

AKÜ FEMÜBİD 23 (2023) 055601 (1214-1221)

AKU J. Sci. Eng. 23 (2023) 055601 (1214-1221)

DOI: 10.35414/akufemubid.1292117

Araştırma Makalesi / Research Article

## Çimento Hamurlarının Mekanik Özelliklerine CO<sub>2</sub> Kürünün Etkisi

Merve YÜKSEL<sup>1</sup>, Ahmet ÖZCAN<sup>1</sup>, Mehmet Uğur TOPRAK<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya.

Sorumlu yazar e-posta\*: mugur.toprak@dpu.edu.tr  
merveyuksell6@gmail.com  
ahmet.ozcan1@dpu.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5483-2871>  
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-7386-9335>  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6451-9413>

Geliş Tarihi: 03.05.2023

Kabul Tarihi: 03.09.2023

### Öz

#### Anahtar kelimeler

Basınç dayanımı;  
CO<sub>2</sub> kürü;  
Çimento Hamuru;  
Su/çimento oranı.

Erken yaşta CO<sub>2</sub> kürü, çimento hidrasyon ürünlerinin oluşumunu etkileyerek çimento bağlayıcı malzemelerin mekanik özelliklerini değiştirebilmektedir. Farklı su/çimento (s/ç) oranlarında (%28 ve %32) çimento hamurları hazırlandıktan sonra 4 farklı şekilde CO<sub>2</sub> kürü uygulanmıştır. Çimento hamurlarının karıştırma işlemi bittikten 15 dk sonra numunelere 15, 30 ve 60 dk CO<sub>2</sub> kürü (1, 3, 5, 8 ve 10 bar) uygulanmıştır. Aynı zamanda numunelerin bir kısmına da priz başladıktan sonra (117 dk) 30 dk CO<sub>2</sub> kürü (1, 3, 5, 8, 10 ve 50 bar) uygulanmıştır. Çimento hamurlarının 7 günlük basınç dayanımları incelenmiştir. En yüksek basınç dayanımı (112.73 MPa) 15 dk ön bekleme yapılmış ve 60 dk süresince 3 bar CO<sub>2</sub> kürü uygulanmış KK %28 kodlu numunede elde edilmiştir. Kontrol numunelerinde s/ç oranı arttığında basınç dayanımındaki azalma %27 iken, 15 dk ön beklemeden sonra 60 dk CO<sub>2</sub> kürü uygulanan numunelerdeki bu azalma oranı %53'dür. Dayanım artışı açısından genel olarak çimento hamuruna uygulanan en uygun kür işlemi 15 dk ön bekleme sonunda 60 dk 3 bar CO<sub>2</sub> kürüdür.

## Effect of CO<sub>2</sub> Curing on Mechanical Properties of Cement Pastes

### Abstract

#### Keywords

Compressive strength;  
CO<sub>2</sub> curing;  
Cement Paste;  
Water/cement ratio.

CO<sub>2</sub> curing at an early age can change the mechanical properties of cement-binding materials by affecting the formation of cement hydration products. After the cement pastes were prepared at different water/cement (w/c) ratios (28% and 32%), CO<sub>2</sub> curing was applied in 4 different ways. 15 minutes after the mixing process of the cement pastes was completed, CO<sub>2</sub> curing (1, 3, 5, 8 and 10 bar) was applied to the samples for 15, 30 and 60 minutes. At the same time, 30 minutes of CO<sub>2</sub> curing (1, 3, 5, 8, 10 and 50 bar) was applied to some of the samples after setting (117 minutes). The 7-day compressive strengths of cement pastes were investigated. The highest compressive strength (112.73 MPa) was obtained in the KK 28% coded sample, which was kept for 15 minutes and then cured with 3 bar CO<sub>2</sub> for 60 minutes. While the decrease in compressive strength was 27% when the w/c ratio in the control samples increased, this decrease rate was 53% in the samples cured with CO<sub>2</sub> for 60 minutes after 15 minutes of pre-waiting. In terms of strength increase, the most suitable curing process applied to cement paste, in general, was 3 bar CO<sub>2</sub> curing for 60 minutes after 15 minutes of pre-waiting.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Dünyada artan nüfus, sanayileşme ve enerji ihtiyacına paralel olarak sera gazları salınımindaki artış küresel ısınmaya bağlı olarak iklim değişiklikleri, hava kirliliği, doğal afetler tarım ve hayvancılıkta üretim sıkıntıları vb. çok önemli ekolojik problemleri doğurmuştur. Devletler “Kyoto Protokolü”, “Paris Antlaşması”, “Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi”, “Viyana Sözleşmesi” ve

“Montreal Protokolü” gibi anlaşmalar ile en önemli sera gazlarından biri olan CO<sub>2</sub> gazı emisyonunu azaltmaya çalışmaktadırlar (Gürbüz *et al.* 2019). 1 kg çimento üretmek için ortalama 0.87 kg CO<sub>2</sub> salınımı olmaktadır (Damtoft *et al.* 2008, Pacheco-Torgal *et al.* 2012).

