maddelerinin basınç dayanımlarına olan etkileri de araştırılmıştır. Bu kapsamda, katkısız kontrol karışımı ile çimento yerine ağırlıkça %12,5 ve %25 oranlarında cam tozu ve yüksek fırın cürufunun bağımsız ve beraber kullanımı ile tekli, ikili ve üçlü bağlayıcı sistemine sahip toplamda 16 adet UYPB karışımı üretilmiştir. Her beton karışımı için çelik lifli / lifsiz ve buhar kürlü / kürsüz durumlar için üçer adet hazırlanan küp numunelerin 7, 14, 28, 56 ve 90 günlük ekstenel basınç testleri yapılarak ortalama dayanımlar elde edilmiştir. Çalışmada, gözönüne alınan beton yaşları için ilgili katkı malzemeleri ile çelik lif ve/veya buhar kürü uygulamasına ait sonuçlar kontrol numuneleri referans alınarak değerlendirilmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Deneysel çalışma kapsamında ilk olarak, UYPB içeriğinde *Cam Tozu (CT)* ve *Yüksek Fırın Cürufunun (YFC)* farklı oranlarda bağımsız ve birlikte kullanılması durumlarını içeren çelik lifsiz ve lifli toplam 16 beton karışımı hazırlanmıştır. Bunun yanı sıra, katkılı ve katkısız hazırlanan beton karışımlarına çelik lif eklenmesi ve/veya 60°C 'de 24 saatlik buhar kürü uygulanması durumları için üçer adet hazırlanan küp numunelerin 7, 14, 28, 56 ve 90 günlük beton basınç dayanımları belirlenmiştir.

### 2.1. Malzeme Özellikleri (Materials Properties)

Çalışmada, çelik lif içermeyen katkılı ve katkısız UYPB karışımlar için 28 günlük basınç dayanımının en az 120 MPa olması hedeflenmiştir. UYPB'daki çimento miktarı azaltılarak bunun yerine CT ve/veya YFC'nun ayrı ayrı ve beraber kullanımı ile tekli, ikili ve üçlü bağlayıcı sistemine sahip karışımlar hazırlanmıştır [45]. Betonlu oluşturan ana ve

katkı malzemelerin kimyasal özellikleri Tablo 1 ve Şekil 1'de verilmiştir. Katkısız karışımlarda bağlayıcı bileşen olarak CEM-I 42.5 R sınıfı Portland çimentosu (Ç) ve silis dumanı (SD) kullanılmıştır. Bağlayıcı malzemelerin özgül yüzey alanları (SSA) Tablo 1'de verilmiştir. Agregası (A) olarak, tane çapı 0 – 0,8 mm ve özgül ağırlığı 2,68 olan yüksek dayanımlı kuvars kullanılmıştır. UYPB karışımının işlenebilir olması amacıyla polikarboksilat eter esaslı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı kullanılmıştır. Çelik lif içeren UYPB karışımlarında, mekanik özellikler ve işlenebilirlik bakımından iyi performansı elde edilebilmek için hacimsel olarak %1,0 oranında kısa-düz çelik lifler kullanılmıştır. Beton karışımlarında kullanılan süper akışkanlaştırıcı ve çelik liflerin özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur.

**Tablo 1.** UYPB karışımındaki bağlayıcı bileşenlerin özellikleri (Properties of binder materials in UHPC mixture)

		Ç	SD	CT	YFC
$\gamma$	(kg/m <sup>3</sup> )	3250	2200	2500	2900
SSA	(m <sup>2</sup> /kg)	372	20000	250	410
SiO <sub>2</sub>	(%)	19,80	90-93	70,22	41,49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	5,47	0,4-0,9	1,64	16,34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	3,46	1,0-2,0	0,52	0,61
CaO	(%)	64,44	0,2-0,7	11,13	29,26
MgO	(%)	1,30	0,9-1,3	2,49	7,68
SO <sub>3</sub>	(%)	2,67	---	---	1,90
Na <sub>2</sub> O	(%)	0,40	0,2-0,6	13,20	0,80
K <sub>2</sub> O	(%)	0,67	1,0-1,3	---	1,10
Cl	(%)	0,01	---	---	0,01
C <sub>3</sub> S	(%)	58,47	---	---	---
C <sub>2</sub> S	(%)	12,83	---	---	---
C <sub>3</sub> A	(%)	8,64	---	---	---
C <sub>4</sub> AF	(%)	10,53	---	---	---

### 2.2. UYPB Karışımlarının Hazırlanması (Preparation of UHPC Mixtures)

Çalışma kapsamında, farklı oranlarda CT ve/veya YFC kullanılmalarının basınç dayanımına etkisi, toplam bağlayıcı miktarı 1200 kg/m<sup>3</sup> ve su / bağlayıcı oranı 0,18 olan beton karışımı için araştırılmıştır. Hazırlanan UYPB karışımı için 1m<sup>3</sup>'e karşılık gelen ağırlıklar ile su / çimento oranları Tablo 3'de sunulmuştur [45]. Tablo 3'de, CT ve YFC'nun kullanılmadığı kontrol karışımları S-R olarak kodlanmıştır. Karışımın çimento yerine sadece CT eklenmesi hali için %12,5 ve %25 oranları, sırasıyla, S-%12,5C ve S-%25C olarak gösterilmiştir. Benzer şekilde, %12,5 ve %25 oranlarında YFC kullanılmaları için S-%12,5Y ve S-%25Y isimlendirmesi yapılmıştır. Bununla birlikte, eşit ve farklı oranlarda katkı içeren %12,5CT + %25YFC; %25CT +

**Tablo 2.** Süper akışkanlaştırıcı ve çelik liflerin özellikleri (Properties of superplasticizer and steel fibers)

Süper akışkanlaştırıcı		Çelik lifler	
Malzemenin yapısı	Polikarboksilat eter	Çap	(mm) 0,16
Yoğunluk (20°C'de)	1,069 – 1,109 kg/lt	Uzunluk	(mm) 13
pH değeri	≈ 5-7	Narinlik	(uzunluk/çap) 81
Alkali içeriği (%)	≤3,00	Yoğunluk	(gr/cm <sup>3</sup> ) 7,80
Klor iyon içeriği (%)	≤0,10	Çekme dayanımı	(MPa) 2500



Şekil 1. UYPB'ü oluşturan bileşenler (Material components of UHPC)

Tablo 3. 1m<sup>3</sup> UYPB karışımı için bileşenlerin ağırlıkları ile işlenebilirlik ve akıcılık değerleri (Component weights for the UHPC mixture of 1m<sup>3</sup>, workability and flowability values)

Karışım	Ç (kg/m <sup>3</sup> )	SD (kg/m <sup>3</sup> )	CT (kg/m <sup>3</sup> )	YFC (kg/m <sup>3</sup> )	Su (kg/m <sup>3</sup> )	SA (kg/m <sup>3</sup> )	A (kg/m <sup>3</sup> )	ÇL (kg/m <sup>3</sup> )	Su/Ç	SF (mm)	t-500 (sn)
S-R	960	240	---	---	216	30	935	---	0,23	890	2,4
S-%12,5C	840	240	120	---	216	30	905	---	0,26	900	2,2
S-%25C	720	240	240	---	216	30	875	---	0,30	910	2,1
S-%12,5Y	840	240	---	120	216	30	925	---	0,26	895	2,3
S-%25Y	720	240	---	240	216	30	910	---	0,30	890	2,2
S-%12,5C+%12,5Y	720	240	120	120	216	30	895	---	0,30	905	2,3
S-%25C+%12,5Y	600	240	240	120	216	30	865	---	0,36	920	2,2
S-%25C+%25Y	480	240	240	240	216	30	855	---	0,45	925	2,0
S-R+ÇL	960	240	---	---	216	30	905	78	0,23	650	3,1
S-%12,5C+ÇL	840	240	120	---	216	30	875	78	0,26	690	3,1
S-%25C+ÇL	720	240	240	---	216	30	850	78	0,30	725	2,9
S-%12,5Y+ÇL	840	240	---	120	216	30	895	78	0,26	760	2,6
S-%25Y+ÇL	720	240	---	240	216	30	885	78	0,30	740	2,7
S-%12,5C+%12,5Y+ÇL	720	240	120	120	216	30	870	78	0,30	770	2,8
S-%25C+%12,5Y+ÇL	600	240	240	120	216	30	835	78	0,36	800	2,6
S-%25C+%25Y+ÇL	480	240	240	240	216	30	825	78	0,45	810	2,6

Tüm karışımlar için, toplam bağlayıcı miktarı = 1200 kg/m<sup>3</sup> ; su / bağlayıcı = 0,18

%12,5YFC; %25CT + %25YFC beton karışımları için, sırasıyla, S-%12,5C+%12,5Y; S-%25C+%12,5Y ve S-%25C+%25Y kodlaması yapılmıştır. Çelik lif içeren karışımların kodlarına ÇL kısaltması eklenirken, buhar kürü uygulanan karışımlara K kısaltması eklenmiştir (Tablo 3).

Tablo 3'de verilen oranlar esas alınarak, UYPB'ü oluşturan bileşenler tartıldıktan sonra 56 dm<sup>3</sup> kapasiteli standart bir pan-mikser'de kuru olarak 3 dakika karıştırılmıştır (Şekil 2a-Şekil 2b). Daha sonra, kuru karışıma gerekli suyun tamamı ve süper akışkanlaştırıcının yarısı ilave edilerek 5 dakika daha karıştırılmıştır (Şekil 2c). Plastik kıvamdaki karışıma kalan akışkanlaştırıcı eklendikten sonra, homojen bir karışım elde edilinceye kadar 60 devir/dk'lık sabit hızda karıştırma işlemine devam edilmiştir (Şekil 2d). Çelik lif içeren karışımlarda ise, karışım plastik kıvama geldikten sonra topraklanma olmaması için lifler serpilme şeklinde ilave edilmiş ve karışım homojen oluncaya kadar karıştırılmıştır. Hazırlanan lifsiz ve lifli karışımlar 100x100x100 mm boyutlarındaki plastik küp kalıplara vibrasyon uygulanmadan yerleştirilmiştir (Şekil 2e-Şekil 2f). Farklı oranlarda CT ve/veya YFC içeren çelik lifsiz / lifli tüm beton

karışımların işlenebilirlik ve akıcılık özelliklerini belirlemek amacıyla çökme-yayıma (slump flow - SF) testleri ile yayılma tablası üzerindeki 500 mm'lik yarıçap sınırına ulaşma süreleri (t-500) ölçülmüştür (Tablo 3). Döküm işlemi tamamlandıktan sonra, buharlaşma ile oluşacak su kayıplarını engellemek amacıyla küp numuneler ince bir plastik örtü ile korunmuştur. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numuneler, farklı test günlerine (7, 14, 28, 56 ve 90) kadar 20±2°C'lik laboratuvar koşulunda bekletilmiştir. Bununla birlikte, buhar kür uygulanan numuneler kalıptan alındıktan 24 saat sonra 60°C'lik buhar kürü kabinde 24 saat bekletilmiş ve daha sonra test günlerine kadar laboratuvar koşulunda bekletilmiştir (Şekil 3a). Uygulanan buhar kürüne ait sıcaklık-zaman protokolü Şekil 3b'de verilmiştir.

