



Kendiliğinden Yerleşen Yüksek Dayanımlı Portland Çimentosuz Briket Malzemesi Üretimi

Production of Self-Compacted High Strength Brick Material without Portland Cement

Paki Turğut ^{1*}, Feridun Demir ², Kazım Türk ³

^{1,3} İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, TÜRKİYE

² Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü, Osmaniye, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: paki.turgut@inonu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 29.07.2021

Kabul Tarihi / Accepted: 09.03.2022

Atıf şekli/How to cite: TURGUT, P., DEMİR, F., TÜRK, K. (2022). Kendiliğinden Yerleşen Yüksek Dayanımlı Portland Çimentosuz Briket Malzemesi Üretimi. DEÜ FMD 24(72), 703-716.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.202247202

Üretim. DEÜ FMD 24(72), 703-716.

Öz

Bağlayıcılık özelliğine sahip olan bazı uçucu küller ilgili standartları sağlamadığından beton sektöründe kullanılmamaktadır. Atık depolama alanlarına gönderilen bu tür uçucu küller toprağa ve yeraltı sularına zarar vermektedir. Kangal Termik Güç Tesisi uçucu külü de beton sektöründe kullanılmamakta ve atık depolama alanına gönderilmektedir. Bu çalışmada, Kangal Termik Güç Tesisi uçucu külü, atık cam tozu ve kireç kullanılarak, kendiliğinden yerleşen yüksek dayanımlı briket üretilmiştir. Ağırlıkça %66 uçucu kül, %7 kireç ve %27 atık cam tozuyla üretilen briketin 56 günlük basınç dayanımı 67,5 MPa olmuştur. Üretilen briketlerin birim ağırlık, su emme, kılcal su emme ve ısı iletkenlik değerlerinin yanında mikro yapıları da incelenmiştir. Üretilen briketler ulusal ve uluslararası standartlarda verilen sınır değerlerini sağlamıştır. Üretilen bu briketler kırsal kesimde yaşayan düşük gelirli insanların konut sorununun çözümüne yardımcı olabilir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu Kül, Atık Cam Tozu, Kireç, Briket

Abstract

Some types of fly ash with binding properties are not used in the concrete industry due to not meeting relevant standards. These types of fly ash, including the Kangal Thermal Power Plant fly ash, are then sent to landfills, which is harmful to soil and groundwater. In this study, self-compacting high-strength brick was produced by using the Kangal Thermal Power Plant fly ash, waste glass powder, and lime. The compressive strength of brick containing 66% fly ash, 7% lime, and 27% waste glass powder was measured to be 67.5 MPa at 56 days. The unit weight, water absorption, sorptivity, and thermal conductivity values of the bricks were measured, and their microstructures were also examined. These bricks meet national and international standards. In addition, production of these bricks can help solve the housing problem for individuals from lower socio-economic backgrounds, especially those living in rural areas.

Keywords: Fly Ash, Waste Glass Powder, Lime, Brick

1. Giriş

Termik santrallerde yan ürün olarak elde edilen uçucu külün kimyasal kompozisyonu, yakılan kömürün cinsine göre değişmektedir. Uçucu küllerin bir kısmı hem maliyeti düşürmek hem de bazı özellikleri iyileştirmek amacıyla beton üretiminde kullanılırken, diğer bir kısım uçucu küller kimyasal kompozisyonunun uygun olmaması nedeniyle beton üretiminde kullanılmamaktadır. Ulusal ve uluslararası standartları sağlamayan atık uçucu küller, masraflı bir işlemlerle atık depolama alanlarına gönderilmekte ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Çok sayıda termik santrale sahip olan ülkemizde, söz konusu atık uçucu küllerin faydalı bir ürüne dönüştürülerek ülke ekonomisine katkı sağlayacak çalışmalar yapılması büyük önem arz etmektedir.

Ülkemizde üretilen elektrik enerjisinin bir kısmı kömür yakılan termik santrallerden elde edilmekte olup, 2017 yılında bu santrallerin toplam sayısı 41'e ulaşmıştır. Söz konusu santrallerin 30'unda yerli taşkömürü, linyit ve asfaltit diğer 11'inde ise, ithal kömür yakılmaktadır. 2017 yılında, ülkemizde üretilen elektrik enerjisinin toplam miktarı 83138,9 MW'tır. Üretilen toplam elektrik enerjisinin 18006,5 MW'lık kısmı termik santrallerden elde edilmiş olup, ülkemizde üretilen toplam elektrik enerjisinin % 21,7'sini teşkil etmektedir [1].

