



## Influence of aggregate volume on the shrinkage, rheological and mechanical properties of ultra-high performance concrete

Çağlar Yalçinkaya<sup>1,2\*</sup>, Burak Felekoğlu<sup>1</sup>, Halit Yazıcı<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Dokuz Eylül University, Izmir, 35160, Turkey

<sup>2</sup>Department of Materials, Mechanics, Management & Design (3Md), Delft University of Technology, Delft, 2628 CN, The Netherlands

### Highlights:

- Rheological behavior of ultra-high performance concrete
- Measurement of early-age autogenous and drying shrinkage
- Effect of aggregate volume on shrinkage at early-age and long term

### Keywords:

- UHPC
- Quartz aggregate
- Early-age shrinkage
- Rheological properties

### Graphical/Tabular Abstract

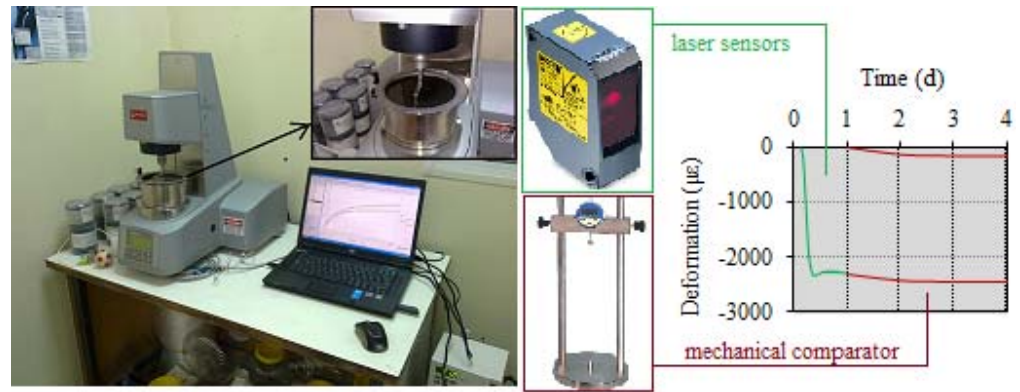


Figure A. The measurements of rheological and shrinkage properties of UHPC

### Article Info:

Research Article  
Received: 30.07.2018  
Accepted: 22.03.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.449285

### Acknowledgement:

The authors gratefully acknowledge the financial support of TUBITAK under grant 110M691.

### Correspondence:

Author: Çağlar Yalçinkaya  
e-mail: caglar.yalcinkaya@deu.edu.tr  
phone: +90 232 301 7042

**Purpose:** It is anticipated that cast-in-situ applications of ultra-high performance concrete (UHPC) will increase in the near future, so the studies on early-age properties of UHPC have come into prominence. The basic variable of mix proportions that determines the rheological and shrinkage properties is undoubtedly aggregate volume and accordingly paste volume. In the scope of this experimental study, influence of volume fraction of quartz aggregate on rheological, shrinkage, and mechanical properties of UHPC was investigated.

### Theory and Methods:

UHPC mixtures with 0, 35, 45, 55, and 65% volume fraction of quartz aggregate were studied. Anton Paar Physica MCR 51 rheometer was used to obtain rheological parameters of UHPC mixtures. The results were modeled with Herschel-Bulkley approach. A relatively new test setup including laser sensors was used to measure early-age shrinkage whereas the shrinkage at long term was measured via mechanical comparator. Autogenous and drying shrinkages were monitored at 20°C-100% RH on sealed specimens, and at 30°C-50% RH, respectively. Mechanical properties under standard, steam, and autoclave curing were measured.

### Results:

Paste phase of UHPC exhibited dilatant behavior. When aggregates were included to the paste, the behavior changed from dilatant to pseudoplastic. Increasing the aggregate volume up to 45% did not increase yield value. This volume of aggregate, thus, can be evaluated as upper limit for self-leveling ability of UHPC. Final viscosity, however, increased exponentially by increasing aggregate volume. UHPC mixtures showed autogenous shrinkage up to 1100 µε, and drying shrinkage up to 3000 µε at early-age (≤ 24h). These values were much higher than the values measured at long-term. Increasing the aggregate volume not only reduced shrinkage strain, but also decelerated it at very-early ages. Mechanical properties could be enhanced up to aggregate volume of 55%.

### Conclusion:

Aggregate volume is the key property which determines rheological and shrinkage behavior of UHPC. It can be said that there is a huge cracking risk related to early-age shrinkage and increasing the aggregate volume can be a solution. However, optimum volume should be selected considering rheological and mechanical requirements. Necessary precautions against shrinkage cracking should be taken as of casting stage, particularly under arid conditions.



## Agrega hacminin ultra yüksek performanslı betonun büzülme, reolojik ve mekanik özelliklerine etkisi

Çağlar Yalçinkaya<sup>1,2\*</sup>, Burak Felekoğlu<sup>1</sup>, Halit Yazıcı<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, 35160, Türkiye

<sup>2</sup>Delft Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği ve Yerbilimleri Fakültesi, 3Md, Delft, 2628 CN, Hollanda

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Ultra yüksek performanslı betonun reolojik davranışı
- Erken yaş bünyesel büzülmenin ve kuruma büzülmesinin ölçülmesi
- Agrega hacminin erken yaşta ve uzun dönemde büzülme etkisi

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 30.07.2018  
Kabul: 22.03.2020

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.449285

#### Anahtar Kelimeler:

Ultra yüksek performanslı beton,  
kuvars agregası,  
erken yaş büzülme,  
reolojik özellikler

#### ÖZET

Reoloji ve büzülme, başarılı bir yerleştirme işlemi gerçekleştirmek ve dayanıklı bir ultra yüksek performanslı beton (UYPB) üretmek için kontrol altında tutulması gereken anahtar özelliklerdir. Yakın gelecekte UYPB'nin yerinde döküm uygulamalarının artması beklenmektedir ve bu yüzden erken yaş özellikleri konusundaki araştırmalar önem kazanmıştır. Ancak hala istenen performansı garanti edebilen standartlaşmış bir karışım tasarımı yöntemi bulunmamaktadır. Yüksek miktardaki çimento içeriği ve düşük su/bağlayıcı oranı, özellikle erken yaşta çatlak riskini yükselten büzülme değerlerini arttırmaktadır. Karışım oranlarının, reolojik davranışı ve büzülme özelliklerini tayin eden temel değişkeni agrega hacmi dolayısıyla da hamur hacmidir. Deneysel çalışma kapsamında kuvars agregası hacminin UYPB'nin reolojik, büzülme ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, agrega hacminin arttırılmasının psödoplastik davranışın belirginleşmesine sebep olduğunu göstermiştir. Kendiliğinden yerleşen bir UYPB üretebilmek için agrega hacmi üst değeri %45 olarak bulunmuştur. Gerek bünyesel büzülme gerekse kuruma büzülmesi, agrega hacminin arttırılmasıyla sınırlandırılabilir. Erken yaş bünyesel büzülme ve kuruma büzülmesi, kalıp alımından sonra 90 gün boyunca ölçülen uzun dönemli büzülme katbekat fazladır. Bu sebeple gerekli önlemler döküm aşamasından itibaren alınmalıdır

## Influence of aggregate volume on the shrinkage, rheological and mechanical properties of ultra-high performance concrete

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

- Rheological behaviour of ultra-high performance concrete
- Measurement of early-age autogenous and drying shrinkage
- Effect of aggregate volume on shrinkage at early-age and long term

#### Article Info

Research Article  
Received: 30.07.2018  
Accepted: 22.03.2020

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.449285

#### Keywords:

Ultra-high performance concrete,  
quartz aggregate,  
early-age shrinkage,  
rheological properties

#### ABSTRACT

Rheology and shrinkage are the key features that should be controlled to perform a successful casting process and obtain a durable ultra-high performance concrete (UHPC). It is anticipated that cast-in-situ applications of UHPC will increase in the near future, so the studies on early-age properties of UHPC have come into prominence. However, there is still no standardized method for mix design of UHPC that can ensure the desired performance. High amount of cement and low water/binder ratio increase the shrinkage values, which also increase the crack formation risk especially at early-age. The basic variable of mix proportions that determines the rheological and shrinkage properties is aggregate volume and accordingly paste volume. In the scope of this experimental study, influence of volume fraction of quartz aggregate on rheological, shrinkage, and mechanical properties of UHPC was investigated. The results showed increasing the aggregate volume led to sharpen pseudoplastic behaviour of UHPC. To be able to produce a self-compacting UHPC, upper limit of aggregate volume was found 45%. Both autogenous and drying shrinkage can be limited by increasing the aggregate volume. Early-age autogenous and drying shrinkage are far more than the shrinkage measured after demoulding during 90 days. Necessary precautions, thus, should be taken as of casting stage.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: \*caglar.yalcinkaya@deu.edu.tr, burak.felegoglu@deu.edu.tr, halit.yazici@deu.edu.tr /

Tel: +90 232 301 7042

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ultra yüksek performanslı beton (UYPB), akışkanlaştırıcı teknolojisindeki hızlı gelişmeler sayesinde üretilebilmiş çimento esaslı bir kompozittir. Basınç dayanımları 150 MPa'yı aşabilen, uzun süreli ve ısıl küllerle daha da yüksek dayanıma çikilabilen çimento esaslı bu malzemelerin en büyük sorunlarından birisi büzülmedir. Metreküpte 1000 kg'a ulaşan bağlayıcı madde içeriği, büyük oranda ince agregadan teşkil edilmesi ve çok düşük (<0,25) su/bağlayıcı oranı mukavemetleri ve geçirimsizliği arttırırken büzülme kaynaklı çatlak riskini de arttırmaktadır.

Min vd. [1] yüksek dayanımlı betonlarda büzülme çatlaklarının donatı korozyonuna sebep olabileceğini, dolayısıyla bu tür betonlarda erken yaş koşullarının büzülme etkisinin araştırılması gerektiğini belirtmiştir. Erten vd. [2] UYPB'de kuruma koşulları altında oluşan erken yaş büzülme çatlaklarının donatı korozyonuna etkisini araştırmış ve çarpıcı sonuçlara ulaşmıştır. Dökümden sonraki ilk 24 saatlik erken yaş olarak tanımlanan zaman diliminde ideal koşullarda kuruma ortamından kaçınılması için kür edilen UYPB karışımlarının betonarme donatısını korumada mükemmel performans sergilediği görülmüştür. Aynı karışımlar kuruma ortamında kısıtlanmış halde beklediğinde büzülme çatlakları gelişmiş ve bu çatlaklar sebebiyle donatıyı koruma etkinliği önemli oranda azalarak korozyon oluşumu gözlenmiştir. Çalışmada serbest büzülme değerini azaltan uçucu kül ikamesinin ve çatlak açıklıklarını sınırlayan mikro çelik lif takviyesinin büzülme çatlakları kaynaklı donatı korozyonunu azaltmada etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca çelik lifler ile kompozitin darbe dayanıklılığı [3], betonarme döşemelerin zımbalama dayanımı ve kirişlerin eğilme kapasitesi [4, 5] geliştirilebilmektedir. UYPB'de matris dayanımını ve lif – matris aderans özelliklerini geliştirmek için silis dumanı katkısı yüksek oranda kullanılmaktadır. Yüksek oranda silis dumanı kullanımının reolojik özellikleri olumsuz etkileyerek işlenebilirliği düşürdüğü bilinmektedir [6].

UYPB'nin ve yüksek dayanımlı betonların agregası fazı üzerinde yürütülen çalışmalar genellikle mekanik özellikler üzerine yoğunlaşmaktadır. Aydın vd. [7] tarafından gerçekleştirilen çalışmada farklı agregalar kullanılarak

(kuvars, boksit, kireçtaşı, bazalt, granit, korund) UYPB'ler üretilmiş ve agregası türünün mekanik özelliklere önemli etkileri olduğu ortaya konmuştur. Kireçtaşı agregası ile de UYPB sınıfında kompozitler üretilebileceği fakat 400 MPa gibi çok yüksek dayanımlara ancak boksit gibi daha özel agregalarla ve priz aşamasında basınç altında sıkıştırma uygulanmasıyla ulaşılabileceği gözlenmiştir. UYPB'nin agregası fazı üzerine yürütülen diğer araştırma konularından biri de iri agregası ikamesinin mekanik özelliklere etkisidir. UYPB'de toz boyuttaki agregaya 8 mm iri kuvars agregası ikamesi sonucu basınç dayanımı performansının azalmadığı, donatı-beton aderansının arttığı belirlenmiştir (Collepari vd. [8]). Diğer bir çalışmada ise 150 MPa basınç dayanımına sahip yüksek akıcılıkta bir karışımın iri agregası kullanımıyla üretilebildiği gösterilmiştir (Yang vd., [9]). Büzülme kaynaklı çatlama riski yüksek olan UYPB'lerin karışım oranlarının belirlenmesi noktasında geleneksel beton kadar bilgi birikimi ve standartlaşma mevcut değildir. UYPB'nin gelecekte yerinde dökümüne yönelik olarak işlenebilirliğinin geliştirilmesi ve büzülme miktarlarının kısıtlanması üzerine daha fazla araştırma gerekmektedir. UYPB'nin büzülmesini etkileyen en önemli faktör agregası hacmi dolayısıyla da hamur hacmidir. Bu çalışma kapsamında UYPB'de en sık kullanılan agregası türü olan kuvars agregası hacminin lif takviyesi yapılmamış UYPB'nin erken yaş ve uzun dönemli büzülme davranışına, reolojik parametrelerine ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Malzemelerin Özellikleri (Properties of Materials)

Çalışmada CEM I 42,5 R türü Denizli Çimento ürünü çimento kullanılmıştır. Çimentonun yoğunluğu 3,12 g/cm<sup>3</sup>tür. Silis dumanı, BASF firmasının tedarik ettiği Meyco MS610 ticari isimli üründür. Silis dumanının yoğunluğu 2,2 g/cm<sup>3</sup>tür. Çimentonun ve silis dumanının üreticileri tarafından verilen fiziksel ve kimyasal özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmaktadır. Akışkanlaştırıcı olarak BASF firmasının geliştirdiği Glenium ACE 30 kullanılmıştır. Agregası hacminin etkisinin bağımsız olarak tespiti açısından lif takviyesi uygulanmamıştır.