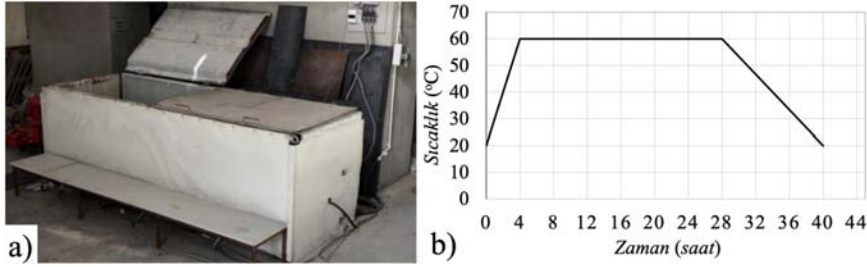
### 2.3. Test Düzenegi (Test Setup)

Çalışmada hazırlanan her beton karışımına ait 100x100x100 mm boyutlarındaki çelik lifli / lifsiz ve buhar kürü / kürsüz küp numunelerin aksel basınç testleri, 3000 kN kapasiteli ve yük kontrollü basınç presi yardımıyla yapılmıştır (Şekil 4a-Şekil 4c). 7, 14, 28, 56 ve 90 günlük beton yaşları için





**Şekil 2.** UYPB karışımının ve test numunelerinin hazırlanması, a) Pan-mikser, b) Kuru karışım c) Yarı-kuru karışım, d) Plastik karışım e) Döküm f) Küp numuneler  
(Preparation of UHPC mixture and test specimens, a) Pan-mixer, b) Dry mixture c) Semi-dry mixture, d) Plastic mixture e) Pouring f) Cube specimens)



**Şekil 3.** a) Buhar kürü kabini ve b) Sıcaklık – zaman değişimi (a) Steam cure cabinet and b) Temperature - time protocol)



**Şekil 4.** a) Basınç presini b) Test edilen küp numune c) Hazırlanan küp ve silindir numuneler d) Yarmada-çekme düzeneği e) Elastisite modülünün tayini f) Ultra ses ölçüm cihazı (a) Compressive testing machine b) Tested cube specimen c) Cube and cylinder specimens d) Splitting tensile setup e) Elastic modulus setup f) Ultrasonic pulse velocity test instrument)

üçer adet hazırlanan numunelerinin basınç dayanımlarına ait ortalama değerler esas alınmıştır. Küp numunelerinin basınç testine ait ayrıntılar BS EN 12390-3:2009 [46]'da bulunabilir. Bununla birlikte, 100x200 mm boyutlarında üçer adet hazırlanan silindir numunelerin yarmada-çekme çekme dayanımları ASTM C496/C496M-17 [47]'ye göre belirlenmiştir. Basınç presine yerleştirilen silindir numunelere üniform şerit yük uygulanarak, kuvvete dik doğrultuda çekme gerilmesi oluşturulmuştur (Şekil 4d). Her

bir numune grubuna ait çekme dayanımlarının belirlenmesinde ortalama değerler esas alınmıştır. Çalışmada ayrıca, farklı oranlarda katkı içeriğine sahip UYPB numunelerinin elastisite modülleri ASTM C469 / C469M-14 [48]'e göre belirlenmiştir. Bunun için, silindir numunelerdeki şekil değiştirmeler çelik çerçeveye mafsallı bağlı bir ekstensometre aracılığı ile belirlenmiştir (Şekil 4e). Test numunelerine ait basınç kapasitesinin %40'ına kadar üç kez yükleme yapılarak gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri ve

buna bağlı olarak, ortalama elastisite modülleri hesaplanmıştır. Bununla birlikte, UYPB numunelerinin bir yüzeyinden gönderilen ultrasonik ses dalgalarının diğer yüzeye geçiş hızı CNC Farnell cihazıyla ölçülmüştür (Şekil 4f).

### 3. TAZE VE SERTLEŞMİŞ BETON ÖZELLİKLERİ (PROPERTIES OF FRESH AND HARDENED CONCRETE)

#### 3.1. İşlenebilirlik ve Akıcılık Özellikleri (Properties of Workability and Flowability)

UYPB karışımlarında çimento yerine farklı oranlarda CT ve/veya YFC kullanılmalarının, işlenebilirlik ve akıcılık üzerindeki etkileri çökme-yayıma testi ile belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlara ait taze beton özellikleri incelendiğinde, lifsiz UYPB karışımlarında çimento yerine YFC kullanıldığında, katkı oranından bağımsız olarak, yayılma değerlerinin ve t-500 sürelerinin kontrol karışımıyla hemen hemen aynı olduğu belirlenmiştir (Tablo 3). Diğer taraftan, CT'nun tekli ve ikili kullanımları için CT miktarının artışı lifsiz betonun işlenebilirliğine pozitif yönde katkı sağlamıştır. Bunun sebebi, karışımdaki çimento tanecikleri yerine alan CT taneciklerinin daha düşük su emme özelliğine ve daha yumuşak yüzeylere sahip olmasıdır. Çelik lif içeren UYPB karışımlarında ise, katkısız kontrol karışımındaki yayılma değerleri yaklaşık %27 azalmakla birlikte, t-500 süreleri yakın oranda artmıştır (Tablo 3). Wu vd. [39]'da, hacimce %1 lif içeren karışım için bu azalım yaklaşık %15 olarak elde edilmiştir. sadece CT içeren karışımlara lif eklenmesi ile kontrol karışımındaki değişime çok yakın oranlar elde edilirken (S-%12,5C+ÇL için %24, S-%25C+ÇL için %20), YFC içeren tüm lifli karışımların daha akıcı olduğu söylenebilir. YFC içeriğinden bağımsız olarak, karışıma çelik lif eklenmesi ile işlenebilirlik %15 oranında azalmıştır (Tablo 3). Betonun işlenebilirliği ile ilgili bu sonuç, çimento yerine farklı oranlarda CT'nun kullanıldığı Soliman ve Tagnit-Hamau [22]'deki deneysel sonuçlarla oldukça uyumludur.

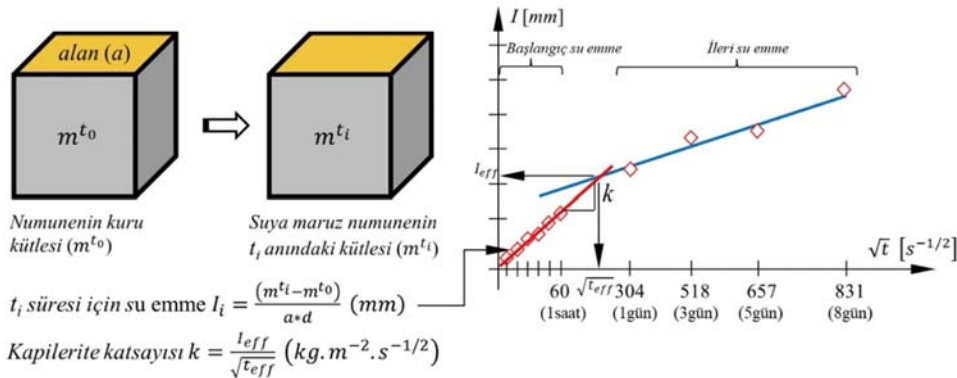
#### 3.2. Kılcallık Durumları (Capillarity Conditions)

Deneysel çalışmada, 28 günlük beton basınç dayanımı bakımından en iyi performans gösteren CT ve YFC karışımlarına ait çelik lifsiz / lifli ve buhar kürsüz / kürlü küp numunelerinin kılcallık özellikleri ASTM C1585-20 [49]'a

uygun olarak belirlenmiştir. Bunun için, katkısız referans numuneler ile çimento yerine %12,5 oranında CT ve/veya YFC'nun kullanıldığı (%12,5CT; %12,5YFC; %12,5CT+%12,5YFC) test numuneleri 70°C'lik etüvde 24 saat bekletildikten sonra 20±2°C'lik ortam sıcaklığında kenar yüzeyleri parafinle kaplanmıştır. İkişer adet hazırlanan beton numunelerinin kuru ağırlıkları tartıldıktan sonra, 2 mm'lik alt yüzeyleri suya maruz bırakılarak 5', 10', 15', 30', 45', 60', 1440' (1gün), 4320' (3gün), 7200' (5gün) ve 11520' (8gün)'deki doymuş ağırlıkları kaydedilmiştir. Daha sonra, numunelerin kütleindeki artışın zamanın kare alanıyla ilişkisine bağlı olarak su emme ( $I$ ) değerleri ile kapilerite katsayıları ( $k$ ) hesaplanmıştır (Şekil 5). Şekil 6a-Şekil 6b'deki sonuçlar incelendiğinde, %12,5 oranında CT ve/veya YFC içeren buhar kürsüz UYPB numunelerine ait su emme değerleri birbirine oldukça yakın olmasına karşın, karışıma çelik lif eklenmesi veya buhar kürü uygulamasının betonun kılcallık durumuna etkileri farklılık göstermektedir. %12,5CT içeren çelik lifli numunelerin su emmeleri kontrol numunesi ile hemen hemen aynıken, karışıma YFC eklenmesiyle (%12,5YFC, %12,5CT+%12,5YFC) su emme değerleri hızla artan bir eğilim göstermektedir. Geleneksel normal dayanımlı beton ve UYPB'ü kapsayan mevcut çalışmalarda [50-53] sonuçlarla uyumlu olarak, YFC'nun betondaki kapiler boşlukları azaltması nedeniyle YFC içeren UYPB'un su emme talebi kontrol karışımına göre bir miktar daha azdır. Normal dayanımlı betonlara kıyasla bu değişim çok daha sınırlı düzeydedir. Diğer taraftan, çelik lifli YFC numunelerinin su emme değerlerindeki artış, liflerin yüzeyindeki ilave su tutulumundan kaynaklanmaktadır. [54-56] nolu referanslarda, çelik lifsiz karışımlara kıyasla su emme değerlerinin iki kata ulaşan oranlarda daha fazla olabildiği görülmüştür. Buna karşın, buhar kürü uygulanmış numunelerde, CT veya YFC kullanımından bağımsız olarak, katkı oranı arttıkça betonun su emmesinin ve kapilerite katsayısının orantılı olarak azaldığı görülmüştür (Şekil 6a-Şekil 6b).