Sudan sonra en çok tüketilen ikinci malzeme olan çimentonun kullanımı küresel kalkınma için çok

önemlidir. Yılda 3,5 milyar tondan fazla çimento üretilmekte ve üretilen her bir ton çimento için yaklaşık 900 kg CO<sub>2</sub> salınmaktadır. Avrupa Birliği'nin 2030 iklim ve enerji çerçevesi, 1990'daki seviyelere kıyasla sera gazı emisyonunu %40 oranında azaltma hedefi belirlemiştir. Fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonu, biyokütle, doğal gaz veya katı atıklardan elde edilen yakıt gibi alternatif yakıtlar kullanılarak azaltılabilir. Portland çimentosu (PÇ) üretiminde alternatif yakıtlara geçiş, CO<sub>2</sub> emisyonlarını %40 oranında azaltabilir. Bununla birlikte, karbondioksit emisyonuna önemli bir katkı (yaklaşık %60), klinkerin ana bileşeni olan karbonatların ayrışmasından kaynaklanmaktadır (Nair *et al.* 2023).

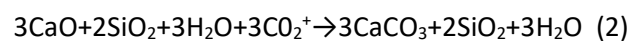
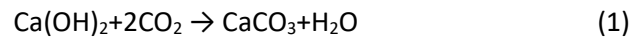
Hızlandırılmış karbonatlaşma ile çimento bazlı malzemelerde CO<sub>2</sub> mineralize edilerek mukavemeti artırmak mümkündür. Nem kimyasal reaksiyonun oluşmasını sağlayarak çimento karbonatlaşmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte aşırı nem CO<sub>2</sub>'nin yayılmasını engelleyebilir. Bu sebeple etkili karbonatlaşma için ideal nem içeriğine ihtiyaç vardır. Geleneksel beton üretiminde genellikle su/çimento (s/ç) oranı 0.3'ün üzerindedir. Artan s/ç oranının neden olduğu boşluk suyu doygunluğu, CO<sub>2</sub> difüzyon yollarının mevcudiyetini azaltırken, yüzey tabakasındaki mikroyapının yoğunlaşması da genel karbonatlaşma veriminde azalmaya yol açar (Tiong *et al.* 2022).

CO<sub>2</sub> kürü uygulanan hazır betonlarda aynı dayanım %5-8 daha az bağlayıcı kullanarak elde edilebilmektedir. Orta ölçekli bir beton santralinde CO<sub>2</sub> kürü ile bağlayıcıdan yapılacak tasarruf ile birlikte yıllık 897 ton CO<sub>2</sub> salınımı engellenebildiği belirtilmektedir (Monkman and Macdonald 2017).

Erken karbonatlaşma reaksiyonu, süresi genellikle birkaç dakika ile birkaç saat arasında değişen yeni dökülmüş betonda meydana gelir. CO<sub>2</sub> ile kürlenme işlemi sırasında CO<sub>2</sub>, esas olarak trikalsiyum silikatlar (C<sub>3</sub>S) ve dikalsiyum silikatlar (C<sub>2</sub>S) ile hızla reaksiyona girerek kalsiyum karbonatlar ve silika jel de dahil olmak üzere karbonatlaşma ürünlerinin oluşumuna yol açar. Ayrıca CO<sub>2</sub>'ye maruz kalmadan önce oluşan C-S-H ve kalsiyum hidroksit gibi hidratlar da