**Tablo 1.** Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri (Physical and chemical properties of cement)

Kimyasal özellikler		Fiziksel özellikler	
SiO <sub>2</sub> (%)	19,1	Özgül yüzey (Blaine) (m <sup>2</sup> /kg)	369
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,40	Priz başlangıcı (min)	110
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,96	Priz sona ermesi (min)	166
CaO (%)	61,85	Hacim Genleşmesi (mm)	1,00
MgO (%)	2,05		
Na <sub>2</sub> O (%)	0,27		
K <sub>2</sub> O (%)	0,70		
SO <sub>3</sub> (%)	3,72		
Cl <sup>-</sup> (%)	0,0004		
Kızdırma kaybı (%)	1,82		
		<b>Basınç Dayanımı</b>	
		2 gün (MPa)	27,1
		7 gün (MPa)	43,3
		28 gün (MPa)	56,0

**Tablo 2.** Silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri  
(Physical and chemical properties of silica fume)

Kimyasal Kompozisyon (%)	Silis Dumanı
SiO <sub>2</sub>	92,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,89
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,97
CaO	0,49
MgO	0,96
Na <sub>2</sub> O	0,42
K <sub>2</sub> O	1,31
SO <sub>3</sub>	0,33
Cl <sup>-</sup>	0,09
Fiziksel Özellikler	
Özgül yüzey (m <sup>2</sup> /kg)	≈20000
Dayanım aktivite indeksi, ASTM C-311 (28 gün), (%)	95

Çalışmada Pomza Export firmasından temin edilen, İzmir yöresine ait, 0 – 0,4 mm, 0,5 – 1 mm, ve 1 – 3 mm olmak üzere üç boyut aralığında kuvars agregası kullanılmıştır. Agregaların üretici firmadan temin edilen kimyasal kompozisyonu Tablo 3'te, DEÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda TS EN 933-1 [10] standardına göre belirlenen elek analizleri Tablo 4'te sunulmaktadır. TS EN 1097-6 [11] standardına göre agreganın tüm boyutları için yoğunluğun 2,65 g/cm<sup>3</sup>, su emmenin %0,12 olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 3.** Kuvars agregalarının kimyasal kompozisyonu  
(Chemical composition of quartz aggregates)

Kimyasal Kompozisyon	(%)
SiO <sub>2</sub>	99,79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02
CaO	0,02
MgO	0,01
Na <sub>2</sub> O	0,02
K <sub>2</sub> O	0,01
SO <sub>3</sub>	-
Cl <sup>-</sup>	-

**Tablo 4.** Kuvars agregalarının elek analizi  
(Sieve analysis of quartz aggregates)

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)		
	0 – 0,4 mm	0,5 – 1 mm	1 – 3 mm
8	100	100	100
4	100	100	100
2	100	100	53
1	100	74	0
0,500	100	0	0
0,250	76,0	0	0
0,125	8,4	0	0
0,090	5,9	0	0
0,075	4,0	0	0
0,063	2,1	0	0
0,053	1,7	0	0

## 2.2. Agregata Tane Boyut Dağılımının Belirlenmesi (Determination of Aggregate Gradation)

Çalışmanın ilk aşaması, maksimum tane boyutu 3 mm olacak şekilde farklı boyuttaki kuvars agregalarının karıştırma oranlarının, maksimum paketlenme (sıkışma) faktörüne yaklaşacak şekilde bulunmasıdır. Maksimum sıkışmayı veren agregata tane boyut dağılımı, TS EN 1097-3 [12] standardında tarif edilen 1 litrelik silindirik hacimde çeşitli yerleştirme prosedürleri altında gerçekleştirilen birim hacim ağırlık (BHA) deneyleri ile tayin edilmiştir. Gevşek BHA değerlerinin yanı sıra sıkışık BHA değerleri, UYPB'nin laboratuvar koşullarında kalıba yerleştirilmesinde kullanılan vibrasyon sehpa ve şiş aparatı vasıtasıyla tespit edilmiştir. Kuvars agregaları, yığılı temsil edecek örnekleme ile alınmıştır. Agregalar kuru halde deneyler yapılmış, karışımlar V-şekilli karıştırıcıda hazırlanmıştır. Sıkıştırma işlemi yalnızca şişleme için üç kademede 25 adet, şiş+vibrasyon için ise üç kademede titreşen sehpa üzerinde 10 saniye boyunca 25 şişleme şeklinde uygulanmıştır. Her bir BHA deneyi 6 kez tekrarlanmış, bu değerlerin ortalaması kullanılmıştır.

Çalışmada agregata hacmi araştırmasına konu olacak karışımın granülometrisi Jacobsen ve Arntsen [13] tarafından önerilen yaklaşımla tespit edilmiştir. Paketlenme faktörü, C, agregata yığınının bir hacmi doldurma oranıdır. Agregalar arasında kalan boşluk ise bu durumda (1-C) olmaktadır. Paketlenme faktörü, agregata birim hacim ağırlığının agregata yoğunluğuna oranıdır. Agregaların boşluksuz olarak doldurduğu teorik bir hacimde birim hacim ağırlık, agregata yoğunluğuna eşit, yani paketlenme faktörü "1" olacaktır [13]. Agregaların boyut dağılımı, geometrik yapısı, pürüzlülüğü gibi birçok faktör birim hacim ağırlığı etkilemektedir. Temas halindeki büyük kürelerin arasına daha ufak küreleri yerleştirme prensibine dayanarak maksimum BHA hedeflenmektedir. Çalışmada kullanılan kuvars agregaları küre şeklinden uzak, köşeli geometrideki kırma agregalardır. Bu nedenle agregata fazının deneysel olarak belirlenmesi, maksimum dayanıma ulaşmak açısından daha uygundur. Kuvars agregalarından en ince olanı (0 – 0,4 mm), bir üst boyut aralığına sahip olanıyla (0,5 – 1 mm) çeşitli oranlarda karıştırılmış, gevşek – şişleme – vibrasyon – şişleme + vibrasyon uygulamaları ile en yüksek paketlenme faktörünü veren karışım araştırılmıştır. En yüksek paketlenme faktörünü veren karışım (0 – 1 mm) bir üst agregata boyutu (1 – 3 mm) ile aynı sistemde karıştırılmıştır. Sonuçta üç farklı boyut aralığının kullanılması ile en yüksek paketlenmenin elde edildiği nihai tane boyut dağılımı (0 – 3 mm) saptanmıştır.

## 2.3. Agregata Hacminin Etkilerinin Araştırılması (Investigation of the Effects of Aggregate Volume)

BHA deneylerinde maksimum paketlenme faktörünü veren agregata karışımı, %35, %45, %55 ve %65 hacim oranları ile referans hamur'a (AG-0) eklenerek taranmıştır. Referans hamurunun karışım oranları Tablo 5'te sunulmaktadır. Hava hacmi teorik olarak %2 alınmıştır. Silis dumanı çimento ağırlığının %20'si oranında ikame edilmiştir. Karışımın

su/bağlayıcı oranı 0,20 olarak seçilmiştir. Ön deneylerde UYPB hamur fazının mini çökme-yayıma çapının 40 cm olması durumunda arzu edilen işlenebilirlikte UYPB üretiminin mümkün olduğu saptanmış, akışkanlaştırıcı oranı ( $\approx$  % 3) bu yayılma çapı hedefine göre belirlenmiştir.

**Tablo 5.** Referans hamurunun karışım oranları  
(Mix proportions of reference paste)

Bileşen (kg/m <sup>3</sup> )	Hamur Fazı (AG-0)
Su	340
Çimento	1359
Silis Dumani	340
Akışkanlaştırıcı	50
<b>Tasarım Özellikleri</b>	
Su / Bağlayıcı	0,20
Su / Çimento	0,25
Akışkanlaştırıcı/Bağlayıcı (%)	3
Çökme-yayıma çapı (cm)	40±1

#### 2.4. Taze Karışımın Hazırlanması (Preparation of Fresh Mixture)

Karışımların hazırlanmasında yüksek devirde dönebilen, güçlendirilmiş bir Hobart mikser kullanılmıştır. Bağlayıcı maddeler, karışım suyunun 3/4'ü ve akışkanlaştırıcının 1/4'ü ile ıslatılmıştır. Akıcı hamur elde edildikten sonra agregalar ve kalan su+katkı hamura eklenerek hızlı karıştırma safhasına geçilmiştir. Çok yüksek ince malzeme içeriğine sahip olan UYPB'de katkının etkinliğinin tam olarak sağlanması ve toz malzemenin homojen dağılması için toplam 10 dakikalık bir karıştırma prosedürü uygulanmıştır. Kendiliğinden yerleşen karışımlar vibrasyon ve sıkıştırma uygulanmaksızın, plastik veya kuru kıvamdaki (sıkıştırma enerjisine ihtiyaç duyulan) karışımlar ise vibrasyon ve şişleme işlemleriyle kalıplarına yerleştirilmiştir. UYPB karışımları plastik veya kuru kıvamda olduğunda yerleştirme işçiliğinin kalitesi, yüksek viskoziteleri ve yapışkanlıkları sebebiyle kritik hale gelmektedir.

#### 2.5. Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi (Determination of Rheological Properties)

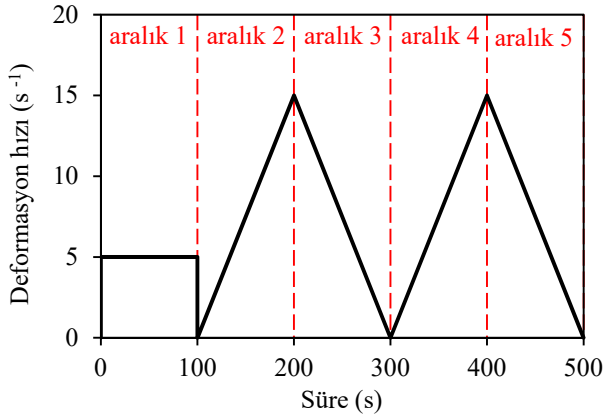
Kendiliğinden yayılan taze karışımlarda çökme-yayıma çapı tespit edilmiştir. European Federation of National Associations Representing for Concrete (EFNARC) tarafından önerilen, alt taban iç çapı 10 cm olan kesik mini koni kullanılmıştır [14]. Eşik kayma gerilmesi (EKG) ve anlık viskozitelerin belirlenmesi için Anton Paar firmasının Pysica MCR 51 serisi reometresi kullanılmıştır (Şekil 1). Reometre sistemi farklı ölçüm sistemlerinin monte edilebildiği bir ölçüm başlığı, bilgisayar, rheoplus yazılımı ve su banyosundan oluşmaktadır. Ölçüm sistemi olarak bilyeli ölçüm düzeneğinden yararlanılmıştır. 8 mm çaplı çelik bilye eksantrik bir kol vasıtasıyla numune içinde döndürülmektedir. Bilyenin sürüklenme direnci, taze karışım içinde farklı dönme hızlarında ölçülmüştür. Moment ve hız değerleri kullanılarak reometre yazılımı vasıtasıyla dönüşümler yapılmakta, deformasyon hızı ( $\dot{\gamma}$ ) ve kayma gerilmesi ( $\tau$ ) verileri elde edilmektedir. Dönüşüm katsayıları yaklaşımı; deformasyon hızı ( $\dot{\gamma}$ ) ile bilyenin dönüş hızı arasında doğrusal bir ilişki olduğu kabulüne dayanır. Kayma gerilmesi ( $\tau$ ) ile bilyenin etrafındaki akış nedeniyle maruz

kaldığı moment diğer bir deyişle sürüklenme direnci arasında da doğrusal bir ilişki olduğu prensibi kullanılır. Newtonyen olmayan veya eşik kayma gerilmeli sıvılar için dönüşüm katsayıları tanımlanmıştır (Schatzmann vd. [15]). Böylece akma eğrileri elde edilebilmekte, reolojik parametreler (EKG, viskozite) ölçülebilmektedir. Ölçüm sisteminin çalışma prensibi hakkında detaylı bilgi Schatzmann vd. [15] tarafından gerçekleştirilen çalışmada mevcuttur.