#### 3.3. Elastisite Modülleri ve Ultrasonik Ses Dalgası Hızları (Elastic Modulus and Ultrasonic Pulse Velocities)

Katkısız referans numuneler ile çimento yerine %12,5 oranında CT ve YFC'nun bağımsız ve birlikte kullanıldığı çelik lifsiz / lifli ve buhar kürsüz / kürlü numunelerin 28



Şekil 5. Su emme ve kapilerite katsayısının tayini (Determination of water absorption and capillarity coefficient)



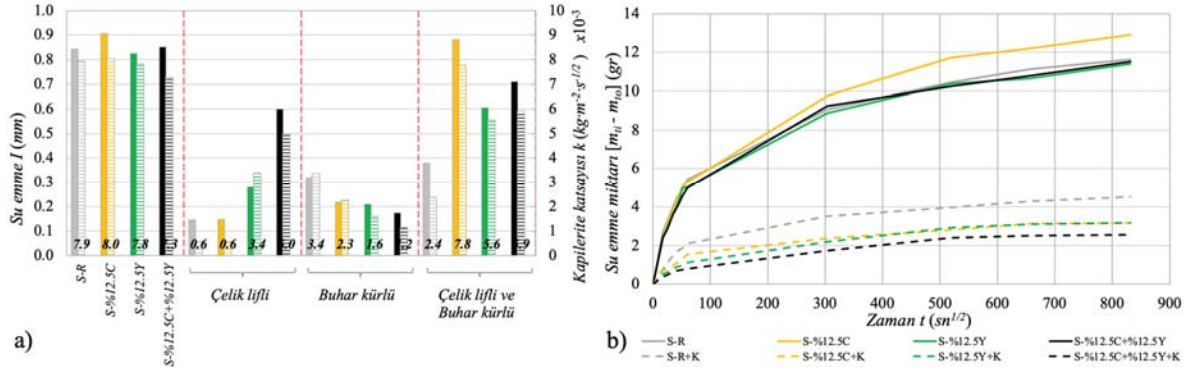
günlük ortalama elastisite modülleri Şekil 7a'da, ultra ses cihazından ölçülen hız değerleri Şekil 7b'de verilmiştir. Bununla birlikte, yüksek dayanımlı betonlar için ACI 363R-10 [57] ve FIB Model Code-2010 [58]'de verilen elastisite modülü bağıntılarının hangi oranda sonuç verdiği Şekil 7a'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. UYPB karışımında çimento yerine CT kullanımına ilişkin elastisite modülü değerleri kontrol numunesine göre çok az oranda azalmasına karşın (<%4), YFC eklenmesi ile bir miktar artmaktadır. Buhar kürsüz ve kürlü lifsiz beton numunelerinin elastisite modülleri birbirine çok yakın olmakla birlikte ( $\approx 43$  GPa), karışıma çelik lif eklenmesi ile %8-%12 arasında değişen oranlarda artışlar belirlenmiştir. Yüksek dayanımlı betonlara için önerilen elastisite modülleri incelendiğinde, ACI 363R-10'da önerilen bağıntının test numunelerine göre  $\pm\%10$  oranında farklı sonuç vermesine karşın, çelik lifsiz ve buhar kürsüz numuneler için nümerik sonuçların oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir (Şekil 7a). Model Code'da önerilen bağıntı ise, çelik lif ve/veya buhar küründen bağımsız olarak ortalama 52.5 GPa'lık bir sonuç üretmekle birlikte, test sonuçlarına göre oluşan rölatif farklar %35'e kadar ulaşabilmektedir (Şekil 7a).

Diğer taraftan, UYPB numuneleri üzerinde yapılan ultrasonik ses dalgası hız ölçümlerinin, karışıma CT ve/veya YFC eklenmesi ile çelik lif ve/veya buhar kürlü uygulamasından çok az etkilendiği belirlenmiştir (Şekil 7b).

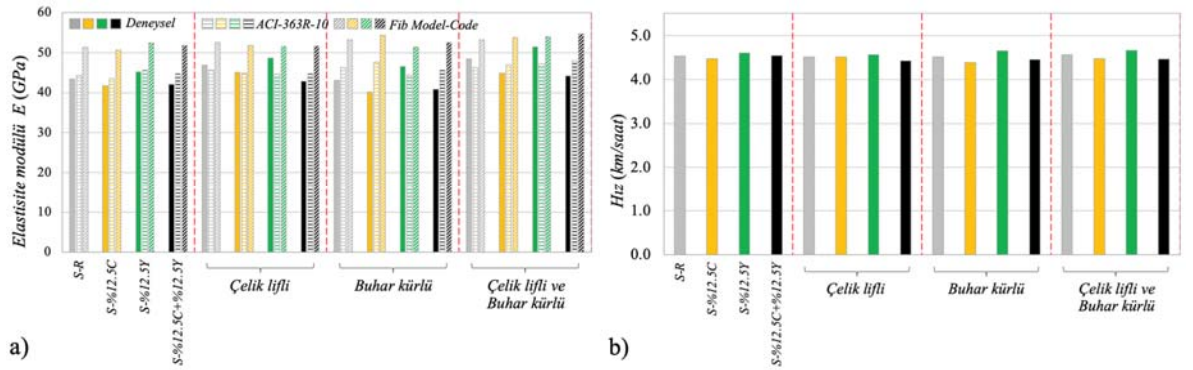
Tüm test numuneleri için bir yüzeyden diğer yüzeye ulaşma hızı ortalama 4.52 km/saat ölçülmüştür. UYPB'lar, geleneksel normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonlara göre çok daha sıkı iç-yapıya sahip olduğundan [3, 59-61], katkı malzemesinden bağımsız olarak tüm numunelerde birbirine yakın ve daha düşük boşluk oranları belirlenmiştir.

### 3.4. Yarmada Çekme Dayanımları (Splitting Tensile Strengths)

Katkısız referans numuneler ile çimento yerine %12,5 oranında CT ve YFC'nun bağımsız ve birlikte kullanıldığı (%12,5CT; %12,5YFC; %12,5CT+%12,5YFC) silindir numuneler için 28 günlük yarmada-çekme dayanımları Şekil 8'de sunulmuştur. Çelik lifsiz / lifli ve buhar kürsüz / kürlü durumlara ait dayanımlar incelendiğinde, buhar kürsüz numunelerde UYPB karışımına çelik lif eklenmesi çekme dayanımını ortalama 2,7 kat artırırken, kürlü numunelerde bu artışların 4 kata ulaşabildiği görülmüştür. Karışımda CT kullanımına kıyasla YFC eklenmesi çekme dayanımlarını bir miktar azaltmasına karşın, buhar kürlü numunelerde bu değişim oldukça küçüktür. Bununla birlikte, karışımındaki CT ve YFC'nun bağımsız ve birlikte kullanımından bağımsız olarak, kontrol numunesine kıyasla çekme dayanımlarının belirgin arttığı söylenebilir (Şekil 8). Smarzewski [42], hacimce %1.5'e kadar eklenen çelik liflerin yarmada çekme dayanımlarını belirgin şekilde artırdığını belirtmektedir.



Şekil 6. %12,5 CT ve/veya YFC içeren beton numunelerine ait a) Su emme değerleri ve b) Kapilerite katsayıları (a) Water absorptions and b) Capillarity coefficients of concrete specimens containing the GP and/or GGBFS of 12.5%)



Şekil 7. %12,5 CT ve/veya YFC içeren beton numunelerinin a) Elastisite modülleri ve b) Ultra ses hız değerleri (a) Elastic modulus and b) Ultrasonic pulse velocities of concrete specimens containing the GP and/or GGBFS of 12.5%)

#### 4. BETON BASINÇ DAYANIMLARINA AİT SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS RELATED TO CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTHS)

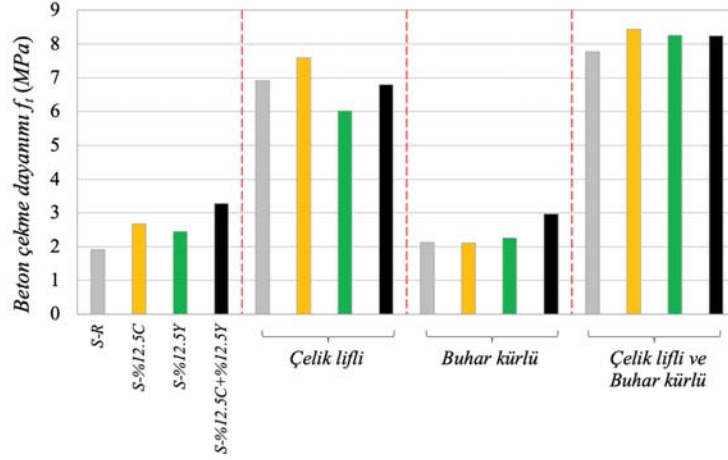
##### 4.1. Cam Tozu ve Yüksek Fırın Cürufunun Tekli Kullanımlarına ait Sonuçlar