tüketilecektir. Silikatların karbonatlaşma hızları, hidrasyon hızlarından daha hızlıdır. Sonuç olarak, beton ürünlerin mikro yapısı hızla yoğunlaşır ve böylece beton çok daha yüksek erken yaş dayanımına ulaşabilir. Dökümden hemen sonra 2-4 saat CO<sub>2</sub> ile kürlenmiş beton bloklar, 24 saat buharla kürlenmiş beton bloklara benzer bir mukavemet göstermektedir. Bu nedenle, erken CO<sub>2</sub> kürü, buhar kürüne kıyasla prekast beton ürünlerin üretim verimliliğini etkili bir şekilde artırabilir. Ayrıca, erken CO<sub>2</sub> kürü, buhar küründen daha çevre dostudur. Buharla kürlenme ile karşılaştırıldığında, erken CO<sub>2</sub> kürlenme sürecindeki karbondioksit emisyonu ve enerji tüketimi çok daha küçüktür. Buhar kürü sırasında her bir normal ağırlık ve hafif standart beton blok için sırasıyla 2300 kJ ve 2500 kJ enerji tüketilmektedir. Buna karşılık, erken CO<sub>2</sub> kürü sırasında standart bir beton blok için yalnızca 500 kJ enerjiye ihtiyaç vardır (Song *et al.* 2022a).

CO<sub>2</sub> kürü; çimento bağlayıcı ürünlerde (beton, parke taşı, briket vb.) karıştırma aşamasında veya ürüne şekil verildikten sonra atmosfer basıncında veya daha yüksek basınçlar ile enjekte edilen CO<sub>2</sub>'nin Ca iyonu içeren çimento bileşenleri ile aşağıda verilen reaksiyonlara girerek CaCO<sub>3</sub>'e dönüşmesine dayanan hızlandırılmış bir kür sistemidir. Denklem 1-4'te kısaca verilmiş reaksiyonlar sırasıyla gaz halindeki CO<sub>2</sub>'nin sıvı CO<sub>2</sub>'ye dönüşmesi, sıvı CO<sub>2</sub>'nin su ile reaksiyonu ile H<sup>+</sup> ve bikarbonat (HCO<sub>3</sub>) iyonlarının oluşması ve sonrasında H<sup>+</sup> ile trikalsiyum silikat (3CaO.SiO<sub>2</sub>) ve dikalsiyum silikat (2CaO.SiO<sub>2</sub>) reaksiyonları sonucu Ca<sup>2+</sup> açığa çıkması ve HCO<sub>3</sub> ile birleşerek CaCO<sub>3</sub> oluşumu ile sonuçlanmaktadır. CO<sub>2</sub> kürü ekzotermik reaksiyonlar başlattığı için beton 75 °C'de buhar küründen daha hızlı sertleşmektedir. Başlıca karbonatlaşma ürünleri denklem 3 ve 4'te görüleceği şekilde CaCO<sub>3</sub> ve silika jelidir. Zayıf bir yapı olan portlanditin sağlam ve stabil bir yapı olan CaCO<sub>3</sub>'e dönüştürülmesi ile basınç dayanımı önemli ölçüde artmaktadır. Bu bağlamda çimentolu paneller, karolar ve beton bloklarda kullanımı çok faydalı olmaktadır (Khan *et al.* 2018, Song *et al.* 2022b).





Hızlı karbonatlaşma ile CaCO<sub>3</sub> oluşumu malzemenin daha erken ve yüksek dayanım almasını sağlamaktadır (Shi *et al.* 2017, Kang *et al.* 2019). Alkali hidrasyon ürünlerinin tüketimi nedeniyle karbonatlaşmanın betondaki gözenek çözeltisinin pH'ını düşürebileceği bilinmektedir. Betonun pH değeri 11.5'in altına düştüğünde, potansiyel çelik korozyonu ve çatlak oluşumu riskine neden olabilir. Numunenin yüzey tabakasındaki hidrasyon ürünlerinin ve klinker fazlarının sadece bir kısmı hızlandırılmış karbonatlaşma reaksiyonuna katılacaktır. Ayrıca, hızlandırılmış karbonatlaşmanın tamamlanmasından sonra, takip eden uzun süreli kürelemede çimentonun daha fazla hidrasyonu, gözenek çözeltisinin pH'ının artmasına yardımcı olan Ca(OH)<sub>2</sub> dahil olmak üzere daha fazla hidrasyon ürünü üretecektir (Wei *et al.* 2023).