Reometre haznesinin sıcaklığı termal banyo ile  $20\pm 1^\circ\text{C}$ 'de sabitlenmiştir. Hazırlanan taze karışım, Hobart mikser durdurulduktan hemen sonra reometre haznesine boşaltılmıştır. Karışım ile dolu hazne reometreye yerleştirilmiş ve deney başlatılmıştır. Reometrede Şekil 2'de gösterilen deformasyon hızı aralıkları kullanılmıştır.  $15\text{ s}^{-1}$  deformasyon hızı değerinden sonra çoğu karışımın anlık viskozite değerinin çok fazla değişmediği ve viskozite eğrisinin neredeyse yataylaştığı saptanmıştır. Bu sebeple maksimum  $15\text{ s}^{-1}$  deformasyon hızı uygulanmıştır. Aralık 1'de uygulanan  $5\text{ s}^{-1}$  değerindeki sabit deformasyon hızının uygulanması ile karışımların hazırlanmasından deneyin başlatılmasına kadar geçen süreçte oluşan reolojik geçmiş farklılıklarının giderilmesi planlanmıştır. Bu süreçte kayıt alınmamıştır. Aralık 2'de 0'dan  $15\text{ s}^{-1}$  değerine artan, aralık 3'te ise  $15\text{ s}^{-1}$  değerinden 0'a azalan bir deformasyon hızı uygulanmıştır. Aralık 4 ve aralık 5'te bu süreçler tekrarlanmıştır. Cihaz tarafından 100 s süren her bir aralıkta 5s'de bir olmak üzere 20 veri kaydedilmiştir. Cihaz tarafından ölçülen dönme hızı ve moment değerleri, rheoplus yazılımında tanımlanmış ampirik katsayılar vasıtasıyla deformasyon hızı ve kayma gerilmesi değerlerine dönüştürülmüştür. Bu değerler incelendiğinde aralık 5 ve aralık 6 arasında histerezis alanının kaybolduğu, iniş ve çıkış eğrilerinin örtüştüğü saptanmıştır. Bu sebeple deformasyon hızı - kayma gerilmesi eğrilerinin (akma eğrilerinin) çizilmesinde aralık 5'ten elde edilen ham veriler kullanılmıştır. Akma eğrilerinin elde edilmesinde Herschel-Bulkley modeli kullanılmıştır. Model yardımıyla çizilen eğrinin kayma gerilmesi eksenini kestiği noktada dinamik eşik kayma gerilmesi (EKG), deformasyon hızının artmasıyla azalan anlık viskozitenin  $15\text{ s}^{-1}$ 'lik maksimum deformasyon hızında ulaştığı değer ise nihai viskozite olarak isimlendirilmiştir. Karışımların EKG ve nihai viskozite değerleri reolojik parametreler olarak kıyaslanmıştır.



**Şekil 1.** Karışımların reometre kullanılarak test edilmesi  
(Testing of the mixtures by using rheometer)



**Şekil 2.** Reometrede uygulanan deformasyon hızı geçmişi (Shear rate history applied on rheometer)

### 2.6. Büzülmenin ve Priz Sürelerinin Ölçümü (Measurement of Shrinkage and Setting Times)

Erken yaş büzülme ölçümü yapılacak ortam sıcaklığındaki priz sürelerinin tespit edilebilmesi için sıcaklık kontrollü su banyosu içinde Vicat deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). İğne ucunun kalıp tabanından 4 mm uzaklıkta olması halinde priz başlangıcı, iğne 2,5 mm battığı zaman ise priz sonu olarak not edilmiştir (TS EN 480-2 [16]). Çok düşük S/Ç oranlı yüksek akışkanlaştırıcı dozajı içeren karışımların yüzeyi, ortam koşullarına açık olduğunda "fil derisi" olarak tabir edilen sert bir kabuk tutmaktadır ve numunenin kabuk altı kısmı akıcı kıvamda da olsa ölçümler alınamamaktadır. Bu kabuk, yüksek oranda akışkanlaştırıcı katkı içeren karışımların yüzeyinde gelişen erken hidrasyon ürünlerini barındırmaktadır ve kuruma ortamında oluşmaktadır (Wetzel, vd. [17]). Bu sebeple Vicat numunesinin yüzeyinin kurumaya maruz kalmaması için dökümün hemen ardından su seviyesinin üst kısmına parafin yağı eklenerek kurumadan koruyucu bir tabaka oluşturulmuştur. Bu işlem uygulanmaz ise birkaç dakika içinde yüzey kabuklaşmaktadır ve priz süresi hatalı şekilde çok kısa ölçülmektedir.

UYPB karışımlarının agrega, dolayısıyla hamur hacminin büzülme davranışına etkisini araştırırken iki tür büzülme çalışılmıştır; bünyesel büzülme ve kuruma büzülmesi. Bünyesel büzülme  $20\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\%98\pm 2$  bağıl nem (BN) koşulunda dış ortamdan yalıtılmış numuneler üzerinde araştırılırken, kuruma büzülmesi  $30\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\%50\pm 2$  BN koşulunda dış ortama açık numunelerde araştırılmıştır.  $20\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\%98\pm 2$  BN ortamı ideal kür koşulu,  $30\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\%50\pm 2$  BN ise elverişsiz ortam olarak nitelendirilebilir. Büzülme, zamana bağlı olarak iki farklı koşulda incelenmiştir; erken yaş ( $\leq 24$  h) ve uzun dönem ( $> 24$  h).

Ölçüm koşulları Tablo 6'da sunulmaktadır. Erken yaş ölçümlerinde  $25\times 25\times 290$  mm<sup>3</sup> numunelerde lazer sensörlerle temassız olarak ölçüm yapılabilen iklimlendirilmiş bir düzenek kullanılmıştır. Uzun dönemde ise iklim kabininde bekletilen  $25\times 25\times 285$  mm<sup>3</sup> numunelerde ASTM C-157 [18]'ye göre mekanik komparatör vasıtasıyla ölçüm alınmıştır. Erken yaş kuruma büzülmesi ölçümlerinde kalıp perdah yüzeyi kuruma ortamına açıktır. Uzun dönemli kuruma büzülmesi ölçümlerinde ise ilk gün (24 saat)  $20\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\%98\pm 2$  BN ortamında yalıtılmış olarak tutulan numuneler 24. saatin sonunda çıplak halde iklimlendirme kabinine konularak ölçümler 90 gün boyunca takip edilmiştir. Diğer bir ifadeyle kuruma büzülmesi ölçümleri, erken yaşta gerçekleşen kuruma büzülmesi miktarı ile uzun dönemde gerçekleşen kuruma büzülmesi miktarını kıyaslamayı, erken yaşın kür anlamında önemini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bünyesel büzülme numuneleri ise dış ortamdan erken yaşta naylon örtü, uzun dönemde alüminyum folyo bant kaplaması yardımıyla yalıtılarak ilgili yaşa bağlı ölçüm yöntemiyle takip edilmiştir. Bünyesel büzülme ölçümlerinde lazer sensörler vasıtasıyla alınan erken yaş ölçümleri ile komparatör yardımıyla alınan uzun dönemli ölçümler toplanarak toplam bünyesel büzülme elde edilmiştir (Şekil 4).



**Şekil 3.** Sıcaklık kontrollü Vicat aleti (Temperature controlled Vicat apparatus)

Erken yaş büzülme davranışının tespitine yönelik her bir karışım ve sıcaklık için 5 adet  $25\times 25\times 290$  mm<sup>3</sup>, iç yüzeyleri polyester film ile kaplı prizma kalıp kullanılmıştır (Şekil 5). Kalıpların bir yüzünde ankastrelik pimi vardır. Böylelikle toplam büzülmenin tek bir uçtan okunması sağlanmaktadır. Serbest ucun bulunduğu yüzeye bakan lazer sensörler, kalıp altındaki delikten ışın göndermektedir. Işının numune altına

**Tablo 6.** Büzülme ölçümlerinin detayları (Details of shrinkage measurements)

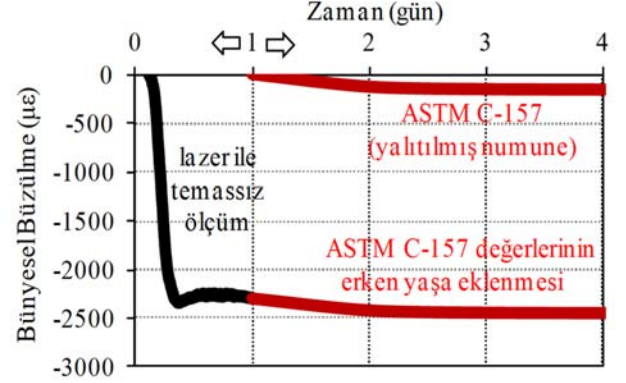
Büzülme Türü	Ortam Koşulları	Ölçüm Türü	Ölçüm Sistemi	Numune Durumu
Bünyesel büzülme	$20^\circ\text{C}$ , $\%98$ BN	Erken yaş	Lazer sensör	Yalıtılmış
		Uzun dönem	Komparatör	Yalıtılmış
Kuruma büzülmesi	$30^\circ\text{C}$ , $\%50$ BN	Erken yaş	Lazer sensör	Kalıp üst yüzeyi açık
		Uzun dönem	Komparatör	Tüm yüzeyler açık

çarparak sensöre geri yansıdığı noktadan yola çıkarak şekil değişimini kaydedilmektedir. Kalıp alınındaki delik, priz başlangıcına kadar ince bir polyester levha ile kapalıdır. Kalıplar doldurulduktan hemen sonra ilgili iklim koşulunun oluşturulduğu erken yaş büzülme kabineye yerleştirilmiştir. Kalıpların yüzey durumları ölçüm koşuluna bağlı olarak Tablo 6'da belirtildiği gibidir. Priz başlangıcı anında (betonun kendi ağırlığı altında deforme olmadığı ilk an) polyester levha kaldırılmış ve ölçüm başlatılmıştır. Priz başlangıcından karışımlara su katılmasından sonra geçen 24. saate kadar dakikada bir ölçüm alınarak veri toplayıcı tarafından bilgisayara kayıt yapılmıştır. Pleksiglas kabinde nem sensörü, sıcaklık sensörü, 5 adet ampul, soğuk buhar makinesine bağlanan hortum ve nem atıcı fan bulunmaktadır. Tüm bu aparatlar kontrol ünitesine girilen sıcaklık ve nem değerlerini sağlamak için senkronize çalışmaktadır. Çalışmada kullanılan erken yaş büzülme deney düzeneği Şekil 6'da resmedilmiştir.

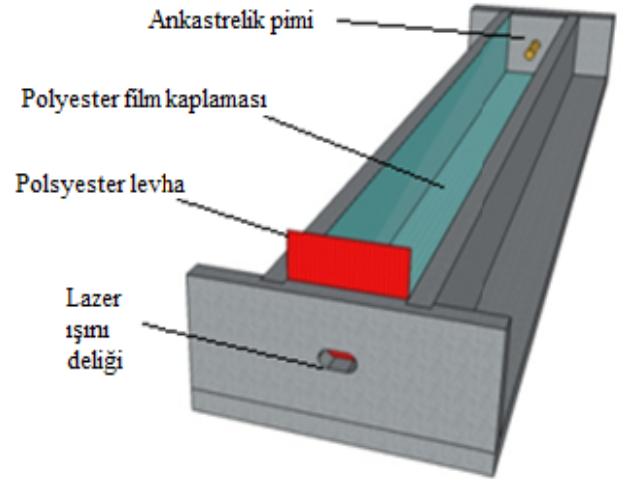
### 2.7. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi (Determination of Mechanical Properties)

Mekanik özelliklerin belirlenmesinde standart su kürü, buhar kürü ve otoklav kürü olmak üzere üç farklı kür yöntemi uygulanmıştır. 40×40×160 mm ebatında prizmatik numunelere 12 saat 100°C buhar kürü, 28 gün standart su kürü ve 8 saat 2 MPa basınç altında (210°C) otoklav kürü uygulanmıştır. Numuneler döküm sonrası, kalıbıyla birlikte buhar kürü kabineye konulmuştur. Buhar kürü kabinde 6 saat 20±2°C neme doymun ortamda bekleme sonrası cihaz otomatik olarak ısıtma sürecini başlatmıştır. 6 saat ısıtma ile 100°C'ye çıkılmış, 12 saat bu sıcaklıkta kürden sonra ısıtma durdurulmuş ve kapaklar otomatik olarak az miktarda aralanarak tedrici soğuma safhası başlamıştır. Otoklav kürü için hazırlanan numuneler 24 saat 20±2°C neme doymun ortamda tutulduktan sonra kalıplarından sökülüştür. 2,5 saatte 2 MPa basınç ve 210°C sıcaklığa ulaşan kabinde numuneler 8 saat boyunca kür edilmiştir. Tedrici soğuma sonrasında numuneler kabinden çıkarılmıştır. Eğilme dayanımlarının belirlenmesinde en az 3 adet 40×40×160 mm numune kullanılmıştır. Deneylerde 0,02 mm/min sehim