(Results Relation to Single-Use of Glass Powder and Ground Granulated Blast Furnace Slag)

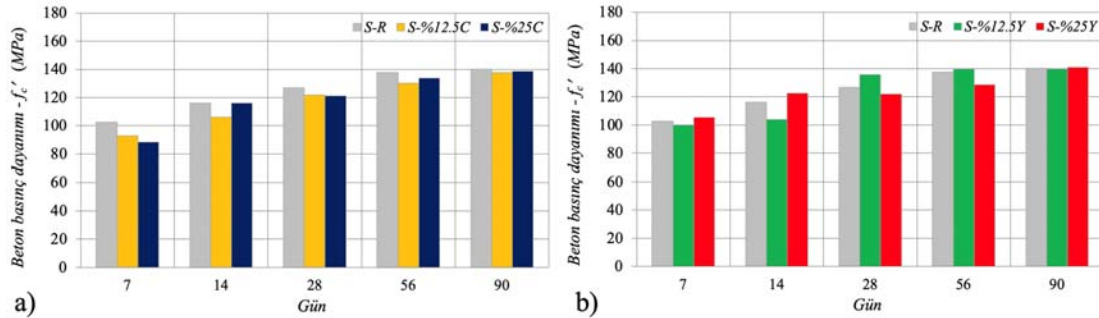
UYPB karışımında, katkısız referans numune (S-R) ile çimento yerine %12,5 ve %25 oranlarında CT ve YFC'nun tekli kullanıldığı numunelerin beton yaşlarına bağlı basınç dayanımlarının değişimi Şekil 9a-Şekil 9b'de verilmiştir. Ayrıca, 28 günlük beton basınç dayanımına göre diğer beton yaşları için elde edilen dayanımlara ait gerçekleşme oranları ( $f_c^{gün} / f_c^{28}$ ) Tablo 4'de sunulmuştur. UYPB'da %12,5 ve %25 oranlarında CT içeren karışımların tüm beton yaşları için basınç dayanımlarının referans karışıma göre azalma eğiliminde olduğu görülmüştür (Şekil 9a ve Tablo 4). Burada, erken beton yaşlarındaki (7 ve 14 gün) azalım rölatif olarak en fazla %14 iken, 28 ve 56 günlük beton yaşlarında bu azalım en fazla %5'dir. Buna karşın, her iki karışım için 90 günlük basınç dayanımlarının referans numuneyle çok yakın olduğu görülmektedir (Şekil 9a ve Tablo 4). Farklı beton yaşları için basınç dayanımlarındaki bu değişim, Soliman ve Tagnit-Hamau [22] ve Kou ve Xing [62]'de elde

edilenlerle aynı yöndedir. İlgili çalışmalarda, CT içeren karışımlara ait basınç dayanımları erken yaşlarda %10-%20 oranlarında azalmasına karşın, 56 ve 90 günlük dayanımların kontrol karışımına çok yakın olduğu belirlenmiştir. Tablo 4'deki sonuçlara göre, referans ve CT içeren numunelerde beton yaşı arttıkça basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür. CT içeren UYPB karışımları için, 28 günlük beton basınç dayanımlarına göre 56 ve 90 günlük test sonuçlarının sırasıyla en fazla %10 ve %14 oranında arttığı belirlenmiştir.

UYPB karışımında sadece %12,5YFC içeren karışımın beton basınç dayanımı referans karışıma göre erken beton yaşlarında (7 ve 14 gün) genelde azalırken, %25YFC içeren karışımda bir miktar artış göstermiştir (Şekil 9b). Bununla birlikte, 28 ve 56 günlük beton yaşlarında ise %12,5YFC içeren karışımın basınç dayanımı artış gösterirken %25YFC içeren karışımın dayanımı çok az oranda azalmıştır (Şekil 9b ve Tablo 4). YFC içeren her iki karışım için de 90 günlük basınç dayanımlarının referans karışımla hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Erken beton yaşlarındaki dayanımlar rölatif olarak en fazla %10 azalırken, 28 ve 56 günlük beton yaşlarında bu azalım en fazla %7'dir (Tablo 4). Farklı beton yaşları için basınç dayanımlarındaki bu değişim, Yazıcı [27] ve Yalçınkaya ve Yazıcı [28]'de elde edilenlerle bir miktar farklılık göstermektedir. İlgili çalışmalarda, çimento yerine %40'a kadar YFC kullanımı standart kür koşullarında basınç



Şekil 8. %12,5 CT ve/veya YFC içeren beton numunelerinin çekme dayanımları  
(Tensile strengths of concrete specimens containing the GP and/or GGBFS of 12.5%)



Şekil 9. a) CT ve b) YFC'nun tekli kullanımlarına ait basınç dayanımları  
(Compressive strengths related to single-use of a) GP and b) GGBFS)

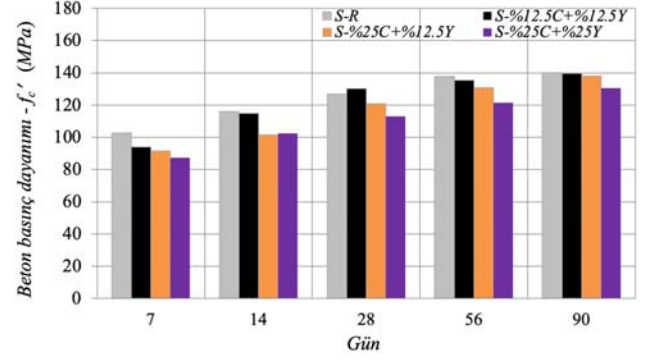
dayanımlarını çok az oranda artırmasına (<%5) karşın, daha yüksek YFC oranları için hızla azalan dayanımları oluşmuştur. Bununla birlikte, UYPB için hedef basınç dayanımlarına ulaşılmıştır. Sadece CT içeren beton karışımlarında olduğu gibi, YFC içeren numunelerde beton yaşı arttıkça basınç dayanımlarının artış eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu artışların, erken beton yaşlarında daha hızlı olduğu, ilerleyen yaşlarda ise beklenildiği gibi yavaş olduğu gözlenmiştir (Şekil 9b ve Tablo 4). YFC içeren UYPB karışımları için, 28 günlük beton basınç dayanımlarına göre 56 ve 90 günlük test sonuçlarının sırasıyla en fazla %5 ve %15 oranında arttığı belirlenmiştir (Tablo 4).

#### 4.2. Cam Tozu ve Yüksek Fırın Cürufunun İkili Kullanımına ait Sonuçlar

(Results Relation to Dual-Use of Glass Powder and Ground Granulated Blast Furnace Slag)

UYPB karışımında çimento yerine CT ve YFC'nun eşit ve farklı oranlarda kullanıldığı ikili kullanımlara ait basınç dayanımlarının değişimi Şekil 10'da, 28 günlük beton basınç dayanımına göre diğer beton yaşları için gerçekleşme oranları ( $f_c^{gün} / f_c^{28}$ ) Tablo 5'de sunulmuştur. Karışımda çimento yerine eşit miktarda CT ve YFC eklenmesi (%12,5CT+%12,5YFC ve %25CT+%25YFC) halinde, erken beton yaşlarında (7 ve 14 gün) katkı miktarı arttıkça kontrol karışıma göre basınç dayanımları azalan bir eğilim göstermiştir (Şekil 10 ve Tablo 5). Bu eğilim, erken yaşlarda daha belirgin olmasına karşın, ilerleyen beton yaşlarında sonuçlar kontrol karışımına yaklaşmaktadır. 28, 56 ve 90 günlük beton yaşlarında, %12,5CT+%12,5YFC içeren karışımın basınç dayanımları kontrol karışıma hemen hemen aynı iken %25CT+%25YFC içeren karışıma ait dayanımlar, sırasıyla, %11, %12 ve %7 oranlarında azalmıştır. Bununla birlikte, karışımdaki YFC miktarı sabit tutulup CT miktarı artırıldığında (%25CT+ %12,5YFC), 7, 14, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları, sırasıyla, %11, %13, %5 ve %5 oranlarında azalırken, 90 günlük basınç dayanımının referans numuneye oldukça yakın olduğu

(<%2) görülmüştür (Şekil 10 ve Tablo 5). UYPB karışımına eklenen CT ve YFC oranlarından bağımsız olarak, sadece CT veya YFC içeren karışımlarda olduğu gibi, beton yaşı arttıkça basınç dayanımlarının arttığı belirlenmiştir. CT ve YFC'nun ikili kullanımları ile ilgili olarak, 28 günlük basınç dayanımlarına göre 56 ve 90 günlük dayanımlar, sırasıyla, en fazla %8 ve %15 oranlarında artmıştır (Şekil 10 ve Tablo 5).



Şekil 10. CT ve YFC'nun ikili kullanımlarına ait basınç dayanımları

(Compressive strengths related to dual-use of GP and GGBFS)

#### 4.3. Çelik Lif Kullanımına ait Sonuçlar

(Results Relation to Steel Fiber Use)

DeneySEL çalışmada, UYPB karışımlarına hacimsel olarak %1,0 oranında 13mm'lik çelik lif eklenmesinin beton basınç dayanımına olan etkisi ile lifli beton karışımlarında söz konusu katkıların dayanımlar üzerindeki etkileri referans numuneler esas alınarak araştırılmıştır. CT ve/veya YFC içeren karışımlarda çelik lifin katkısı farklı beton yaşları için Şekil 11'de, çelik lifli UYPB karışımlarında CT ve YFC'nun bağımsız veya birlikte kullanılması hali için basınç dayanımlarının değişimi Şekil 12'de, 28 günlük beton basınç dayanımına göre diğer dayanımların gerçekleşme oranları Tablo 6'da sunulmuştur.