Literatürde inceleme yapıldığında çimentonun içerisindeki C<sub>3</sub>S ve C<sub>2</sub>S miktarları karbon ile hızlı bağ yapma eğiliminden dolayı önemlidir (Goodbrake *et al.* 1979). S/ç oranının çok fazla yükselmesi ise boşlukların su ile dolmasına neden olmakta ve karbondioksitin tam absorpsiyonunu engellemektedir (Klemm and Berger, 1972). Literatürde çimento esaslı yapı malzemelerinde CO<sub>2</sub> kürü ile ilgili çalışmalar (Xuan *et al.* 2018, Khan *et al.* 2018, Tu *et al.* 2018, Zhan *et al.* 2018, Zhang and Shao 2018, Kumar *et al.* 2019, Chen and Gao 2020, Song *et al.* 2021, Wang *et al.* 2022, Guo *et al.* 2022, Lu *et al.* 2022, Jiang *et al.* 2023a, Xu *et al.* 2023, Han *et al.* 2023) son yıllarda önem kazanmakta olup, bu alandaki çalışmaların sayısı artmaktadır.

Hazır beton sektöründe sürdürülebilirlik için CO<sub>2</sub> salınımının önemli ölçüde düşürülmesi şarttır. Bu bağlamda akademik ve ticari çalışmalar son yıllarda ivme kazanmıştır. Çimento bağlayıcılı yapıların CO<sub>2</sub> ile kürü CO<sub>2</sub>'nin atmosfere salınımını engellenmekte ve kür aşamasında kullanılan sudan tasarruf sağlanmaktadır. Bu makalede karbon ayak izimizi düşürebilmek, doğayı ve atmosferi koruyabilmek amacıyla; farklı basınçlarda CO<sub>2</sub> kürünün farklı s/ç

oranına sahip çimento hamurlarının basınç dayanımına etkileri ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Çimento hamurlarında ÇİMSA Eskişehir fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R (PÇ 42.5) kullanılmıştır. PÇ özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Çimento hamurlarının üretiminde iki farklı s/ç oranı (0.28 ve 0.32) kullanılmıştır. Çimento hamurları tek eksenli basınç presinde (Şekil 1) sabit 17 MPa basınç ile 15 cm silindir kalıpta sıkıştırılarak boy/çap oranı 1 olan silindir numuneler şeklinde üretilmiştir. Çimento hamurunun su miktarı arttıkça aynı basınç altında daha fazla sıkıştığı için s/ç oranı %32 olan numunelerde kalıba bir miktar daha fazla çimento hamuru konularak presleme yapılmıştır. Böylece her iki seri içinde boy/çap oranı korunmuştur. 15 mm yüksekliğinde ve 15 mm çapında üretilen silindir numunelerden kontrol serileri üretildikten hemen sonra polietilen örtü ile sarılarak deney zamanına kadar susuz kürlenmeye bırakılmıştır. Diğer numunelere ise 15 dk ve priz başlangıcı (117 dk) olmak üzere iki farklı ön bekleme süresinden sonra CO<sub>2</sub> kürü uygulanmıştır. Priz başlangıcından sonra 30 dk 1, 3, 5, 8, 10 ve 50 bar CO<sub>2</sub> kür uygulanırken, diğer numunelerde ise karıştırma işlemi bittikten 15 dk sonra 15, 30 ve 60 dk 1, 3, 5, 8 ve 10 bar CO<sub>2</sub> kürü uygulanmıştır. Daha sonra numuneler deney gününe kadar polietilen örtü ile sarılarak kürlenmişlerdir. Ön bekleme süreleri çimento priz başlangıç süresi ve numuneleri hazırlayarak reaktöre koyup reaktör kapağını vidalayıp küre başlayabildiğimiz en erken süre olan 15 dk dikkate alınarak seçilmiştir. Kontrol serileri s/ç oranına göre K %28 ve K %32 olarak, CO<sub>2</sub> kürü uygulanan seriler ise KK %28 ve KK %32 olarak kodlanmıştır. Her seri için 4 adet numune üretilmiştir ve 7. günde basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuşlardır. Numunelerin üretim ve test şeması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çimento hamurlarının üretimi, CO<sub>2</sub> kürü uygulaması ve basınç dayanımının belirlenmesi