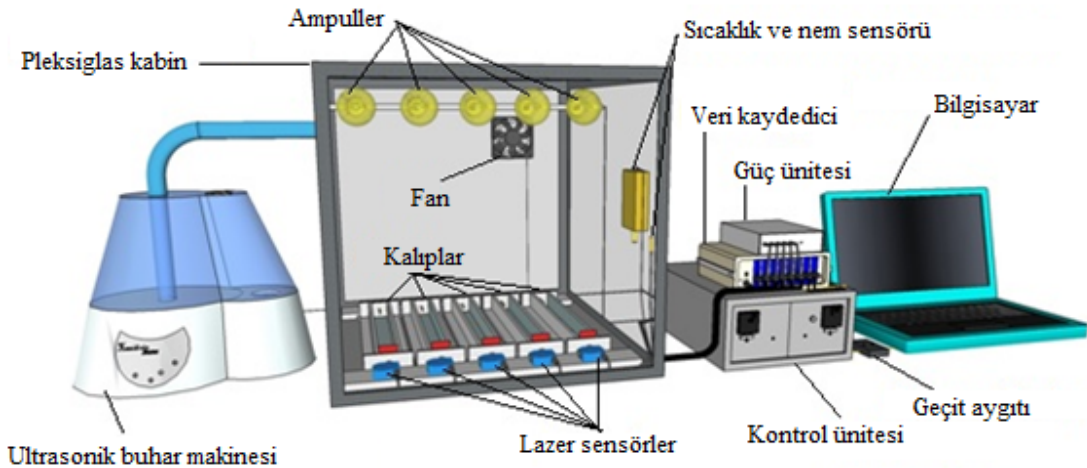
hızında yükleme yapılmıştır. Üç noktalı eğilme deneyinde kullanılan mesnet açıklığı 130 mm'dir. Eğilme sonrası çıkan parçalara 2400 N/s yükleme hızında basınç deneyi uygulanmıştır.



Şekil 4. Toplam bünyesel büzülmenin elde edilmesi  
(Obtaining total autogenous shrinkage)



Şekil 5. Temassız büzülme ölçümü için kalıp  
(Mould for contactless shrinkage measurement)



Şekil 6. Erken yaş büzülme deney düzeneği (Early-age shrinkage test setup)

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

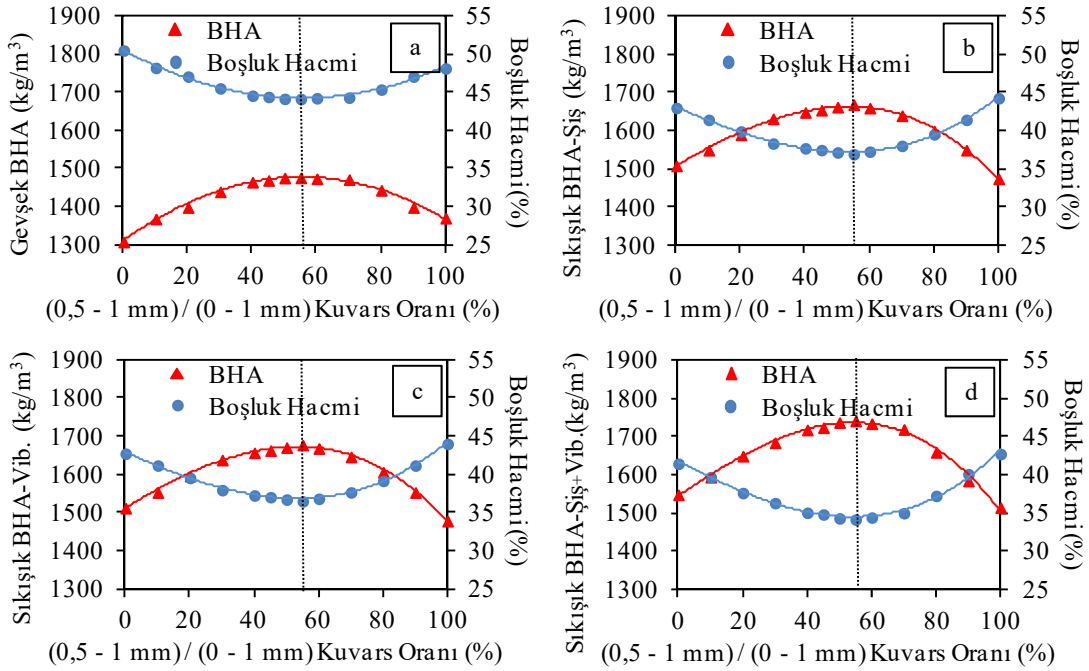
#### 3.1. Agregada Tane Boyut Dağılımının Birim Hacim Ağırlığa Etkisi (The Effect of Aggregate Gradation on Unit Weight)

Harç ve beton gibi çimento esaslı malzemelerin tasarımında agregada, hamur ve kimyasal katkı bileşenleri arzu edilen taze hal özelliklerine ve sertleşmiş halde beklenen performansa göre belirlenmektedir. UYPB agregada fazının oluşturulmasında ihtiyaç duyulan kıstaslardan biri maksimum dayanım için minimum boşluktur. Geleneksel betonlarda ekonomik tasarım için agregada tanelerinin hacim içerisinde maksimum kontak halinde olması, böylelikle minimum hamur hacmi gereksiniminin oluşturulması hedeflenmektedir. Ancak yüksek dayanımlı ve kendiliğinden yerleşen betonlarda gerek akıcılık gerekse yüksek dayanımlı hamur fazının özelliklerinden faydalanmak için minimum oranda hamur yeterli olmayabilmektedir.

Şekil 7'de 0 – 0,4 mm ve 0,5 – 1 mm boyut aralığındaki agregaların 4 tür yerleştirme prosedürüne göre bulunan BHA değerleri (birincil y-ekseni) ve boşluk hacimleri (ikincil y-ekseni) verilmektedir. Oluşan karışım 0 – 1 mm aralığındadır. Grafiklerde 0,5 – 1 mm / 0 – 1mm karışım oranına bağlı olarak değerler verilmektedir. Tüm yerleştirme prosedürlerinde en büyük sıklık yaklaşık %55 (0,5 – 1 mm) + %45 (0 – 0,4 mm) karışımında elde edilmiştir. Gevşek, şişlenmiş, vibre edilmiş (titreştirilmiş) ve vibre edilirken şişlenmiş karışımlar için paketlenme faktörü sırasıyla 0,56 – 0,63 – 0,635 – 0,66 olarak elde edilmiştir. Tek başına

vibrasyon işlemi sonucu tek başına şişleme ile elde edilen sıkışma değerinin arttırılamadığı söylenebilir. Bu durumun nedeni, agregaların vibrasyon sırasında boşlukları doldurmaya çalışırken diğer yandan sıçrayarak ilave boşluk yaratmasıdır. Vibrasyon sırasında şişleme, paketlenmeyi bir miktar arttırmıştır.

Şekil 8'de %55 (0,5 – 1 mm) + %45 (0 – 0,4 mm) karışımı ile elde edilen 0 – 1 mm karışımı ve 1 – 3 mm boyutundaki agreganın değişik oranlarda karıştırılmasıyla 4 tür yerleştirme prosedürüne göre bulunan BHA değerleri ve boşluk hacimleri verilmektedir. Oluşan karışım 0 – 3 mm aralığındadır. Grafiklerde 1 – 3 mm / 0 – 3 mm karışım oranına bağlı olarak değerler verilmektedir. Tüm yerleştirme prosedürlerinde en büyük sıklık %60 (0 – 1 mm) + %40 (1 – 3 mm) karışımında elde edilmiştir. Gevşek, şişlenmiş, vibre edilmiş ve vibre edilirken şişlenmiş karışımlar için paketlenme faktörü sırasıyla 0,60 – 0,65 – 0,66 – 0,68 olarak elde edilmiştir. 3 mm maksimum tane çapına çıkılması ile ortalama 0,02'lik bir paketlenme faktörü artışı sağlanmıştır. Maksimum tane çapı 3 mm olan üç boyut aralığındaki agregada karışımı için elde edilen maksimum paketleme faktörü 0,68'dir. Yani agregada yığındaki boşlukları teorik olarak doldurabilmek için minimum %32 hamur hacmine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu karışım oranında sıfır çökme (slump) beklenmektedir. Örneğin kendiliğinden yerleşen karışım olarak tasarlanıp, hiçbir sıkıştırma işlemi uygulanmadığı durumda gerekli hamur hacmi %40 (gevşek halde C=0,60) olmaktadır. Bahsedilen hamur gereksinimleri hamurların tam olarak boşlukları dolduracağı kabulüne dayanmaktadır. Hâlbuki hamurların reolojik özellikleri ve mikro tane dağılımı aslında bu değerlerin arttırılması ihtiyacını



Şekil 7. 0 – 0,4 mm ve 0,5 – 1 mm kuvars agregaları için gevşek (a) şişle sıkıştırılmış (b) vibrasyonla sıkıştırılmış (c) şiş ve vibrasyonla sıkıştırılmış (d) halde BHA ve boşluk yüzdesi (Unit weight and void percentage for 0 – 0,4 mm and 0,5 – 1 mm quartz aggregates in the state of loose (a) compaction by rodding (b) compaction by vibration (c) and compaction by rodding and vibration (d))

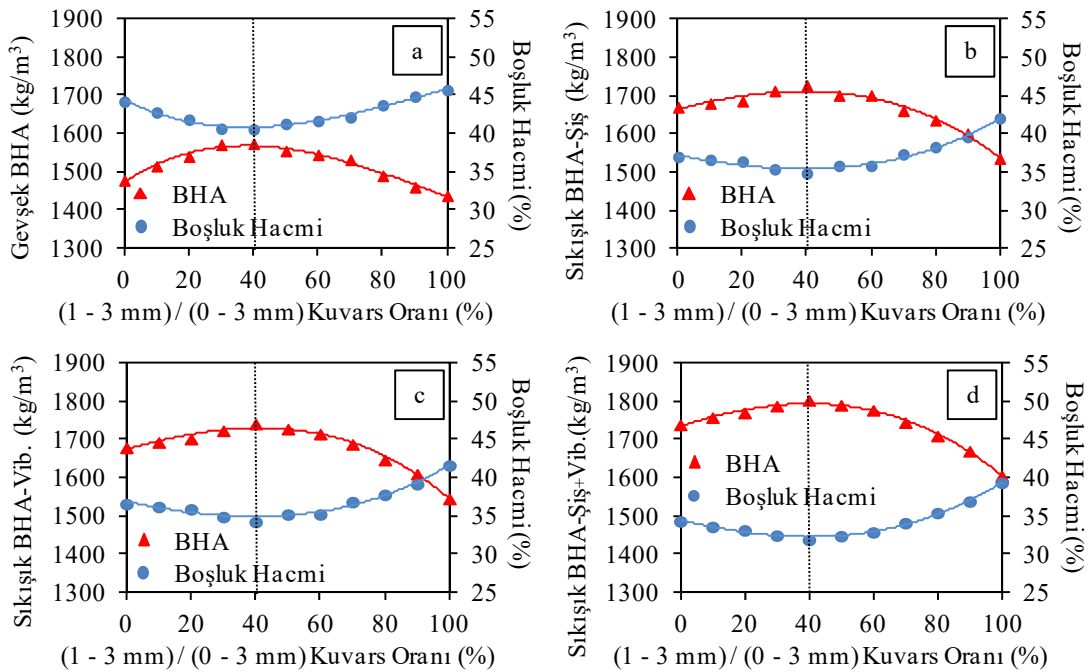


yaratmaktadır. Agregada kilitlenmesini aşmak için agregalar etrafında teorik olarak bir hamur kalınlığı gereklidir. UYPB hamurları çok kohezif hamurlar olduklarından agregalarla birlikte hava sürüklenme riskleri yüksektir. Ayrıca sürüklenen havanın dışarı atılması da zorlaşmaktadır. Bu sebeple kendiliğinden yerleşen UYPB üretilse bile sıkışık boşluklarını uzaklaştırmak ve imalatı hızlandırmak için yerleştirme enerjisi gerekebilir.