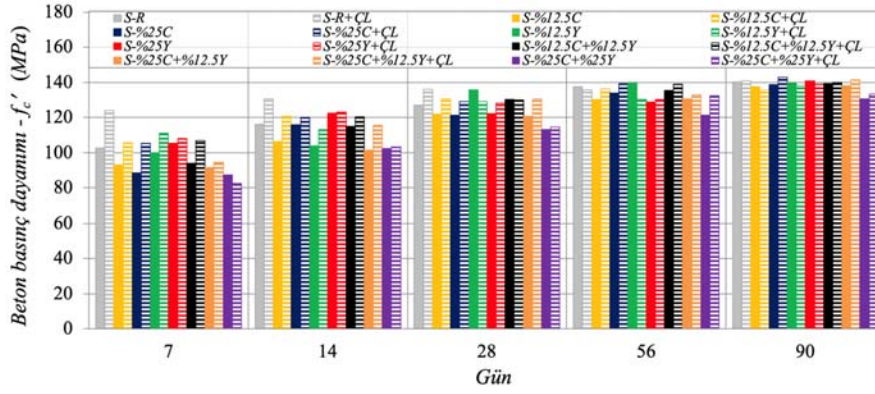
Tablo 4. CT ve YFC'nun tekil kullanımları için 28 günlük basınç dayanımına göre gerçekleşme oranları (Normalized strengths based on 28-day compressive strength for single-uses of GP and GGBFS)

Numune	CT (%)	YFC (%)	ÇL (%)	K	$f_c'$ (MPa) — $f_c^{gün} / f_c^{28}$								
					7	14	28	56	90				
S-R	---	---	---	Yok	102,6	0,81	116,1	0,91	126,9	137,6	1,08	140,3	1,11
S-%12,5C	12,5	---	---	Yok	93,1	0,76	106,3	0,87	121,9	130,2	1,07	137,7	1,13
S-%25C	25	---	---	Yok	88,4	0,73	116,0	0,96	121,2	133,8	1,10	138,7	1,14
S-%12,5Y	---	12,5	---	Yok	100,0	0,74	104,0	0,77	135,9	139,7	1,03	139,8	1,03
S-%25Y	---	25	---	Yok	105,4	0,86	122,5	1,00	122,1	128,7	1,05	140,9	1,15

Tablo 5. Eşit ve farklı oranda CT ve YFC içeren UYPB numuneleri için 28 günlük basınç dayanımına göre gerçekleşme oranları (Normalized strengths based on 28-day compressive strength for the UHPC specimens containing equal and different proportions of GP and GGBFS)

Numune	CT (%)	YFC (%)	ÇL (%)	K	$f_c'$ (MPa) — $f_c^{gün} / f_c^{28}$								
					7	14	28	56	90				
S-R	---	---	---	Yok	102,6	0,8	116,1	0,91	126,9	137,6	1,0	140,3	1,11
S-%12,5C+%12,5Y	12,	12,5	---	Yok	94,0	0,7	114,9	0,88	130,3	135,4	1,0	139,5	1,07
S-%25C+%12,5Y	25	12,5	---	Yok	91,7	0,6	101,5	0,84	120,7	130,8	1,0	138,1	1,14
S-%25C+%25Y	25	25	---	Yok	87,2	0,7	102,4	0,91	113,1	121,4	1,0	130,5	1,15



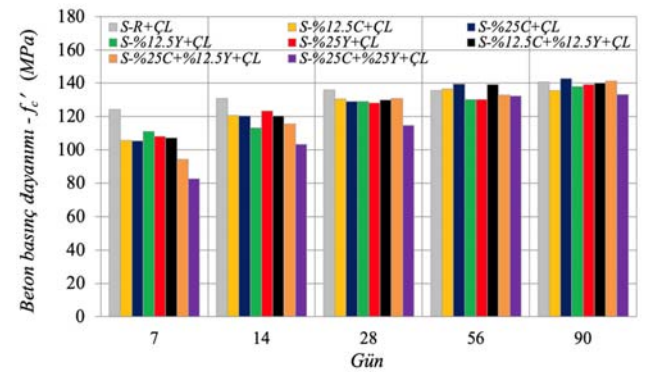


Şekil 11. UYPB'a çelik lif eklenmesinin basınç dayanımına etkisi  
(The impact of steel fiber inclusion on compressive strength of UHPC)

Katkısız referans numune ile %12,5 ve %25 oranlarında sadece CT veya YFC içeren lifsiz UYPB karışımlarına çelik lif eklenmesi sonucunda, basınç dayanımlarının erken beton yaşlarında %20'ye ulaşan oranlarda arttığı belirlenmiştir. Bu artış, 7 günlük test sonuçlarında daha belirgin iken, 14 günlük sonuçlarda daha düşük düzeydedir. Konu ile ilgili çalışmalarda, UYPB karışımındaki çelik lif miktarı ve beton yaşı arttıkça basınç dayanımlarının artış eğiliminde olduğu belirtilmektedir. Bunun nedeni, lif içeriğinin karışımdaki yüzey alanını artırması olarak ifade edilmektedir [39, 41, 42, 63]. CT içeren UYPB karışımlarının 28 günlük basınç dayanımları çelik lif eklenmesiyle yaklaşık %7 artarken ilerleyen beton yaşlarında (56 ve 90 gün) bu artışlar sınırlı düzeyde kalmıştır (en fazla %5) (Şekil 11). YFC içeren karışımlarda ise, çelik lif eklenmesiyle CT içeren numunelerdeki artışların aksine erken beton yaşlarında daha az olduğu (en fazla %11), 28 gün ve ilerleyen beton yaşlarında hemen hemen sabit kaldığı görülmüştür (Şekil 11). CT ve YFC'nun eşit oranlarda birlikte kullanıldığı karışımlara çelik lif eklenmesi sonucunda, %12,5CT+%12,5YFC içeren karışımın 7 günlük basınç dayanımı dışında, basınç dayanımlarında belirgin bir değişimin olmamıştır. CT ve YFC'nun farklı oranda kullanıldığı karışımda ise, erken ve 28 günlük beton yaşlarında çelik liflerin basınç dayanımlarını artırdığı, ilerleyen beton yaşlarında ise hemen hemen sabit kaldığı belirlenmiştir (Şekil 11).

Çelik lifli UYPB karışımlarında CT ve YFC katkıların kullanılması sonucunda, erken (7 ve 14 gün) ve 28 günlük beton basınç dayanımlarının referans karışıma göre azalım eğiliminde olduğu görülmüştür. Erken beton yaşlarında bu azalım rölatif olarak en fazla %34 iken, 28.günde en fazla %16, 56 ve 90 günlerde ise en fazla %5 oranındadır (Şekil 12 ve Tablo 6). %12,5 ve %25 oranlarında CT içeren karışımlar için 28 ve daha ileri günlerdeki basınç dayanımlarının referans karışıma göre artış eğiliminde olduğu görülürken, YFC içeren numunelerde bu dayanımların azaldığı görülmüştür. Kou ve Xing [62]'de, çelik lif içeren UYPB karışımında CT kullanımının erken beton yaşlarında basınç dayanımlarını azalttığı belirlenmiştir. İlerleyen beton yaşlarındaki basınç dayanımlarında artış olmasına karşın, karışımdaki CT oranı arttıkça bu artış daha sınırlı kalmıştır. Diğer taraftan,

Yalçınkaya ve Yazıcı [28]'de, çimento yerine %50YFC kullanımı sonucunda elde edilen 28 günlük basınç dayanımının kontrol karışımına çok yakın olduğu belirlenmiştir. Katkı malzemelerinin eşit ve farklı oranlarda kullanıldığı UYPB karışımlarında (S-%12,5C+%12,5Y+ÇL ve S-%25C+%12,5Y+ÇL), 28 günlük basınç dayanımları referans numuneye (S-R-ÇL) göre çok az oranda azalırken (<%5), 56 günlük sonuçların bir miktar arttığı (≈%3), 90.günde ise hemen hemen aynı kaldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, CT ve YFC'nun %25 oranında birlikte kullanıldığı karışıma ait erken ve 28 günlük basınç dayanımları referans numuneye göre daha az olmasına karşın, ilerleyen beton yaşlarında bu değişim oldukça küçüktür (Şekil 12). Her bir lifli UYPB karışımı için, 28 günlük dayanımlara göre gerçekleşme oranlarının erken yaşlarda oldukça hızlı olduğu, ilerleyen yaşlardaki dayanımlara ait artışların genel olarak sınırlı kaldığı görülmüştür. Burada, karışımda %25CT ve %25YFC içeren numunelere ait 56 ve 90 günlük dayanımların sırasıyla %15 ve %16 oranlarında arttığı belirlenmiştir (Tablo 6).



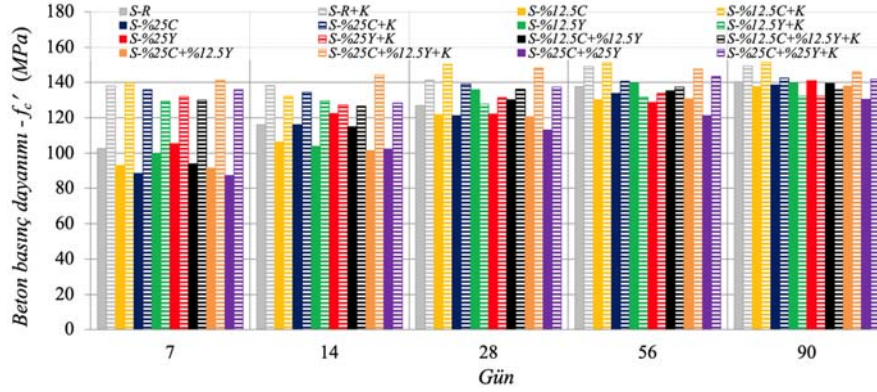
Şekil 12. Çelik lif içeren UYPB numunelerinde CT ve/veya YFC kullanımlarının basınç dayanımına etkisi  
(The effect of GP and/or GGBFS uses to compressive strength for UHPC specimens with steel fiber)

#### 4.4. Buhar Kürlemesine ait Sonuçlar (Results Relation to Steam Curing)

UYPB numunelerine uygulanan buhar kürünün beton basınç dayanımına olan etkisi ile buhar kürü uygulanmış numuneler

**Tablo 6.** Çelik lifli UYPB numuneleri için 28 günlük basınç dayanımına göre gerçekleşme oranları  
(Normalized strengths based on 28-day compressive strength for the UHPC specimens with steel fiber)