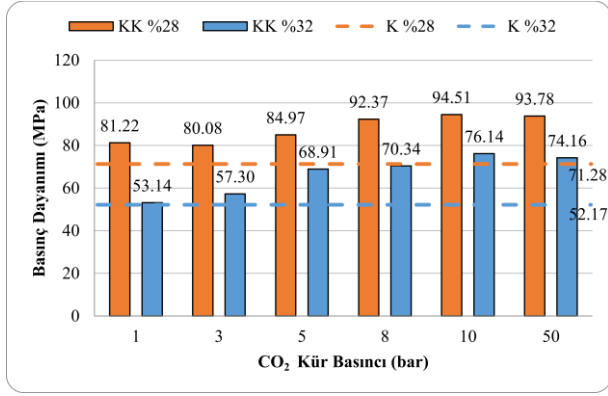
Çizelge 1. PÇ'nin özellikleri

Oksit	%	Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Limit Değerler	
CaO	62.5	Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3372	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.59	Özgül ağırlık	3.05	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.09	Priz bşl. (dk)	117	60 dk <
SiO <sub>2</sub>	19.4	Priz btş. (dk)	178	
MgO	1.74	Genleşme (mm)	2	10 mm >
K <sub>2</sub> O	0.64	Basınç dyn. (MPa)		
Na <sub>2</sub> O	0.2	2-gün	30.8	20 MPa ≤
SO <sub>3</sub>	3.29	7-gün	39.5	
KK*	3.15	28-gün	56	42.5 MPa ≤

KK: Kızdırma kaybı

### 3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 2'de priz başlangıçlarından itibaren 30 dk süresince farklı barlarda CO<sub>2</sub> uygulanarak kür edilen çimento hamurlarının basınç dayanımları gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde s/ç oranı arttıkça kontrol çimento hamurlarının basınç dayanımlarının belirgin bir miktarda azaldığı görülmektedir. K %28 ve K %32 için basınç dayanımları sırasıyla 71.28 ve 52.17 MPa'dır. K %28 ve K %32 için CO<sub>2</sub> kürü ile basınç dayanımında meydana gelen artış ortalama olarak sırasıyla %23 ile %28'dir. Priz başladıktan sonra CO<sub>2</sub> kürü uygulamasında CO<sub>2</sub> basıncı arttıkça, KK %32 serilerinde KK %28'e göre basınç dayanımında çok daha belirgin artışlar meydana gelmiştir. Bu durum artan su miktarı ile birlikte karbonatlaşma reaksiyonlarının miktarının artmasından ve K %32 serilerinde çimento hamurunun daha boşluklu bir yapıya sahip olması nedeni ile CO<sub>2</sub>'nin çimento ve hidrasyon ürünleri ile reaksiyona girerek karbonatlaşması ile açıklanabilir. Priz başladıktan sonra 30 dk CO<sub>2</sub> kür uygulandığında 10 bara kadar KK %28 basınç dayanımları 81 MPa'dan 94 MPa'ya kadar, KK %32 ise 52 MPa'dan 76 MPa'ya basınçla beraber artmıştır ve bu değerler iki s/ç oranı içinde kontrol numunelerinden yüksektir. 50 bar CO<sub>2</sub> küründeki çimento hamurlarının basınç dayanımı değerlerinin, 10 bar CO<sub>2</sub> küründekilere göre düştüğü gözlemlenmiştir. Bu nedenle diğer serilerde 50 bar CO<sub>2</sub> kürü uygulanmamıştır.



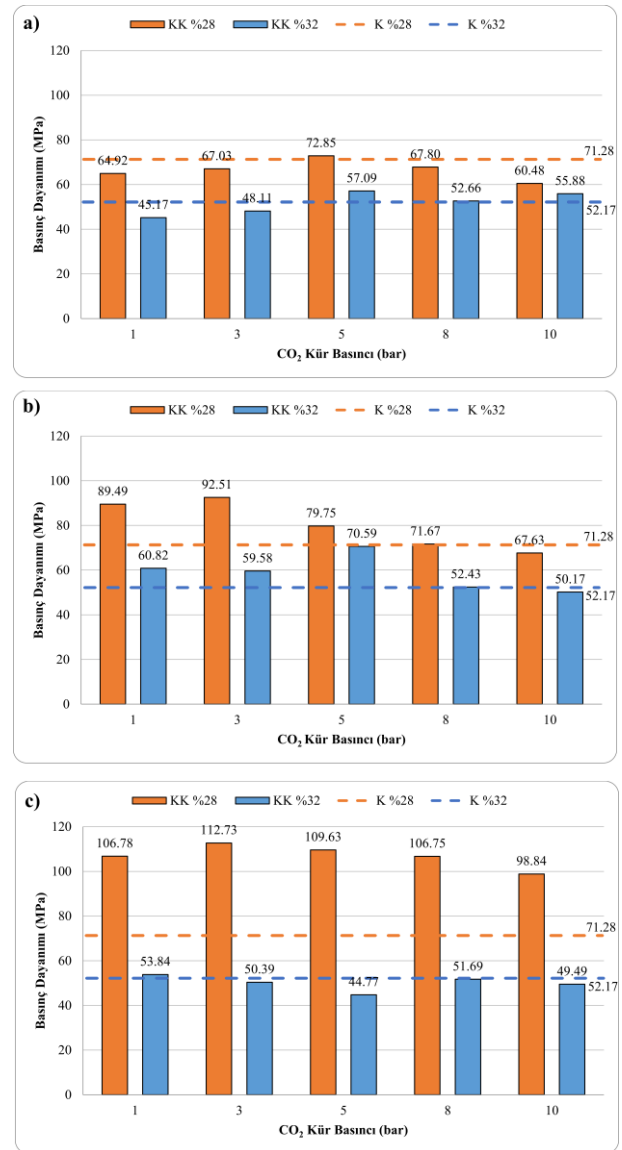
Şekil 2. Priz başladıktan sonra (117 dk) 30 dk CO<sub>2</sub> kür uygulanan çimento hamurlarının basınç dayanımları