**3.2. Agregada Hacminin Reolojik Özelliklere Etkisi**  
(The Effect of Aggregate Volume on the Rheological Properties)

BHA deneylerinde maksimum paketlenme faktörlerini veren kuvars yığını %100'e uyarlanırsa %40 (1 – 3 mm) + %33 (0,5 – 1 mm) + %27 (0 – 0,4 mm) karışımından

oluşmaktadır. Bu karışım için gerekli minimum hamur hacmi şiş + vibrasyon için %32, kendiliğinden yerleşen formda dökümde boşlukları doldurmak için %40'dır. Ancak agregada kilitlenmesini aşmak için ekstradan bir hamur hacmine ihtiyaç duyulmaktadır. Gerekli bu teorik hamur hacmi (=100 – agregada hacmi), seçilen tane boyut dağılımındaki agregaların %35, %45, %55 ve %65 hacim oranlarında referans hamur (AG-0) kullanılarak taranmıştır. Kullanılan karışım oranları Tablo 7'de sunulmaktadır. Hava hacmi, hamur hacmine dahil edilmiştir (teorik olarak %2). Tablodaki karışım isimlendirmesinde "AG" agreganın kısaltması, AG'nin yanındaki sayı ise yüzdece hacmi ifade etmektedir. Çökme-yayıma testi sonrası agregalı UYPB karışımlarının görünümü Şekil 9'da, agregada ve hamur hacmine bağlı olarak yayılma çapları ise Şekil 10'da

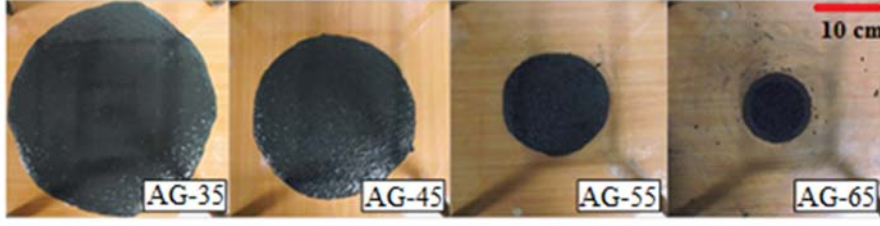


**Şekil 8.** 0 – 1 mm ve 1– 3 mm kuvars agregaları için gevşek (a) şişle sıkıştırılmış (b) vibrasyonla sıkıştırılmış (c) şiş ve vibrasyonla sıkıştırılmış (d) halde BHA ve boşluk yüzdesi

(Unit weight and void percentage for 0 – 0,4 mm ve 0,5 – 1 mm quartz aggregates in the state of loose (a) compaction by rodding (b) compaction by vibration (c) and compaction by rodding and vibration (d))

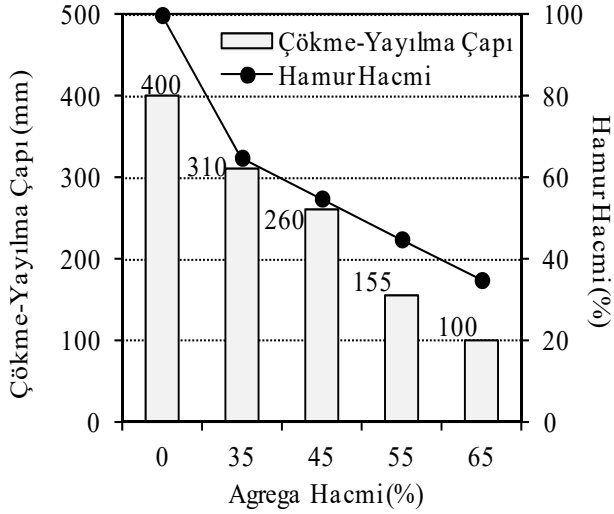
**Tablo 7.** Agregada hacmine bağlı olarak karışım oranları (Mix proportions depending on aggregate volume)

Bileşen (kg/m <sup>3</sup> )	AG-0	AG-35	AG-45	AG-55	AG-65
Su	340	214	182	145	110
Çimento	1359	858	729	580	443
Silis Dumanı	340	215	182	145	111
1 – 3 mm kuvars	0	383	481	596	701
0,5 – 1 mm kuvars	0	316	397	491	578
0 – 0,4 mm kuvars	0	258	324	401	472
Akışkanlaştırıcı	50	32	27	22	16
<b>Tasarım Özellikleri</b>					
Agregada hacmi (%)	0	35	45	55	65
Hamur hacmi (%)	100	65	55	45	35
Su / Bağlayıcı	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Su / Çimento	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Akışkanlaştırıcı / Bağlayıcı (%)	%3	%3	%3	%3	%3



Şekil 9. Agregre hacmine bağı olarak çökme-yayıma deneyi sonrası üstten görünüm  
(Top view after slump-flow test depending on aggregate volume)

verilmektedir. Karışımların stabilitesinin %45 agregre hacminden sonra arttığı görülmektedir. %65 agregre hacminde beklendiği üzere yayılma veya çökme oluşmamıştır. Karışımlar, %45 agregre hacmine kadar kendiliğinden yerleşen, %55 agregre hacminde basit bir yerleştirme işçiliği gerektiren, %65 agregre hacminde ise çok zor işlenen kıvamdadır. Kendiliğinden yerleşebilirlik için 1 – C değerinin (kendiliğinden yerleşebilirlik için gevşek halde boşluk oranı= 0,4) en az 1,375 katı hamur kullanılması gerekliliği görülmektedir. Yani gevşek halde boşluk hacmi %40 olan agregre karışımı ile UYPB üretiminde %55 hamur hacmi sağlanırsa (AG-45) kendiliğinden yerleşebilirlik sağlanabilmektedir. İşlenemez kıvamdaki %65 agregre değerinde sertleşmiş numune yüzeylerinin aşırı boşluklu yapıda olduğu gözlemlenmiştir.

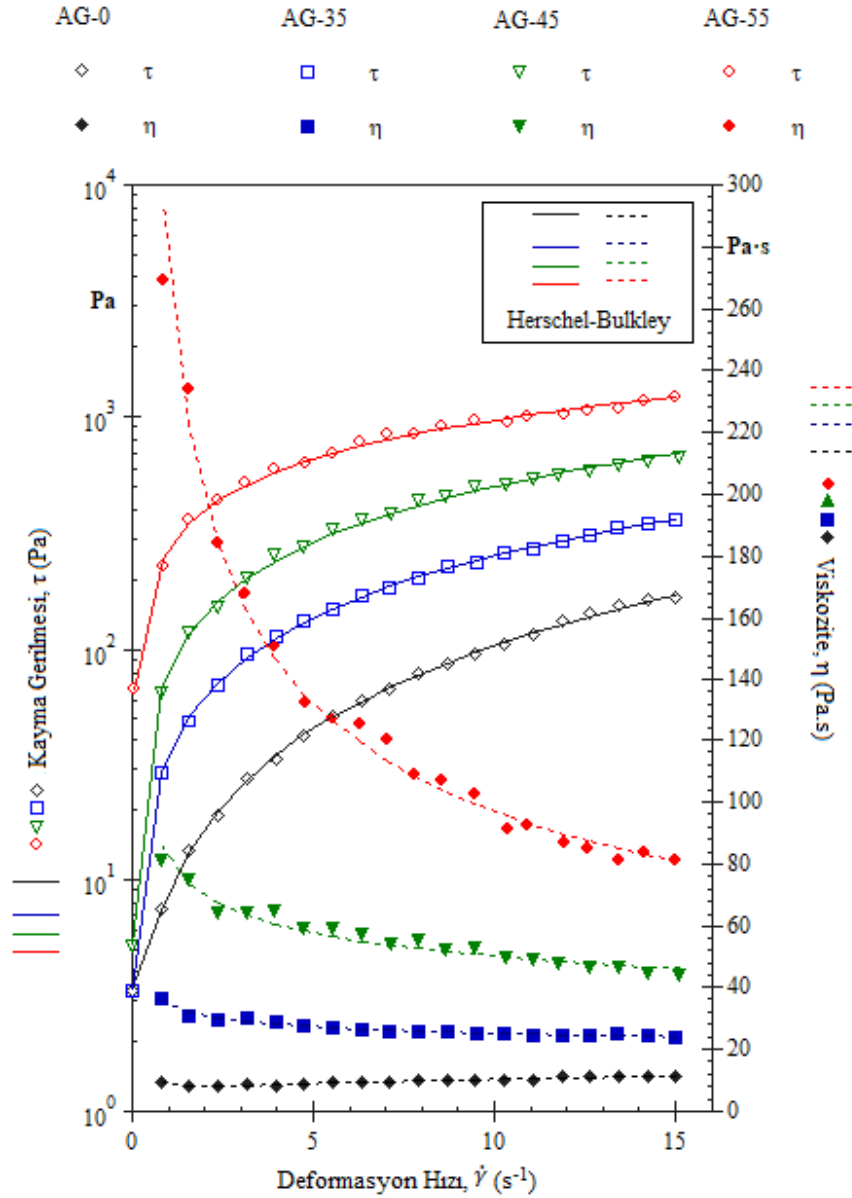


Şekil 10. Agregre hacmine bağı olarak çökme-yayıma çapı  
(Slump-flow diameter depending on aggregate volume)

Şekil 11'de agregre hacmine bağı olarak akma eğrileri verilmektedir. UYPB'nin reolojik davranışının Herschel-Bulkley modeli iyi bir şekilde temsil edildiği görülmektedir. Herschel-Bulkley modeli Eş. 1'deki eşitlikle ifade edilmektedir. Eşitlikte k, Herschel-Bulkley kıvam katsayısı, P ise akış davranış indeksidir. P'nin 1'den büyük olması dilatant, 1'den küçük olması ise psödoplastik davranış göstermektedir. P'nin 1'e eşit olması durumunda daha sade bir model olan Bingham modeli akışkanın davranışını yansıtmaya yetebilir. Özellikle akıcılığı yüksek beton ürünlerinde değişken viskoziteyi yansıtabilen Herschel-Bulkley modeli daha başarılıdır.

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^p \quad (1)$$

Agregre içermeyen referans hamurunda (AG-0) deformasyon hızındaki artışla anlık viskozitelerin de arttığı, diğer bir ifadeyle dilatant davranış sergilendiği görülmektedir. Deformasyon sertleşmesi olarak da isimlendirilen bu davranışa, daha çok kendiliğinden yerleşen hamurlarda ve kaba agregre içermeyen harçlarda rastlanmaktadır [19]. Yüksek oranda akışkanlaştırıcı içeren, çok düşük su/çimento oranına sahip hamurlarda dilatant davranış görülmesi araştırmacılar tarafından düzen-düzensizlik geçişi teorisi veya kümelenme teorisi ile açıklanabilmektedir [20]. Bir süspansiyona uygulanan kayma deformasyonu hızı düşüğe tanecikler arası itici kuvvet, çekim kuvvetine eşittir ve dolayısıyla tanecikler denge durumundadır. Uygulanan deformasyon hızı bir eşik değerin üzerine çıktığında denge durumu bozulur. Stearik etki sağlamak üzere ince taneciklerin etrafını saran polimer zincirleri yüksek kayma hızlarında yerinden olur. Bu nedenle tanecikler sıkı kümeler oluşturmak üzere bir araya toplanır. Kayma hızındaki artış sürdürülürse viskoziteyi arttıran hidrodinamik kümeler oluşur [20]. Deformasyon hızındaki artışla beraber böyle bir davranışın oluşması UYPB karışımlarının pompalanabilirliğini azaltabilir. Hamur karışımında akışkanlaştırıcının 50 kg/m<sup>3</sup> gibi yüksek bir değerde olması dilatant davranış tetiklemiştir. Agregre ilavesi ile UYPB durumuna geçişle beraber dilatant davranışın kırılarak kayma yumuşamasına yani psödoplastik davranışa evrildiği görülmektedir (Şekil 11). Bu durumun temel nedeni olarak hamur hacminin, dolayısıyla dilatant davranışın kaynağı olan sistemdeki akışkanlaştırıcının azalmasıdır. Agregre hacmi arttıkça agregre taneciklerinin etrafındaki hamur kalınlıkları azalmaktadır. Tablo 8'de görüleceği üzere agregre hacminin %55 olması durumunda (sistemdeki hamur hacminin agregre hacminden daha az olmasıyla) dinamik EKG değeri %45 agregre hacmine kıyasla 12 kat civarında artmıştır. Agregalar arasındaki hamur tabakası kalınlığı çok azaldığından düşük deformasyon hızlarında çok büyük bir viskozite ile karşılaşmış, deformasyon hızının artışıyla belirgin şekilde yumuşama davranış gözlemlenmiştir. %65 agregre hacmi durumunda çok kuru kıvamlı bir karışım elde edildiğinden reometre sınır değerleri aşılmış ve ölçüm alınamamıştır. UYPB karışımlarında %45 agregre hacmine kadar dinamik EKG değerinin belirgin derecede yükselmediği, ancak nihai viskozite değerlerinin agregre hacmindeki artışla üssel olarak arttığı görülmektedir (Tablo 8). Kendiliğinden yerleşebilirlik için kuvars agregası hacminin %45'i aşmaması gerektiği görülmüştür.