Numune	CT (%)	YFC (%)	ÇL (%)	K	$f'_c$ (MPa) — $f'_c^{28} / f'_c^{\text{gün}}$								
					7	14	28	56	90				
S-R-ÇL	---	---	%1	Yok	124,2	0,91	130,7	0,96	136,1	135,7	1,00	140,8	1,03
S-%12,5C+ÇL	12,5	---	%1	Yok	108,8	0,83	120,8	0,93	130,5	136,5	1,05	135,8	1,04
S-%25C+ÇL	25	---	%1	Yok	105,3	0,82	120,3	0,93	129,1	139,4	1,08	142,9	1,11
S-%12,5Y+ÇL	---	12,5	%1	Yok	111,1	0,86	113,2	0,88	129,1	130,4	1,01	138,0	1,07
S-%25Y+ÇL	---	25	%1	Yok	108,1	0,84	123,3	0,96	128,1	130,2	1,02	139,2	1,09
S-%12,5C+%12,5Y+ÇL	12,5	12,5	%1	Yok	107,0	0,82	120,5	0,93	129,9	139,2	1,07	140,0	1,08
S-%25C+%12,5Y+ÇL	25	12,5	%1	Yok	94,4	0,72	115,6	0,88	130,7	133,0	1,02	141,5	1,08
S-%25C+%25Y+ÇL	25	25	%1	Yok	82,5	0,72	103,3	0,90	114,7	132,3	1,15	133,3	1,16

**Şekil 13.** Çelik lifsiz UYPB numuneleri için buhar kürünün basınç dayanımına etkisi  
(The effect of steam curing to compressive strength for non-fiber UHPC specimens)

üzerinde söz konusu katkıların dayanımlar üzerindeki etkileri lifsiz beton karışımları için değerlendirilmiştir. Farklı oranlarda CT ve/veya YFC içeren test numuneleri üzerinde buhar kürünün etkisi Şekil 13'de, buhar kürü uygulanmış numunelerde CT ve/veya YFC kullanılmadığı basınç dayanımı üzerindeki etkileri Şekil 14'de, 28 günlük basınç dayanımına göre diğer dayanımların gerçekleşme oranları Tablo 7'de sunulmuştur. Çalışmada, çelik lifsiz küp numunelere buhar kürü uygulanması sonucunda, erken yaşlarındaki (7 ve 14 gün) basınç dayanımlarında rölatif olarak %61'e ulaşan artışlar belirlenmiştir. 28 ve daha ileri beton yaşlarında ise, %12,5YFC+K haricindeki tüm numunelerde referans numuneye göre basınç dayanımlarının, beklenildiği gibi, daha az oranlarda arttığı belirlenmiştir (Şekil 13). Burada, %12,5YFC+K numunesine ait basınç dayanımı en fazla %6 azalırken, diğer karışımlardaki rölatif artışlar 28, 56 ve 90 günler için, sırasıyla, en fazla %23, %16 ve %10 oranlarındadır. Burada elde edilen deneysel sonuçlar, Yazıcı [27]'de YFC içeren ve buhar kürü uygulanmış UYPB numunelerine ait test sonuçları ile benzer yöndedir. İlgili çalışmada, karışımdaki YFC miktarı arttıkça çimento, silis dumanı ve katkı malzemeleri arasındaki etkileşimin artmasına bağlı olarak basınç dayanımlarında pozitif kazançlar elde edilmiştir.

Diğer taraftan, %12,5 ve %25 oranlarında sadece CT veya YFC içeren buhar kürlü UYPB numunelerine ait basınç dayanımlarının, genel olarak, referans karışıma göre erken beton yaşlarında azalan bir eğilimde olduğu, buna karşın referans karışıma göre farkın %8'i geçmediği söylenebilir

(Şekil 14 ve Tablo 7). 28 ve daha ileri günlerdeki basınç dayanımlarının ise, %12,5CT+K haricinde rölatif olarak en fazla %12 azalmıştır. İlgili numunede ise 28 günlük basınç dayanımı %6 artarken, 56 ve 90 günlük dayanımların referans karışıma hemen hemen aynı olduğu söylenebilir (Şekil 14 ve Tablo 7). UYPB'da CT ve YFC'nun %12,5 ve %25 oranlarında birlikte kullanıldığı numuneler için tüm beton yaşlarında elde edilen basınç dayanımlarının referans karışıma göre %3-%9 arasında daha düşük olduğu belirlenmiştir (Tablo 7). Karışımda YFC miktarı tutulup CT miktarının artırılmasıyla 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımlarının çok küçük de olsa arttığı (<%5), 56 ve 90 günlük dayanımların ise referans karışıma hemen hemen aynı olduğu görülmüştür (Şekil 14 ve Tablo 7). Buhar kürü uygulanmış UYPB numunelerine, bağımsız, eşit ve farklı oranlarda CT ve YFC eklenmesinin beton basınç dayanımında belirgin bir etkisinin olmadığı söylenebilir. Bununla birlikte, karışımdaki CT ve YFC'na ait oranlardan bağımsız olarak buhar kürü uygulanmış numunelerde beton yaşı arttıkça basınç dayanımları küçük oranlarda ( $\pm$ %5) artmıştır.

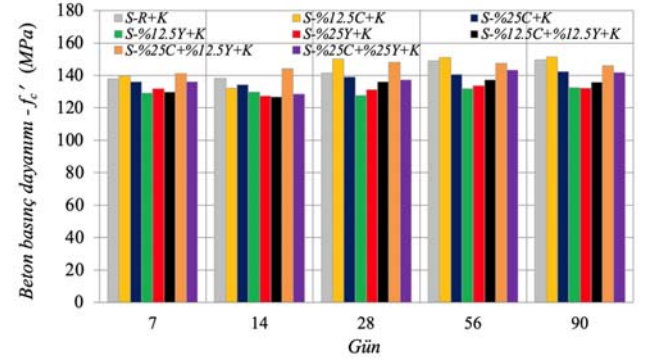
#### 4.5. Çelik Lif ve Buhar Kürlemesine Ait Sonuçlar (Results Relation to Steel Fiber Use and Steam Curing)

CT ve YFC'nun tekli ve ikili kullanımları için çelik lif içeren UYPB numuneleri üzerinde buhar kürünün etkisi ve ayrıca, çelik lifli ve buhar kürü uygulanmış numuneler üzerinde söz konusu katkıların basınç dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Karışımda çimento yerine farklı



oranlarda CT ve/veya YFC içeren lifli numuneler için farklı beton yaşlarında buhar kürünün etkisi Şekil 15’de, çelik lifli ve buhar kürü uygulanmış numunelerde CT ve/veya YFC kullanımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkileri Şekil 16’da, 28 günlük basınç dayanımına göre diğer dayanımların gerçekleşme oranları Tablo 8’de sunulmuştur. Çelik lifli UYPB numunelerine buhar kürü uygulanması sonucunda, beton basınç dayanımlarının tüm beton yaşları için arttığı belirlenmiştir (Şekil 15). Bu artışların erken beton yaşlarında rölatif olarak en fazla %103 olduğu, 28, 56 ve 90 günlük beton yaşlarında ise sırasıyla en fazla, %41, %23 ve %24 olduğu görülmüştür. Tüm karışımlar için basınç dayanımlarındaki artışlar 7 ve 14 günlük erken beton yaşlarında daha belirgindir. Genel olarak, CT ve YFC’nun birlikte kullanıldığı çelik lifli karışımlardaki katkı oranı arttıkça buhar kürü uygulanması ile birlikte, basınç dayanımının daha da arttığı söylenebilir. Buhar kürü uygulanmış çelik lifli UYPB numuneleri için katkı malzemelerinin basınç dayanımlarını tüm beton yaşlarında arttırdığı belirlenmiştir (Şekil 16 ve Tablo 8). %12,5 ve %25 oranlarında CT veya YFC’nun tekil olarak eklendiği karışımlara ait basınç dayanımlarındaki artış erken beton yaşlarında en fazla %12 oranında, 28, 56 ve 90 günlük beton yaşlarında ise en fazla %9 oranındadır. CT veya YFC içeren numunelerde katkı oranının artmasına bağlı olarak basınç dayanımlarındaki artış tüm beton yaşlarında belirgin hale gelmektedir. Buhar kürü uygulanmış çelik lifli UYPB numunelerin incelendiği diğer çalışmalarda [41, 42, 44, 62], buhar kürü uygulanması ile basınç dayanımlarının belirgin şekilde arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, karışımdaki CT oranı arttıkça dayanımlarda küçük de olsa bir artış

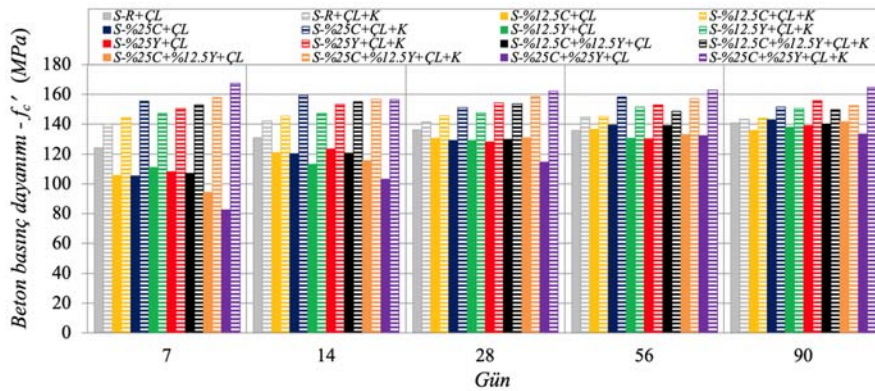
eğilimi görülmüştür [62]. CT ve YFC’nun birlikte kullanıldığı karışımlarda 7 ve 14 günlük basınç dayanımlarının %19’a ulaşan oranlarda daha fazla olduğu, 28, 56 ve 90. günler için bu artışların %1-%15 arasında kaldığı belirlenmiştir (Tablo 8). Çelik lifli UYPB’a eklenen CT ve YFC miktarından bağımsız olarak, buhar kürü uygulanmış numunelerde beton yaşı arttıkça basınç dayanımlarının arttığı görülmektedir (Şekil 16 ve Tablo 8). Bu artışın, erken beton yaşlarında daha hızlı, ilerleyen beton yaşlarında ise daha yavaş olduğu görülmektedir. Buhar kürü uygulanmış ve çelik lifli UYPB numuneleri için, 28 günlük beton basınç dayanımına göre 56 ve 90 günlük test sonuçları sırasıyla en fazla %5 ve %2 artış göstermiştir (Tablo 8).