Ön bekleme süresi 15 dk olan ve 15, 30 ve 60 dk farklı barlarda CO<sub>2</sub> kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımları Şekil 3'te verilmiştir. 15 dk ön bekleme süresinden sonra 30 dk CO<sub>2</sub> kür uygulamasında KK %32 serilerinde en yüksek dayanım 5 bar kür basıncı ile elde edilmiş daha yüksek kür basınçları dayanım gelişimini belirgin bir şekilde düşürmüştür. KK %28 serilerinde 3 bar ile 30 dk CO<sub>2</sub> kür uygulandığında basınç dayanımı 92 MPa iken, 10 barda 67 MPa'a kadar düşmüştür. Kısa ön bekleme süresinden (15 dk) sonra başlatılan CO<sub>2</sub> kürde yüksek kür basıncının çimento hamurunun dayanım gelişimini olumsuz etkilediği görülmüştür. Priz başlangıcı sonrası uygulanan CO<sub>2</sub> kürde ise yüksek basınçlarda dayanım olumsuz etkilenmemiştir. CO<sub>2</sub> kürü ile oluşan kalsiyum karbonat, kalsiyum alüminat monokarbonat oluşturmak için alüminat ile reaksiyona girebilirken, yüksek polimerizasyonlu silika jel portlandit ile reaksiyona girerek C-S-H oluşturabilir. Karbonatlaşma küründen sonra uygulanan yeniden hidrasyon prosedürü, daha sonraki mukavemeti koruyarak erken mukavemeti artırabilir (Jiang *et al.* 2023b).

En yüksek basınç dayanımı (112.73 MPa) 15 dk ön beklemeden sonra 3 bar 60 dakika CO<sub>2</sub> kür uygulanan KK %28 serisinde elde edilmiştir. KK %32 serilerinde su miktarının yüksek olmasından dolayı 5 bar kür basıncı ve 30 dk CO<sub>2</sub> kür süresinin yeterli olduğu, daha yüksek kür sürelerinin ve basınçlarının uygulanmasının çimento hamurunun dayanım gelişimini olumsuz etkilediği görülmüştür. Bu durum aşırı CO<sub>2</sub> kürünün çimento hamurlarının s/ç oranını

artırması, CO<sub>2</sub> kürün hidrasyon reaksiyonlarının devamını engellemesi veya oluşan C-S-H yapısını bozmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Wei *et al.* (2023) s/ç oranı 0.3 ve 0.4 olan çimento hamurlarına 1, 3, 7 ve 14 gün CO<sub>2</sub> kürü uygulamışlardır. 1 günlük CO<sub>2</sub> kürü s/ç oranı 0.3 olan numunelerin basınç dayanımlarında azalmaya sebep olurken, s/ç oranı 0.4 olan numunelerin dayanımlarını artırmıştır. En yüksek basınç dayanımları 14 gün CO<sub>2</sub> kürü uygulanan numunelerde elde edilmiştir. Genel olarak CO<sub>2</sub> kür süresi arttıkça numunelerin basınç dayanımları da artmıştır.