Şekil 11. Agregta hacmine bağlı olarak akma eğrileri (Flow curves depending on aggregate volume)

**Tablo 8.** Agregta hacmine bağlı olarak reolojik parametreler (Rheological parameters depending on aggregate volume)

Agregta Hacmi (%)	Dinamik EKG (Pa)	Nihai Viskozite (Pa.s)
0	3.3	11.4
35	3.3	24.1
45	5.1	46.2
55	66.1	81.0
65	Ölçülemedi	Ölçülemedi

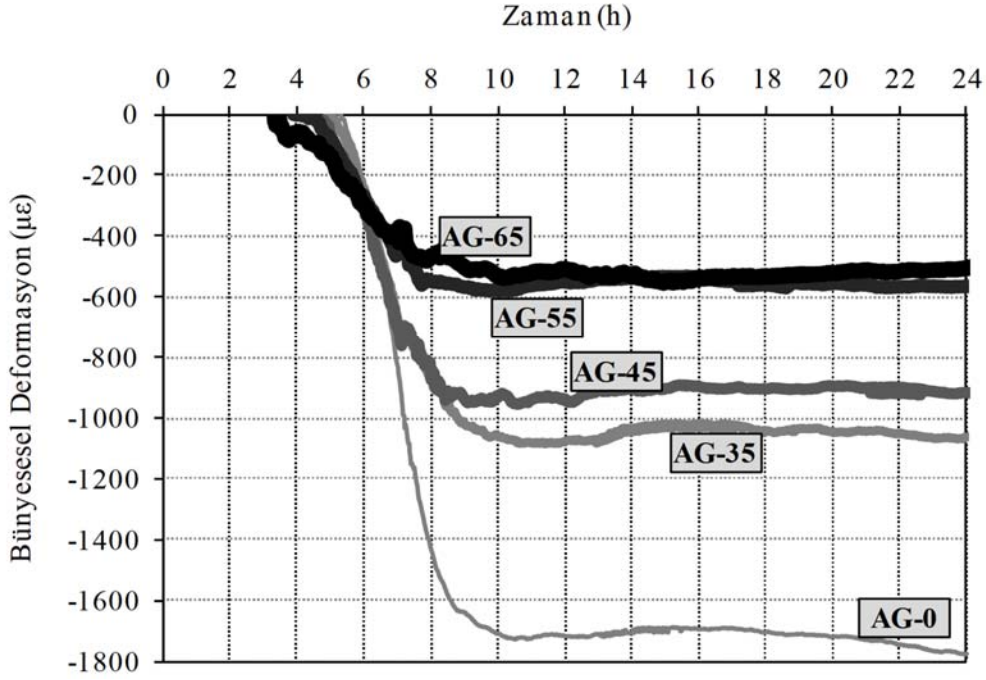
### 3.3. Agregta Hacminin Priz Sürelerine Etkisi (The Effect of Aggregate Volume on the Setting Times)

Agregta hacmine bağlı olarak priz başlangıç ve bitiş süreleri Tablo 9'da verilmektedir. Priz sürelerinin aynı hamur fazına sahip karışımlarda agregta hacmi artışıyla azaldığı görülmektedir. Agregta hacmi artışının Vicat iğnesine denk

gelen agregta sayısını arttırdığı, iğne ucuna denk gelen agregtanın matris içerisinde yer değiştirmesinin ise arayüzey gelişimi ve agregalar arası kontak gibi değişkenlerden etkilendiği söylenebilir. %45'ten %55 agregta hacmine çıkılmasıyla priz sonu sürelerinin belirgin derecede azaldığı görülmektedir. Sistemdeki rijit faz olan agregtanın hamur hacminden fazla olması priz süreleri üzerinde baskın bir etki göstermiştir. Sıcaklığın 20°C'den 30°C'ye çıkması durumunda priz başlangıç sürelerinde 55 ila 123 min, bitiş sürelerinde ise 90 ila 127 min kısalma kaydedilmiştir.

### 3.4. Agregta Hacminin Bünyesel Büzülme Etkisi (The Effect of Aggregate Volume on Autogenous Shrinkage)

Şekil 12'de 20°C, %98 BN koşulunda yalıtılmış numunelerde ölçülen ortalama erken yaş bünyesel büzülme grafikleri sunulmaktadır. Agregta hacminin artışı ile hamur



Şekil 12. Agregat hacmine bağlı olarak erken yaşta bünyesel büzülme  
(Autogenous shrinkage at early-age depending on aggregate volume)

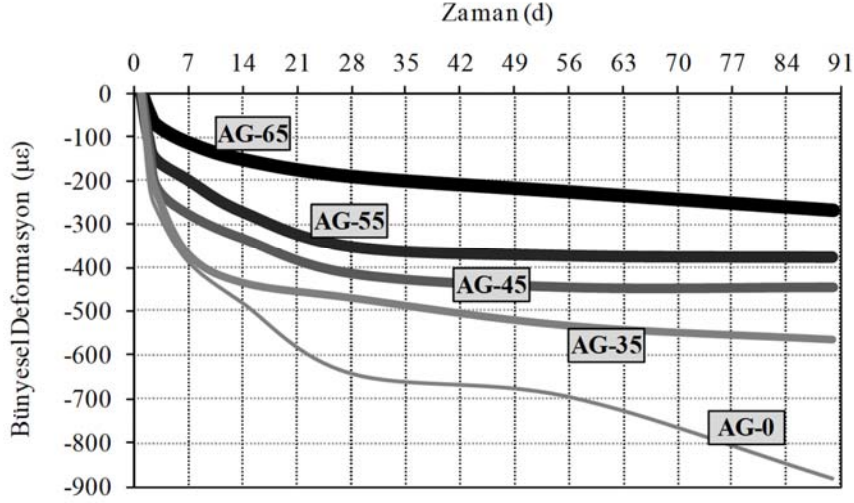
fazı azalmaktadır. Agregat hacminin %35, %45, %55 ve %65 olması durumları için erken yaş bünyesel büzülme sırasıyla %40, %45, %67 ve %70 oranında azalmaktadır. AG-0 karışımının 1800 µε dolayında olan maksimum büzülmesi %65 agregat dahi kullanılsa 550 µε'a indirilebilmiştir. Agregat hacminin artışının ilk 10 saate kadar oluşan büzülme hızını azalttığı da görülmektedir. %65 agregat kullanımı ile büzülme %55 agregat hacmine göre belirgin oranda düşürülebilmiştir. En belirgin düşüş agregat fazı hacminin hamur fazı hacmini aştığı %45 - %55 geçişinde elde edilmiştir. Agregat hacminin artırılması, beton dizaynında büzülmeyle karşı alınabilecek en etkili önlemlerden biridir [21,22]. Bunun nedenleri kimyasal büzülmenin kaynağı olan hamur hacminin azaltılması, hamur fazı büzülürken direnç gösteren faz olan agregat fazının artması, sistemdeki boşluk dağılımının hamura göre kabalaşması olarak sıralanabilir. Beton yaşıyla giderek artan içsel kurumunun çok ince boşluk dağılımına sahip düşük su/bağlayıcı oranlı hamurlarda erken yaşlardan itibaren kapiler gerilmeleri arttırıcı bir tehdit olduğu unutulmamalıdır [23]. Karışımların büzülme eğrileri incelendiğinde priz başlangıçlarından yaklaşık 5 saat sonra büzülmenin duraksadığı, 50 µε'a varan geçici bir genişleme oluştuğu görülmektedir. Bu davranışın arkasında yatan muhtemel nedenlerin erken yaşta etrenjit kristallerinin gelişimi, serbest kireç genişmesi, kuma suyunun geri emilimi ve termal genişleme olduğu belirtilmektedir [24, 25]. Çalışmada kullanılan ufak enkesitli (25×25 mm) numunelerin çekirdek sıcaklığındaki artışın ihmal edilebilir bir değer olarak 2°C'yi aşmadığı görülmüştür. Erken yaşlarda plastik haldeki betonun çok değişken olan termal genişleme katsayısını doğru şekilde ölçmek zordur. Bu nedenle erken yaştaki büzülmenin içsel sıcaklık artışının limitli olduğu ufak enkesitli numunelerde ölçülmesi önerilmektedir.

Tablo 9. Agregat hacmine bağlı olarak priz süreleri  
(Setting times depending on aggregate volume)

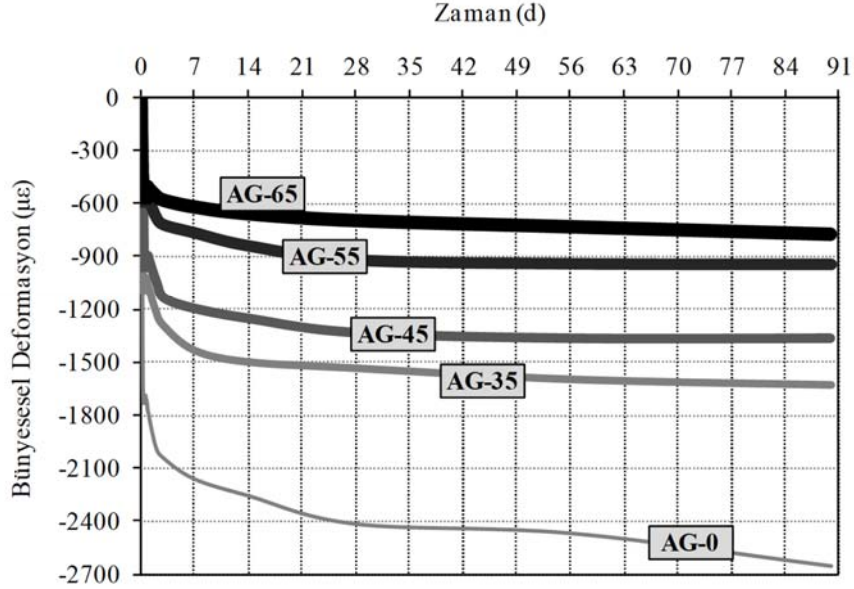
Agregat Hacmi (%)	Sıcaklık (°C)			
	20±1		30±1	
	Priz Süresi (h:min)		Priz Süresi (h:min)	
	Başlangıç	Bitiş	Başlangıç	Bitiş
0	5:14	6:42	3:40	4:40
35	4:55	6:30	2:52	4:42
45	4:32	6:27	2:50	4:20
55	3:55	4:55	2:30	3:15
65	3:20	4:40	2:25	3:10

20°C, %98 BN koşulunda yalıtılmış numunelerde 24. saatten itibaren komparatör vasıtasıyla ölçülen uzun dönemli bünyesel büzülme Şekil 13'te sunulmaktadır. AG-0 hamurunun 90. gün büzülmesi 900 µε iken, %35 ile %55 agregat hacminde bu değer 390 ile 570 µε değerine gerilemiştir. %65 agregat hacmi ile 270 µε dolayında büzülme gerçekleşmiştir. Hamurun hızla büzülmeyle devam ettiği 90. günde agregatlı UYPB karışımlarının büzülme hızı belirgin derecede azalmaktadır.

Şekil 14'te erken yaş ve uzun dönemli bünyesel büzülme grafikleri sunulmaktadır. Erken yaştaki ve uzun dönemdeki eğilimlere paralel olarak agregat hacminin artışıyla toplam bünyesel büzülmenin etkin şekilde azaltılabildiği görülmektedir. UYPB yaşı ilerledikçe hidrasyon için tüketilen su miktarı artmakta ve içsel kurumaya bağlı nem düşüşü gelişmektedir. Uzun dönemde yalıtılmış numunelerdeki bünyesel büzülmeyle sürükleyici



Şekil 13. Agrega hacmine bağlı olarak uzun dönemde bünyesel büzülme  
(Autogenous shrinkage at long term depending on aggregate volume)



Şekil 14. Agrega hacmine bağlı olarak toplam (erken yaş + uzun dönem) bünyesel büzülme  
(Total (early-age + long term) autogenous shrinkage depending on aggregate volume)

kuvvet içsel kurumadır [26]. Agrega hacmindeki artış kimyasal büzülmenin kaynağı olan hamur fazını azaltırken uzun dönemde gelişen içsel kurumaya bağlı büzülme göğüs geren rijit fazı arttırmaktadır. Ayrıca agrega hacmindeki artışın sistemde yarattığı heterojenlik ve işlenebilirlik kaybı sebebiyle UYPB boşluk dağılımını kabalaştırması büzülmeyi azaltıcı bir etki gösterebilir.