**Şekil 14.** Buhar kürü lifsiz numuneler için CT ve/veya YFC kullanımlarının basınç dayanımına etkisi  
 (The effect of GP and/or GGBFS uses to compressive strength for non-fiber UHPC specimens with steam curing)

**Tablo 7.** Buhar kürü uygulanmış UYPB numuneleri için 28 günlük basınç dayanımına göre gerçekleşme oranları  
 (Normalized strengths based on 28-day compressive strength for the UHPC specimens with steam curing)

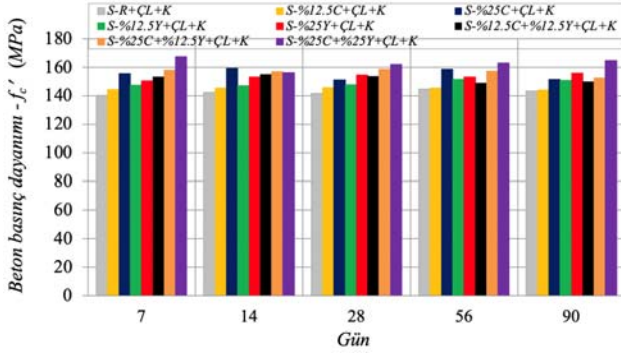
Numune	CT (%)	YFC (%)	ÇL (%)	K	$f'_c$ (MPa)			$f'_c^{28} / f'_c^{\text{gün}}$					
					7	14	28	56	90				
S-R+K	---	---	---	Var	137,9	0,98	138,2	0,98	141,4	149,0	1,05	149,5	1,06
S-%12,5C+K	12,5	---	---	Var	139,8	0,93	132,2	0,88	150,4	151,3	1,01	151,6	1,01
S-%25C+K	25	---	---	Var	136,0	0,98	134,4	0,97	139,1	140,7	1,01	142,5	1,02
S-%12,5Y+K	---	12,5	---	Var	129,3	1,01	129,8	1,02	127,7	131,8	1,03	132,4	1,04
S-%25Y+K	---	25	---	Var	131,9	1,00	127,3	0,97	131,3	133,7	1,02	132,3	1,01
S-%12,5C+%12,5Y+K	12,5	12,5	---	Var	129,9	0,95	126,8	0,93	136,2	137,3	1,01	135,9	1,00
S-%25C+%12,5Y+K	25	12,5	---	Var	141,2	0,95	144,2	0,97	148,2	147,6	1,00	146,0	0,99
S-%25C+%25Y+K	25	25	---	Var	140,0	1,02	128,5	0,94	137,3	135,3	0,99	141,9	1,03



**Şekil 15.** Çelik lif içeren UYPB numuneleri için buhar kürünün basınç dayanımına etkisi  
 (The effect of steam curing to compressive strength for UHPC specimens with steel fiber)

**Tablo 8.** Çelik lifli ve buhar kürlü UYPB numuneleri için 28 günlük basınç dayanımına göre gerçekleşme oranları (Normalized strengths based on 28-day compressive strength for the UHPC specimens with steel fiber and steam curing)

Numune	CT (%)	YFC (%)	ÇL (%)	K	$f'_c$ (MPa) — $f'_c^{28} / f'_c^{\text{gün}}$								
					7	14	28	56	90				
S-R+ÇL+K	---	---	%1	Var	140,2	0,99	142,3	1,01	141,4	144,7	1,02	143,4	1,01
S-%12,5C+ÇL+K	12,5	---	%1	Var	144,5	0,99	145,3	1,00	145,7	145,2	1,00	144,1	0,99
S-%25C+ÇL+K	25	---	%1	Var	155,5	1,02	159,2	1,05	151,2	158,4	1,05	151,6	1,00
S-%12,5Y+ÇL+K	---	12,5	%1	Var	147,3	1,00	147,2	1,00	147,7	151,6	1,03	150,6	1,02
S-%25Y+ÇL+K	---	25	%1	Var	150,4	0,97	153,2	0,99	154,3	153,0	0,99	155,8	1,01
S-%12,5C+%12,5Y+ÇL+K	12,5	12,5	%1	Var	153,0	1,00	154,9	1,01	153,6	148,8	0,97	149,7	0,97
S-%25C+%12,5Y+ÇL+K	25	12,5	%1	Var	157,9	1,00	156,8	0,99	158,4	157,1	0,99	152,5	0,96
S-%25C+%25Y+ÇL+K	25	25	%1	Var	167,4	1,03	156,3	0,96	162,0	162,8	1,00	164,7	1,02

**Şekil 16.** Çelik lif içeren ve buhar kürlü numuneler için CT ve/veya YFC kullanımlarının basınç dayanımına etkisi (The effect of GP and/or GGBFS uses to compressive strength for UHPC specimens with steel fiber and steam curing)

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) içeriğinde çimento yerine farklı oranlarda cam tozu (CT) ve/veya yüksek fırın cürufunun (YFC) kullanılabilirliği beton basınç dayanımı açısından araştırılmıştır. Bununla birlikte, UYPB karışımlarına çelik lif eklenmesi ve/veya buhar kürlü uygulanması durumlarında, bu katkı malzemelerinin basınç dayanımları üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında hazırlanan UYPB numunelerin 7, 14, 28, 56 ve 90 günlük test sonuçları esas alınarak elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Hazırlanan UYPB karışımlarına ait taze beton özellikleri incelendiğinde, lifsiz karışımlarda çimento yerine YFC kullanılmasıyla işlenebilirlik ve akıcılık özelliklerinin kontrol karışımla hemen hemen aynı olduğu belirlenmiştir. Karışımdaki CT oranının artışı, lifsiz betonun işlenebilirliğine daha pozitif katkı sağlamıştır. Diğer taraftan, CT içeren karışımlara lif eklenmesi ile yayılma değerleri yaklaşık %20-%24 azalmakla birlikte, YFC içeren tüm karışımlarda bu azalım yaklaşık %15'dir.
- UYPB karışımında kullanılan cam tozu miktarı arttıkça beton basınç dayanımı azalan bir eğilim göstermiştir. Bu değişim, 28, 56 ve 90 günlük beton yaşlarında oldukça küçüktür. Bununla birlikte, çimentonun yerine %12,5YFC eklenmesi erken beton yaşlarında dayanımı azaltırken, %25YFC içeren karışımda bir miktar artış göstermiştir. Buna karşın, 28 ve 56 günlük beton yaşlarında %12,5YFC

içeren karışımın basınç dayanımı artış gösterirken %25YFC içeren karışımın dayanımı azalmıştır. UYPB karışımında eşit miktarda katkı eklenmesi sonucunda, basınç dayanımları küçük de olsa azalan bir eğilim göstermiştir. Dayanımlardaki bu değişimlere rağmen UYPB'a ait hedef basınç dayanımlarının sağlandığı belirlenmiştir.

- Çalışmada kapsamında, katkı kullanımı, çelik lif ve buhar kürlü uygulamalarına ait farklı alternatiflerin hazırlandığı karışımlardan bağımsız olarak, CT ve/veya YFC içeren numunelerde beton yaşı arttıkça basınç dayanımları artış göstermiştir. Bu artışların, erken beton yaşlarında daha hızlı olduğu, ilerleyen yaşlarda ise, beklenildiği gibi yavaş olduğu görülmüştür.
- CT ve/veya YFC içeren UYPB karışımlarına çelik lif eklenmesi sonucunda 7 ve 14 günlük basınç dayanımlarının arttığı (en fazla %21) belirlenmiştir. 28, 56 ve 90 günlük beton yaşlarında ise, CT içeren karışımların basınç dayanımları bir miktar artış gösterirken, YFC içeren karışımlara ait dayanımlarının hemen hemen sabit kaldığı görülmüştür. UYPB numunelerine buhar kürlü uygulanması ile, erken beton yaşlarında %61'e varan oranlarda kazançlar elde edilmiştir. 28 ve daha ileri beton yaşlarında ise, %12,5YFC içeren karışım haricindeki tüm karışımlarda beton basınç dayanımlarının buhar kürlüne bağlı olarak arttığı belirlenmiştir.
- Çelik lifli UYPB karışımlarına buhar kürlü sonucunda, tüm beton yaşlarındaki basınç dayanımları belirgin bir şekilde artmıştır. Bu artışların erken beton yaşlarında en fazla %103 oranında olduğu, 28, 56 ve 90 günlük beton yaşlarında ise sırasıyla en fazla, %41, %23 ve %24 oranlarında olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ışığı altında, daha çevre dostu ve ekonomik UYPB elde etmek amacıyla karışımdaki çimento miktarı azaltılarak yerine cam tozu veya yüksek fırın cürufunun kullanılması ile hedef beton basınç dayanımlarının elde edilebileceği görülmüştür. Beton karışımında çelik lif eklenmesi ve buhar uygulamasıyla bu katkı malzemelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkileri daha belirgin hale gelmektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Hassan A.M.T., Jones S.W., Mahmud G.H., Experimental test methods to determine the uniaxial

- tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC), *Constr. Build. Mater.*, 37, 874-882, 2012.
2. Rossi P., Influence of fibre geometry and matrix maturity on the mechanical performance of ultra high-performance cement-based composites, *Cem. Concr. Compos.*, 37, 246-248, 2013.
  3. Yu R., Spiesz P., Brouwers H.J.H., Development of an eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses, *Cem. Concr. Compos.*, 55, 383-394, 2015.
  4. Turker K., Hasgul U., Birol T., Yavas A., Yazici H., Hybrid fiber use on flexural behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete beams, *Compos. Struct.*, 229, 111400, 2019.
  5. Park J.J., Kang S.T., Koh K.T., Kim S.W., Influence of the Ingredients on the Compressive Strength of UHPC as A Fundamental Study to Optimize the Mixing Proportion, The Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel-Germany, 105-112, 05-07 March, 2008.
  6. Yoo D.Y., Lee J.H., Yoon Y.S., Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites, *Compos. Struct.*, 106, 742-753, 2013.
  7. Şimşek O., Aruntaş H., Demir İ., Determination of type and ratio of superplasticizers in concrete production, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 22 (4), 829-835, 2013.
  8. Birol T., Ultra yüksek performanslı lifli beton ile üretilen betonarme kirişlerin eğilme davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2016.
  9. Habel K., Gauvreau P., Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) to impact and static loading, *Cem. Concr. Compos.*, 30 (10), 938-946, 2008.
  10. Wille K., Naaman A.E., Parra-Montesinos G.J., Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way, *ACI Mater. J.*, 108 (1), 46-54, 2011.
  11. AFGC/SETRA, Ultra high performance fibre-reinforced concretes, Revised ed., Association Française de Génie Civil; Service d'études techniques des routes et autoroutes, France, 2013.
  12. Fehling E., Schmidt M., Walraven J., Leutbecher T., Frönlich S., Ultra-High Performance Concrete, UHPC: Fundamentals, Design, Examples, Beton-Kalender, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2014.
  13. Moreillon L., Menetrey P., Rehabilitation and Strengthening of Existing RC Structures with UHPFRC: Various Application, RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, Marseille-France, 127-136, 1-3 October, 2013.
  14. SAMARIS, Full scale application of UHPFRC project rehabilitation of bridges-from the lab to the field, European Project 5th FWP/SAMARIS-Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructures - WP14: HPRFCC, Report D22, 2005.
  15. Wang Y.C., Lee M.G., Ultra-high strength steel fiber reinforced concrete for strengthening of RC frames, *J. Mar. Sci. Technol.*, 15 (3), 210-218, 2007.
  16. Graybeal B.A., Flexural behavior of an ultrahigh-performance concrete I-girder, *J. Bridge Eng.*, 13 (6), 602-610, 2008.
  17. Russell H.G., Graybeal B.A., Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report project bridge community, FHWA Publication HRT-13-060, Federal Highway Administration, 2013.
  18. Ceylan S., Yazıcıoğlu S., Turanlı L., Usage of micronized zeolite in high performance concrete, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 163-176, 2021.
  19. Yazıcı H., Yiğiter H., Karabulut A.Ş., Baradan B., Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete, *Fuel*, 87 (12), 2401-2407, 2008.
  20. Shaikh F.U.A., Nishiwaki T., Kwon S., Effect of fly ash on tensile properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites (UHP-FRCC), *J. Sustainable Cem.-Based Mater.*, 7 (3), 1-15, 2018.
  21. Vaitkevicius V., Serelis E., Hilbig H., The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete, *Constr. Build. Mater.*, 68, 102-109, 2014.
  22. Soliman N.A., Tagnit-Hamou A., Development of ultra high performance concrete using glass powder-towards ecofriendly concrete, *Constr. Build. Mater.*, 125, 600-612, 2016.
  23. Du H., Tan K.H., Properties of high volume glass powder concrete, *Cem. Concr. Compos.*, 75, 22-29, 2017.
  24. Yazıcı H., Yardımcı M.Y., Yiğiter H., Aydın S., Türkel S., Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag, *Cem. Concr. Compos.*, 32 (8), 639-648, 2010.
  25. Song H-W., Saraswathy V., Studies on corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag - An overview, *J. Hazard. Mater.*, 138 (2), 226-233, 2006.
  26. Soliman N.A., Tagnit-Hamou A., Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap, *Constr. Build. Mater.*, 139, 374-383, 2017.
  27. Yazıcı H., The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures, *Build. Environ.*, 42 (5), 2083-2089, 2007.
  28. Yalçınkaya Ç., Yazıcı H., Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPC with high-volume mineral admixtures, *Constr. Build. Mater.*, 144, 252-259, 2017.
  29. Taşdemir M.A., Bayramov F., Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı, *İTÜ Derneği/d, mühendislik serisi*, 1 (2), 125-144, 2002.
  30. JSCE, Recommendations for design and construction of ultra-high strength fiber reinforced concrete structures

- (Draft), JSCE Guidelines for Concrete No. 9, Japan Society of Civil Engineers, 2006.
31. El-Dieb A.S., Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers, *Mater. Des.*, 30, 4286-4292, 2009.
  32. Yoo D.-Y., Kang S.-T., Yoon Y.-S., Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC, *Constr. Build. Mater.*, 64, 67-81, 2014b.
  33. Yavas A., Birol T., Türker K., Hasgül U., Yazıcı H., Improvement on flexural performance of UHPFRC with hybrid steel fiber, *Tech. J.*, 31 (6), 10379-10397, 2020.
  34. Rossi P., Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC): An Overview, Fifth RILEM Symposium on fibre reinforced concretes (FRC), Lyon-France, 87-100, 13-15 September, 2000.
  35. Kocatürk A.N., Haberveren S., Aslan E.G., Taşdemir M.A., Özel Prefabrikte Elemanların Ultra Yüksek Performanslı Betonlarla Üretimi, 6. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul-Türkiye, 447-458, 16-18 Kasım, 2005.
  36. Park J.S., Kim Y.J., Cho J.R., Jeon S.J., Early-age strength of ultra high performance concrete in various curing conditions, *Materials*, 8 (8), 5537-5553, 2015.
  37. Hiremath P., Yaragal S.C., Investigation on mechanical properties of reactive powder concrete under different curing regimes, *Mater. Today: Proc.*, 4 (9), 9758- 9762, 2017.
  38. Azmee N.M., Shafiq N., Ultra high performance concrete: From fundamental to applications, *Case Stud. Constr. Mater.*, 9, e001979, 2018.
  39. Wu Z., Shi C., He. W., Wu L., Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete, *Constr. Build. Mater.*, 103, 8-14, 2016.
  40. Birol T., Hasgul U., Terzi M., Yavaş A., Turker K., Yazıcı H., Effect of Different Steel Fiber Type and Content in Flexural Behavior of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, 3rd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, Tirana-Albania, 262-272, 19-21 May, 2016.
  41. Arel H.Ş., Effects of curing type, silica fume fineness, and fiber length on the mechanical properties and impact resistance of UHPFRC, *Results Phys.*, 6, 664-674, 2016.
  42. Smarzewski P., Effect of curing period on properties of steel and polypropylene fibre reinforced ultra-high performance concrete, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 245 (3), 032059, 2017.
  43. Askar L.K., Tayeh B.A., Abu Bakar B.H., Effect of different curing conditions on the mechanical properties of UHPFC, *Iran. j. energy environ.*, 4, 299-303, 2013.
  44. Shen P., Lu L., He Y., Wang F., Hu S., The effect of curing regimes on the mechanical properties, nano-mechanical properties and microstructure of ultra high performance concrete, *Cem. Concr. Res.*, 118, 1-13, 2019.
  45. Bıçakçioğlu N., Cam tozu ve yüksek fırın cürufu kullanımlarının ultra yüksek performanslı beton karışımlarının basınç dayanımına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2020.
  46. BS EN 12390-3:2009, Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens, British Standards Institution, Milton Keynes, UK, 2009.
  47. ASTM C496/C496 M-17, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017.
  48. ASTM C469 / C469 M-14, Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2014.
  49. ASTM C1585-20, Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2020.
  50. Ramakrishnan K., Pugazhmani G., Sripragadeesh R., Muthu D., Venkatasubramanian C., Experimental study on the mechanical and durability properties of concrete with waste glass powder and ground granulated blast furnace slag as supplementary cementitious materials, *Constr. Build. Mater.*, 156, 739-749, 2017.
  51. Gholampour A., Ozbakkaloglu T., Performance of sustainable concretes containing very high volume Class-F fly ash and ground granulated blast furnace slag, *J. Cleaner Prod.*, 162, 1407-1417, 2017.
  52. Chi M., Chi J., Wu C., Effect of GGBFS on compressive strength and durability of concrete, *Adv. Mat. Res.*, 1145, 22-26, 2018.
  53. Sang N.T., Quan T.M., Nguyen M.H., Ho L.S., Performances of eco-fine-grained concrete containing saline sand as partial fine aggregate replacement, *J. Appl. Sci. Eng.*, 24 (4), 527-539, 2021.
  54. Gupta S., Development of high strength self compacting mortar with hybrid blend of polypropylene and steel fibers, *Int. J. Eng. Technol.*, 4 (10), 571-576, 2014.
  55. Pyo S., Kim H.-K., Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder, *Constr. Build. Mater.*, 131, 459-466, 2017.
  56. Bai K.D., Rao A.K., Sounthararajan V.M., Strength characteristics of slag based steel fiber reinforced concrete with partial replacement of steel slag in coarse aggregate, *Int. J. Recent Technol. Eng.*, 8 (3), 3449-3452, 2019.
  57. ACI 363 ACI 363R-10, State-of-the-art report on high-strength concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2010.
  58. FIB Model Code-2010, Fib model code for concrete structures 2010, International Federation for Structural Concrete (fib), Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2013.
  59. Fehling E., Bunje K., Leutbecher T., Design Relevant Properties of Hardened Ultra High Performance Concrete, Proceedings of the International Symposium

- on Ultra High Performance Concrete, Kassel-Germany, 327-338, 13-15 September, 2004.
60. Wang D., Shi C., Wu Z., Xiao J., Huang Z., Fang Z., A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties, *Constr. Build. Mater.*, 96, 368-377, 2015.
  61. ChunPing G.U., Guang Y.E., Wei S.U.N., Ultrahigh performance concrete—properties, applications and perspectives, *Sci. China Technol. Sci.*, 58 (4), 587-599, 2015.
  62. Kou S.C., Xing F., The effect of recycled glass powder and reject fly ash on the mechanical properties of fibre-reinforced ultrahigh performance concrete, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2012, ID 263243, 1-8, 2012.
  63. Yoo D.Y., Yoon Y.S., Structural performance of ultrahigh-performance concrete beams with different steel fibers, *Eng. Struct.*, 102, 409-423, 2015.