Şekil 3. Ön bekleme süresi 15 dk ve CO<sub>2</sub> kür süresi 15 (a), 30 (b) ve 60 dk (c) olan çimento hamurlarının basınç dayanımları

#### 4. Sonuçlar

Priz başlangıç süresinden sonra CO<sub>2</sub> kür uygulandığında genel olarak dayanımlar artan kür basıncı ile doğru orantılı olarak artmıştır. Yüksek kür basınçlarına rağmen en yüksek dayanım 94 MPa'dır. En yüksek basınç dayanımı (112.73 MPa) s/ç oranı %28 olan ve kısa (15 dk) ön bekleme süresinden sonra 60 dk 3 bar basınçta kür uygulanan çimento hamurunda elde edilmiştir. Priz başlangıç süresinde CO<sub>2</sub> uygulanan numuneler ile karıştırma işlemi bittikten sonra 15. dk'da CO<sub>2</sub> kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımları karşılaştırıldığında, aynı CO<sub>2</sub> kür süresi (30 dk) için 3 barda çıkılan dayanımlara (90 MPa) yakın dayanımlara ulaşabilmek için priz başladıktan sonra CO<sub>2</sub> kürü uygulanan numunelerde daha yüksek basınçlarda (8-10 bar) CO<sub>2</sub> kürü yapmak gerekmiştir. Bu durum hidrasyon reaksiyonları ilerlemeden kür yapmanın daha uygun olduğunu göstermiştir. Bu verilerden olabildiğince erken CO<sub>2</sub> kür yapılmasının ve basıncın 3 barda tutulmasının hem ekonomi hem de yüksek dayanım değerleri açısından en uygun olacağı görülmektedir. Kür süresi için istenilen dayanım ve ekonomi değerlendirilerek 30 veya 60 dk kür süresi seçilebilir.

Çimento hamurundaki s/ç oranı arttığında priz başlangıcından sonra uygulanan CO<sub>2</sub> kürünün normal küre göre çok daha yüksek dayanım artışları sağladığı açık bir şekilde görülmektedir. Bunun nedeni suyun varlığında karbonatlaşma reaksiyonlarının çok daha verimli gerçekleşmesi olabilir. Ancak su oranı belirli bir miktarı aşınca çimento hamurundaki s/ç oranının artması çimento hamurlarının dayanımında belirleyici olmakta ve dayanımı belirgin bir şekilde düşürmektedir.

Beton briket, blok vb. üretiminde karıştırma aşamasında CO<sub>2</sub> kürünün yapılması, daha sonra ürüne şeklinin verilmesi önerilebilir. Karbonatlaşma reaksiyonları sırasında açığa çıkan suyun bir kısmının sıkıştırma aşamasında üründen atılması daha düşük s/ç oranına sebep olurken aynı zamanda daha yüksek dayanıma sahip ürünlerin üretilmesini sağlayacaktır. CO<sub>2</sub> kür uygulamasında yüksek dayanım elde etmek için çimento bağlayıcılı ürünlerde s/ç oranı, kür süresi ve basıncının

deneylerle belirlenmesi gerektiği görülmüştür. İleriki çalışmalarda ürün boyutlarına göre kür koşullarının araştırılması önerilebilir.

#### Teşekkür

Bu çalışma Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi tarafından (Proje no: 2022 – 42) hızlı destek projesi kapsamında desteklenmiştir.

#### 5. Kaynaklar

- Chen, T., Gao, X., 2020. Use of carbonation curing to improve mechanical strength and durability of pervious concrete. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, **8(9)**, 3872–3884.
- Damtoft, J.S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., Gartner, E.M., 2008. Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, **38(2)**, 115-127.
- Goodbrake, C.J., Young, J.F., Berger, R.L., 1979. Reaction of hydraulic calcium silicates with carbon dioxide and water. *Journal of the American Ceramic Society*, **62(9-10)**, 488-491.
- Guo, R., Wang, L., Huang, H., Wang, T., Yi, Z., 2022. Enhanced carbonation curing of cement pastes with dolomite additive. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, **12(2)**, 273–283.
- Gürbüz, C., Aracı, Ö.N.K., Bekci, İ., 2009. Dünya'da ve türkiye'de karbon ticareti ve karbon muhasebesi uygulamaları üzerine bir araştırma. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi* **11(28)**, 424-438.
- Han, S.H., Jun, Y., Kim, J.H., 2023. The use of monoethanolamine CO<sub>2</sub> solvent for the CO<sub>2</sub> curing of cement-based materials. *Sustainable Materials and Technologies*, **35**, e00559.
- Jiang, L., Wu, Q., Gu, Q., Zhong, D., Wang, L., 2023a. Utilization of CO<sub>2</sub>-cured waste cement powder to enhance the properties and microstructure of cement mortar and paste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **34(10)**, 04022253.
- Jiang, L., Wu, Q., Huo, Z., Zhu, Z., Wu, F., Lu, B., 2023b. An approach to improve compressive strength of cement