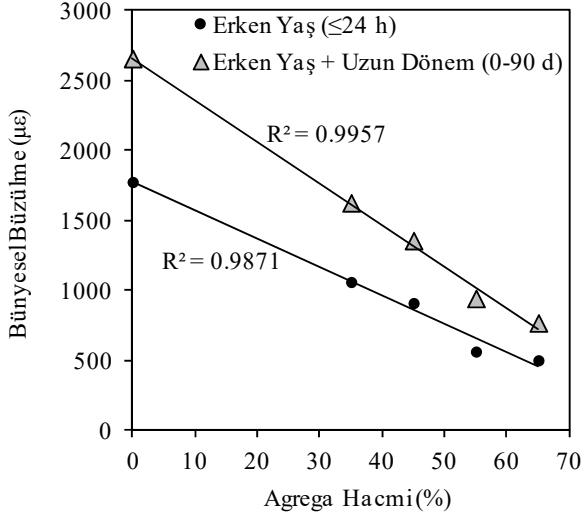
Tüm karışımlar erken yaşta 90 günlük toplam büzülmelerinin %60 ila %67'sini gerçekleştirmiştir (Şekil 15). Bu oran, UYPB'lerde erken yaş bünyesel büzülmenin önemini ortaya koymaktadır. Bu nedenle UYPB'lerde büzülme riski, geleneksel betondan farklı olarak erken yaştan itibaren gerçekleştirilecek ölçümlerle belirlenmelidir. Şekil 15'ten görülebileceği üzere agrega hacmindeki artışın

yarattığı büzülme kısıtlayıcı etki toplam büzülmede daha belirgindir. Diğer bir ifadeyle agregaların bünyesel büzülme kısıtlayıcı etkinliği UYPB yaşıyla beraber artmaktadır. Matris elastisite modülünün gelişme aşamasında olduğu erken yaşlarda agregaların büzülme kısıtlayıcı etkinliği, nihai mekanik özelliklerine eriştiği döneme kıyasla daha azdır. Bu olgunun agrega hacmindeki artışla belirginleştiği görülmektedir.

### 3.5. Agrega Hacminin Kuruma Büzülmesine Etkisi (The Effect of Aggregate Volume on Drying Shrinkage)

Şekil 16'da 30°C, %50 BN koşulunda kalıp üst yüzeyinden kurumaya maruz numunelerde ölçülen erken yaş kuruma büzülmesi grafikleri sunulmaktadır. Hamur fazının henüz

çekme dayanımı gelişmeden önce sergilediği 4800  $\mu\epsilon$  değerindeki aşırı büzülme, en ufak bir kısıtlanma durumunda çatlamaya sebep olacaktır. Kuruma olayının hem dışsal hem de içsel olarak yaşanması, büzülme mertebelerini UYPB'nin kısıtlı durumda karşılaştığı potansiyel çatlak riski açısından tehlikeli değerlere taşımıştır. Agregasız hamur fazının maksimum büzülmesi hacimce %35, %45, %55 ve %65 agrega kullanımıyla sırasıyla %37, %43, %58 ve %85 oranında azalmıştır.

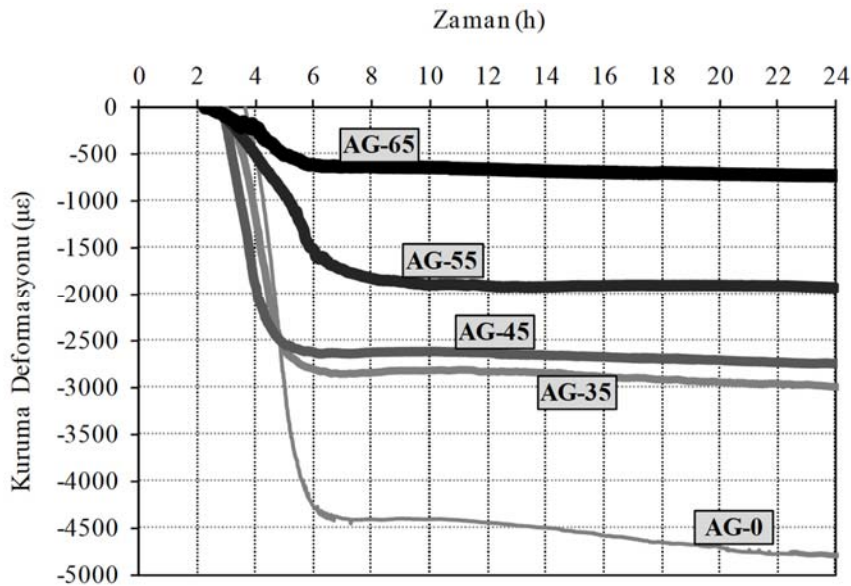


**Şekil 15.** Erken yaş ve toplam bünyesel büzülmenin kıyaslanması  
(Comparison of early-age and total autogenous shrinkage)

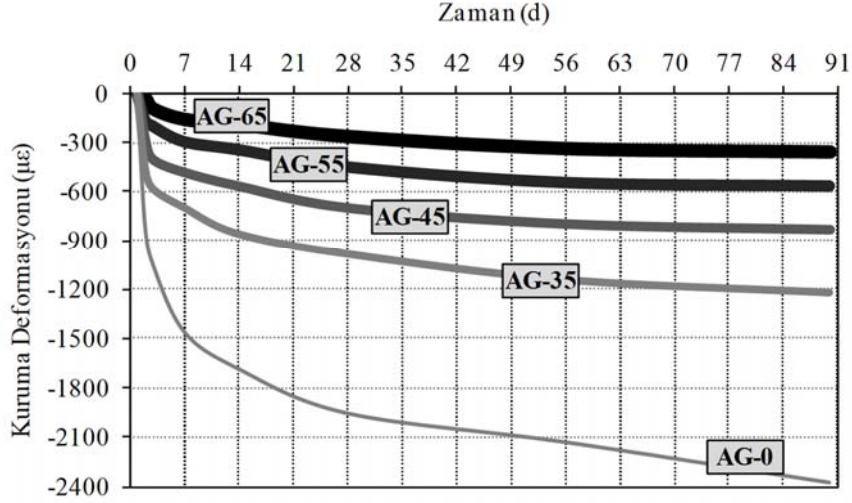
Agregat hacminin artışıyla kuruma büzülmesinin azalmasının nedenleri arasında bünyesel büzülme için sıralanan etkilere ilaveten buharlaşabilir su miktarının azalması söz konusudur. %65 hacminde agrega kullanıldığında kuruma

büzülmesi mertebesinin önemli oranda azalarak bünyesel büzülme seviyesine yaklaştığı (Şekil 12) görülmektedir. Erken yaşta ölçülen buharlaşma miktarlarına bakıldığında hamur hacmi başına buharlaşmanın en az %65 agrega hacminde ölçüldüğü görülmektedir (Tablo 10). Diğer hacim oranlarında hamur hacmi oranındaki düşüşle orantılı azalışlar kaydedilmiştir. Bunun nedeni %65 agrega hacminde oturma ve kuma eğilimi olmadığından yüzeye kaçan suyun azalması ve bünyedeki suyun agrega yüzeylerince adsorbe edilmesi olabilir. Çok erken saatlerdeki büzülme hızının agrega hacminin artışıyla azaldığı görülmektedir. Kanda vd. [27] çatlama direncinin nihai büzülme değerine kıyasla büzülme hızıyla daha kuvvetli bir ilişkide olduğunu tespit etmiştir. UYPB'de çatlakların önlenmesinde agreganın erken yaştaki rollerinden biri de büzülme hızını azaltmasıdır.

Agregat hacminin uzun dönemli kuruma büzülmesine etkisi Şekil 17'den görülebilir. Yalıtılarak nem kaçıışı engellenen numuneler ilk 24 saat boyunca 20°C, %98 BN koşulunda (ideal ortamda) bekletilerek kür edilmiştir. 24. saatin sonunda boyları ölçülen numuneler 30°C, %50 BN koşuluna çıplak olarak koyulmuş ve 90 gün takip edilmiştir. Kuruma tüm yüzeylerdendir. Hamurun 90 günlük kuruma büzülmesi mertebesi 2400  $\mu\epsilon$  değerinde iken %35, %45 %55 ve %65 agrega hacmi ile bu değer sırasıyla %50, %67, %75 ve %83 civarında azalmıştır. Agregalı karışımların kuruma büzülmesi azalarak artmakta, 70 günden sonra neredeyse durmaktadır. Agregaların kullanım hacminden daha büyük bir oranda (yaklaşık %20) büzülme düşüşü sağladığı görülmektedir. Tablo 10 incelendiğinde agrega hacmindeki artışın (hamur hacmindeki azalışının) buharlaşmayı azalttığı görülmektedir. Dahası hamur hacmi başına uzun dönemli buharlaşma miktarları hesaplandığında agrega içeren karışımlar, hamur (AG-0) karışımına kıyasla daha düşük buharlaşma sergilemiştir. Grassl vd. [28] agrega hacmindeki



**Şekil 16.** Agregat hacmine bağlı olarak erken yaşta kuruma büzülmesi  
(Drying shrinkage at early-age depending on aggregate volume)



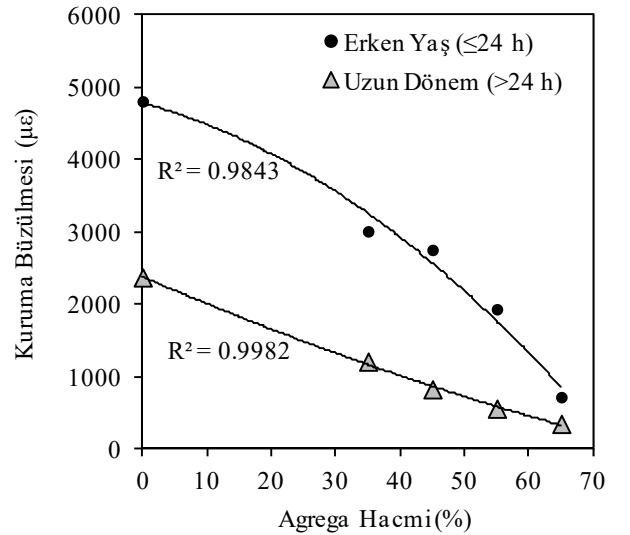
Şekil 17. Agrega hacmine bağlı olarak uzun dönemde kuruma büzülmesi  
(Drying shrinkage at long term depending on aggregate volume)

Tablo 10. Erken yaşta ve uzun dönemde buharlaşma miktarları (Evaporation amounts at early-age and long term)

Agrega Hacmi (%)	Erken Yaşta ( $\leq 1$ d) Buharlaşma ( $\text{kg/m}^2$ )	Uzun Dönemde (1-90 d) Buharlaşma ( $\text{kg/m}^2$ )
0	2,00	0,70
35	1,40	0,40
45	1,10	0,30
55	0,80	0,25
65	0,50	0,20

artışın kurumada agrega kısıtlaması nedeniyle oluşan mikro çatlak boylarını ve ortalama genişliğini azalttığını tespit etmiştir. Bu durum UYPB bünyesindeki serbest suyun yüzeye taşınarak buharlaşmasını azaltabilir. Çalışmada dar enkesitli örneklerin kullanılmış olması bu etkiyi belirgin hale getirmiş olabilir.

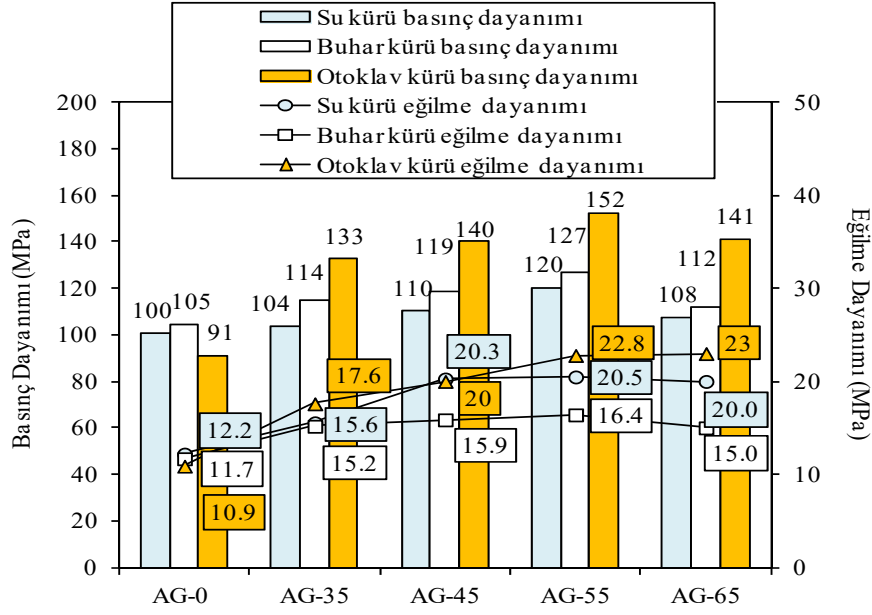
Şekil 18'de lazer sensörlerle takip edilen ilk 1 günlük büzülme değerlerinin standart yöntemlerle takip edilen uzun dönemli büzülme değerlerinden çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Referans hamur karışımı ilk 24 saat yalıtılmış olarak 20°C'de tutulduktan sonra 90 gün boyunca kurumaya maruz kaldığında, ilk 24 saatte doğrudan kuruma ortamına maruz kaldığı durumun %49'u kadar serbest büzülme sergilemektedir. %35, %45, %55 ve %65 agrega hacmi için bu değer sırasıyla %40, %30, %29 ve %49'dur. Agrega hacminin %55 oranına kadar artırılması yaşa bağlı kür hassasiyetini önemli oranda azaltmaktadır. Kurumaya maruz birim alan başına buharlaşma miktarlarının erken yaşta uzun dönemin 2,5 ila 3,5 katı olduğu görülmektedir (Tablo 10). Bu durumun sebebi karışım suyunun hidrasyon sürecinde kimyasal olarak bağlanmadan buharlaşmaya başlamasıdır. Bu sebeple UYPB üretiminde uygun ortam koşulları yaratılmalı ve döküm gerçekleşir gerçekleşmez yüzey ortamdan yalıtılarak kurumaya karşı önlem alınmalıdır. Ayrıca UYPB gibi düşük su/bağlayıcı oranlı betonların çatlama riskinin tayini için büzülme eğilimi erken yaştan itibaren takip edilmelidir.



Şekil 18. Erken yaş ve uzun dönemli kuruma büzülmesinin kıyaslanması  
(Comparison of early-age and long term drying shrinkage)

### 3.6. Agrega Hacminin Mekanik Özelliklere Etkisi (The Effect of Aggregate Volume on the Mechanical Properties)

Numunelerin su, buhar ve otoklav kürü sonrasında elde edilen dayanım değerleri Şekil 19'da verilmektedir. Eğilme ve basınç dayanımları %55 hacminde agrega kullanımına



Şekil 19. Agregata hacmine ve kür türüne bağlı olarak mekanik özellikler (Mechanical properties depending on aggregate volume and curing type)

kadar artmakta, sonrasında ise basınç dayanımı noktasında düşüşe geçmektedir. AG-55 karışımında metreküpte yalnızca 580 kg çimento ve 145 kg silis dumunu mevcuttur. AG-45 karışımı için bu dozajlar sırasıyla 729 ve 182 kg'dır. Çimento dozajındaki önemli orandaki düşüşe rağmen dayanımların artması, agregata tane boyut dağılımının seçiminin uygunluğunu göstermektedir. Hacimce %65 agregata kullanımı, işlenemez bir karışıma sebep olmuştur. Agregata miktarı arttıkça agregata arasındaki hamur kalınlığı düşmekte, taneler arası sürtünme artmaktadır. %65 agregata oranını ile %35 hamur hacmine ve boşluklu yapısına rağmen AG-65 karışımı hatırı sayılır dayanımlara sahiptir. Genel itibariyle AG-35'ten daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Dikkati çeken diğer bir durum ise agregata içermeyen hamurda otoklav kürü ile eğilme ve basınç dayanımlarının arttırılamamasıdır. Agregata içeriği arttıkça, özellikle ısı işlemi ile mekanik özellikler geliştirilebilmektedir. Agregata miktarının artışı hamur hacmini azaltmakta ve paralelinde mikro çatlak oluşumu eğilimini düşürmektedir. Ayrıca çok ince kuvars tozlarının otoklav kürü ile C-S-H oluşumuna katıldığı bilinmektedir [7]. Agregata – matris ara yüzeyinin otoklav kürü ile gelişmesi dayanımları arttırmaktadır. UYPB üretiminde liflerin kullanılması durumunda söz konusu etkinin lif – matris aderansı için de geçerli olacağı söylenebilir. Lifsiz matrislerin araştırıldığı bu çalışmada AG-55 karışımı AG-45 karışımından daha iyi bir performans sergilese de lifler karışımlara katıldığında işlenebilirlik, işlenebilirliğe bağlı boşluk yapısı, lif yönlenmesi ve lif – matris ara yüzeyinin gelişimi gibi faktörlerin mekanik özellikleri belirleyen faktörler olacağı söylenebilir.

#### 4. SİMGELER (SYMBOLS)

C : Paketlenme faktörü  
k : Herschel-Bulkley kıvam katsayısı

P : Herschel-Bulkley akış davranış indeksi  
 $\dot{\gamma}$  : Deformasyon hızı  
 $\eta$  : Viskozite  
 $\mu\epsilon$  : Birim deformasyon ( $\epsilon \times 10^{-6}$ )  
 $\tau$  : Kayma gerilmesi  
 $\tau_0$  : Eşik kayma gerilmesi (EKG)

#### 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

UYPB'nin reolojik davranışı, Herschel-Bulkley modeli vasıtasıyla başarılı şekilde tanımlanabilmektedir. Hamur fazı dilatant davranış göstermiştir. Dilatant davranış UYPB'nin pompalanabilirliğini azaltabilir. Ancak kuvars agregası ilavesi sonucu dilatant davranışın psödoplastik davranışa evrildiği, agregata hacminin artışıyla psödoplastik davranışın kuvvetlendiği görülmüştür. UYPB karışımlarında %45 agregata hacmine kadar dinamik EKG değerinin belirgin derecede yükselmediği, ancak nihai viskozite değerlerinin agregata hacmindeki artışla üssel olarak arttığı görülmüştür. Kendiliğinden yerleşen bir UYPB üretebilmek için %45 agregata hacminin aşılması gerektiği belirlenmiştir.

Agregata hacminin artışı ile UYPB'nin hamur miktarı azalmakta, gerek erken yaş gerekse uzun dönemli büzülme mertebeleri önemli oranda düşmektedir. Agregata UYPB karışımları 550 – 1100  $\mu\epsilon$  erken yaş bünyesel büzülme, 750 – 3000  $\mu\epsilon$  erken yaş kuruma büzülmesi değerleri sergilemiştir. Bu değerler, henüz çekme dayanımının gelişmekte olduğu erken yaşta çatlak riski açısından kritiktir.

Agregata hacminin %35, %45, %55 ve %65 olması durumları için erken yaş bünyesel büzülme hamura kıyasla sırasıyla %40, %45, %67 ve %70 oranında azalmaktadır. UYPB, erken yaş olarak tanımlanan ilk 24 saatte, toplam (90 günlük) bünyesel büzülmesinin %60 ila %67'sini gerçekleştirmiştir.



Agregaların bünyesel büzülme kısıtlayıcı etkinliği UYPB yaşıyla beraber artmaktadır. Hacimce %35, %45, %55 ve %65 agrega kullanımıyla erken yaş kuruma büzülmesi, hamur fazına kıyasla sırasıyla %37, %43, %58 ve %85 oranında azalmıştır. Çok erken saatlerdeki büzülme hızının agrega hacminin artışıyla azaldığı belirlenmiştir. UYPB'de çatlakların önlenmesinde agreganın erken yaştaki rollerinden biri de büzülme hızını azaltmasıdır. UYPB hamur fazı ilk 24 saat ideal koşullarda korunduktan sonra uzun dönemli kurumaya maruz kaldığında, ilk 24 saatte doğrudan kuruma ortamına maruz kaldığı durumun %49'u kadar büzülme sergilemektedir. %35, %45, %55 ve %65 agrega hacmi için bu değer sırasıyla %40, %30, %29 ve %49'dur. Agrega hacminin %55 oranına kadar artırılması, yaşa bağlı kür hassasiyetini önemli oranda azaltmaktadır.

UYPB'nin mekanik özellikleri %55 agrega hacmine kadar su, buhar ve otoklav kürleri ile artırılabilir. %55 agrega hacmi durumunda yalnızca 580 kg çimento ve 145 kg silis dumanı içeren lifsiz UYPB karışımı otoklav küründe 152 MPa basınç, 22,8 MPa eğilme dayanımına erişmiştir. Ancak kendiliğinden yerleşebilirlik için %45 agrega hacminin aşılmaması önerilmektedir. Lif hacmine bağlı olarak agrega hacminin azaltılması gerekebilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 110M691 numaralı projesi kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar TÜBİTAK'a teşekkür eder.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Min K. H., Jung H. C., Yang J. M., Yoon Y. S., Shrinkage Characteristics of High-Strength Concrete for Large Underground Space Structures, *Tunnelling Underground Space Technol.*, 25 (2), 108-113, 2010.
2. Erten E., Yalçinkaya Ç., Beglarigale A., Yiğiter H., Yazıcı H., Effect of early age shrinkage cracks on the corrosion of rebar embedded in ultra high performance concrete with and without fibers, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (4), 1347-1364, 2017.
3. Kizilirmak, C., Aydın, S., Yardimci, M. Y., Effect of the steel fibre hook geometry on the flexural properties of high strength steel fibre reinforced concretes under static and impact loading, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (3), 1610-1627, 2019.
4. Saatçi S., Yaşayanlar S., Yaşayanlar Y., Batarlar B., Effects of steel fibers on the punching behavior of reinforced concrete slabs with different longitudinal reinforcement ratios, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 1045-1059, 2019.
5. Saatçi S., Batarlar B., behavior of steel fiber reinforced concrete beams without stirrups, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (4), 1143-1154, 2017.
6. Uygunoğlu T., Güneş İ., Ersoy B., Evcin A., Effect of mineral admixture type on rheological properties of polymeric self-consolidating mortar, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (4), 1365-1377, 2017.
7. Aydın S., Yazıcı H., Yardımcı M.Y., Yiğiter H., Effect of Aggregate Type on the Mechanical Properties of RPC, *ACI Mater. J.*, 107 (5), 441-449, 2010.
8. Collepardi S., Coppola L., Troli R., Collepardi M., Mechanical Properties of Modified Reactive Powder Concrete, *Fifth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete*, Rome-Italy, 1-21, 1997.
9. Yang J., Peng G.F., Gao Y.X., Zhang H., Mechanical Properties and Durability of Ultra-High Performance Concrete Incorporating Coarse Aggregate, *Key Eng. Mater.*, 629-630, 96-103, 2014.
10. TS EN 933-1, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini- Eleme Metodu, *Türk Standardları Enstitüsü*, 2012.
11. TS EN 1097-6, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, 2013.
12. TS EN 1097-3, Agregaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 3: Gevşek Yığın Yoğunluğunun ve Boşluk Hacminin Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, 1999.
13. Jacobsen S., Arntsen B., Aggregate Packing and Void Saturation in Mortar and Concrete Proportioning, *Mater. Struct.*, 41 (4), 703-716, 2008.
14. EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use. <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf> Yayın tarihi 2005. Erişim tarihi Temmuz 27, 2018.
15. Schatzmann M., Fischer P., Bezzola G.R., Rheological Behavior of Fine and Large Particle Suspensions, *J. Hydraul. Eng.*, 129 (10), 796-803, 2003.
16. TS EN 480-2, Kimyasal Katkılar-Beton, Harç ve Şerbet İçin-Deney Metotları-Bölüm 2: Priz Süresi Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, 2008.
17. Wetzel A., Glotzbach C., Maryamh K., Middendorf B., Microstructural Investigations on the Skinning of Ultra-High Performance Concrete, *Cem. Concr. Compos.*, 57, 27-33, 2015.
18. ASTM C157 / C157M-17, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, *ASTM International*, 2017.
19. Felekoğlu B., Rheological Behaviour of Self-compacting Micro-concrete, *Sadhana*, 39 (6), 1471-1495, 2014.
20. Maybury J., Ho J.C.M., Binhowimal S.A.M., Fillers to Lessen Shear Thickening of Cement Powder Paste, *Constr. Build. Mater.*, 142, 268-279, 2017.
21. Chen Y., Wei J.X., Huang H.L., Jin W., Yu Q.J., Application of 3D-DIC to Characterize the Effect of

- Aggregate Size and Volume on Non-uniform Shrinkage Strain Distribution in Concrete, *Cem. Concr. Compos.*, 86, 178-189, 2018.
22. Beushausen H., Philemon A., The Influence of Mix Composition, W/B Ratio and Curing on Restrained Shrinkage Cracking of Cementitious Mortars, *Constr. Build. Mater.*, 174, 38-46, 2018.
  23. Tao J., Wei X., Fu L. Autogenous Shrinkage of Cement Paste Interpreted by Electrical Resistivity and Capillary Stress at Early Age, *J. Test. Eval.*, 47 (1), 18-34, 2019.
  24. Bentz D.P., Jensen O.M., Hansen K.K., Olesen J.F., Stang H., Haecker C.J., Influence of Cement Particle-Size Distribution on Early Age Autogenous Strains and Stresses in Cement-Based Materials, *J. Am. Ceram. Soc.*, 84, 129-135, 2001.
  25. Mohr B.J., Hood K.L., Influence of Bleed Water Reabsorption on Cement Paste Autogenous Deformation, *Cem. Concr. Res.*, 40, 220-225, 2010.
  26. Aili A., Vandamme M., Torrenti J.M., Masson, B., Is Long-Term Autogenous Shrinkage A Creep Phenomenon Induced by Capillary Effects Due to Self-Desiccation?, *Cem. Concr. Res.*, 108, 186-200, 2018.
  27. Kanda T., Momose H., Imamoto K., Shrinkage Cracking Resistance of Blast Furnace Slag Blended Cement Concrete - Influencing Factors and Enhancing Measures, *J. Adv. Concr. Technol.*, 13 (1), 1-14, 2015.
  28. Grassl P., Wong H.S., Buenfeld N.R., Influence of Aggregate Size and Volume Fraction on Shrinkage Induced Micro-Cracking of Concrete and Mortar, *Cem. Concr. Res.*, 40 (1), 85-93, 2010.