- paste at low temperature by carbonation curing, *Construction and Building Materials*, **365**, 130128.
- Kang, S.H., Kwon, Y.H., Moon, J., 2019. Quantitative analysis of CO<sub>2</sub> uptake and mechanical properties of air lime-based materials. *Energies*, **12(15)**, 2903.
- Khan, M.T., Saud, K.R., Irfan, K.A.M., Ibrahim, S., 2018. Curing of concrete by carbon dioxide. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, **5(4)**, 4410-4414.
- Klemm, W.A., Berger, R.L., 1972. Accelerated curing of cementitious systems by carbon dioxide: Part I. Portland cement. *Cement and Concrete Research*, **2(5)**, 567-576.
- Kumar, T.S., D, B.K.V.G., Reddy, S.T.N., Rao, G.S., 2019. Mechanical properties of concrete when cured with carbon dioxide. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, **8(6)**, 2544-2549.
- Lu, B., Drissi, S., Liu, J., Hu, X., Song, B., Shi, C., 2022. Effect of temperature on CO<sub>2</sub> curing, compressive strength and microstructure of cement paste. *Cement and Concrete Research*, **157**, 106827.
- Monkman, S., MacDonald, M., 2017. On carbon dioxide utilization as a means to improve the sustainability of ready-mixed concrete. *Journal of Cleaner Production*, **167**, 365-375.
- Nair, P.A.K., Paine, K., Calabria-Holley, J., 2023. Control of carbonation mechanism in Portland cement paste using synthetic carbon-capture aluminosilicates. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, **69**, 102391.
- Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Camões, A.F., Jamshidi, M., Ding, Y., 2012. Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue?. *Construction and Building Materials*, **30**, 400-405.
- Shi, C., Tu, Z., Guo, M.Z., Wang, D., 2017. Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites. Junior, H.S., Fiorelli, J., dos Santos, S.F. (Editor), Woodhead Publishing, 313-341.
- Song, B., Hu, X., Liu, S., Shi, C., 2022b. Chloride binding of early CO<sub>2</sub>-cured Portland cement-fly ash-GGBS ternary pastes. *Cement and Concrete Composites*, **134**, 104793.
- Song, B., Liu, S., Hu, X., Ouyang, K., Li, G., Shi, C., 2022a. Compressive strength, water and chloride transport properties of early CO<sub>2</sub>-cured Portland cement-fly ash-slag ternary mortars. *Cement and Concrete Composites*, **134**, 104786.
- Song, B., Shi, C., Hu, X., Ouyang, K., Ding, Y., Ke, G., 2021. Effect of early CO<sub>2</sub> curing on the chloride transport and binding behaviors of fly ash-blended Portland cement. *Construction and Building Materials*, **288**, 123113.
- Tiong, M., Li, X., Mo, K.H., Ling, T.C., 2022. Effects of moulding pressure and w/c induced pore water saturation on the CO<sub>2</sub> curing efficiency of dry-mix cement blocks. *Construction and Building Materials*, **335**, 127509.
- Tu, Z., Shi, C., Farzadnia, N., 2018. Effect of Limestone Powder Content on the Early-Age Properties of CO<sub>2</sub>-Cured Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **30(8)**, 04018164.
- Wang, Y., Mo, K.H., Du, H., Ling, T.C., 2022. Effects of CO<sub>2</sub> curing treatment on alkali-silica reaction of mortars containing glass aggregate. *Construction and Building Materials*, **323**, 126637.
- Wei, J., Mo, K.H., Ling, T.C., 2023. Roles of subsequent curing on the pH evolution and further hydration for CO<sub>2</sub> cured cement pastes. *Journal of Building Engineering*, **64**, 105701.
- Xu, J., Wang, H., Wang, W., Shi, F., 2023. The influence of CO<sub>2</sub>-cured incinerated waste fly ash on the performance of reactive powder concrete. *Coatings*, **13(4)**, 709.
- Xuan, D., Zhan, B., Poon, C.S., 2018. A maturity approach to estimate compressive strength development of CO<sub>2</sub>-cured concrete blocks. *Cement and Concrete Composites*, **85**, 153-160.
- Zhan, B.J., Xuan, D.X., Poon, C.S., Shi, C.J., Kou, S.C., 2018. Characterization of C-S-H formed in coupled CO<sub>2</sub>-water cured Portland cement pastes. *Materials and Structures*, **51**, 92.

Zhang, D., Shao, Y., 2018. Surface scaling of CO<sub>2</sub>-cured concrete exposed to freeze-thaw cycles. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, **27**, 137-144.