Termik santrallerde öğütülüp toz haline getirildikten sonra yakılan kömürlerin değişik

türlerde atıkları oluşmaktadır. Bunlar; kömürün yakıldığı kazanın alt kısmında toplanan taban külü, siklon türü ocaklarda yanmış kömürün suda soğutulup uzaklaştırılmasıyla oluşan ham kül ve kömürün yanması esnasında baca gazlarıyla uzaklaşırken yakalanan uçucu küldür [2].

Uçucu külün beton üretiminde kullanılması, çimento sarfiyatını azaltmaktadır. Sonuç olarak, çimento üretimi için harcanan enerji miktarının yanında atmosfere salınan sera gazı miktarı da azalmaktadır. Beton üretiminde bir miktar çimento yerine uçucu kül kullanılması, çimento üretiminde kullanılan doğal hammaddelerin miktarını da azaltarak çevrenin korunmasına da katkıda bulunmaktadır. Ayrıca uçucu küllerin atık depolama alanlarına gönderilmesinden kaynaklanan olumsuzluklar da böylece bertaraf edilmektedir. İlgili standartlara göre uçucu kül sınıflandırmaları Tablo 1'de verilmiştir. ASTM C618 [3] standardında, uçucu küller kimyasal kompozisyonlarının miktarlarına göre şöyle sınıflandırılmıştır. Taş kömürü ya da bitümlü kömürün yanmasıyla oluşan uçucu külün içerisindeki SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 miktarlarının toplamı %70'den büyük ve CaO değeri de %10'dan küçük ise uçucu kül F sınıfıdır. F sınıfı uçucu küller puzolanik yapıya sahiptir. Linyit ya da düşük bitümlü kömürün yanmasıyla oluşan uçucu kül içerisindeki SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 miktarları toplamı %50'den ve CaO değeri de %10'dan büyük ise uçucu kül C sınıfıdır. C sınıfı uçucu küllerin hem puzolanik hem de bağlayıcılık özelliği vardır.

Tablo 1. ASTM C 618, TS EN 197-1 ve TS EN 450'de uçucu kül sınıflandırması

Sınıflar	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	K.K.	Serbest CaO	Standartlar
F sınıfı	<10	-	>70	-	<5	<5	-	ASTM C618
C sınıfı	>10	-	>50	-	<5	<6	-	ASTM C618
Kalkersi	>10	>25	-	-	<3	<5	<1	TS EN 197- 1
Silissi	<10	>25	-	-	<3	<5	<1	TS EN 450

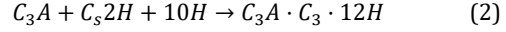
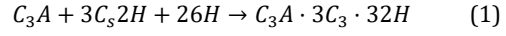
TS EN 197-1 [4] standardında uçucu küller kalkerli ve silisli olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Kalkerli uçucu küllerin hem bağlayıcılık hem de puzolanik özelliği vardır. Kalkerli uçucu küllerin kimyasal bileşenlerinin ağırlıklı kısmını CaO, SiO₂ ve Al₂O₃ oluşturmaktadır. CaO miktarı %10'dan, SiO₂ miktarı da %25'ten büyüktür. Silisli uçucu kül ise ağırlıklı

olarak reaktif SiO₂ ve Al₂O₃'ten meydana gelmekte olup, geriye kalan bir kısmıysa Fe₂O₃ ve diğer bileşenlerdir. CaO miktarı %10'dan küçük ve SiO₂ miktarı da %25'ten büyüktür. Silisli uçucu kül puzolanik özelliğe sahiptir.

ASTM C618'de [3], F ve C sınıfı uçucu küllerde müsaade edilen en fazla SO₃ değeri %5'tir. Bu uçucu küllerin kızdırma kayıpları, F sınıfında en

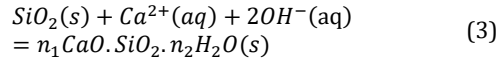
fazla %5 ve C sınıfında ise, %6 ile sınırlandırılmıştır. TS EN 450 [5] standardı ise, SO₃ miktarını en fazla %3 ve serbest CaO miktarını da en fazla %1'le sınırlandırmıştır. Bu sınır değerlerin aşılması durumunda, SO₃ fazlalığı nedeniyle ileriki yaşlarda betonda genleşme ve serbest CaO ise, hidrasyon sırasında Ca(OH)₂ oluşturarak yine betonda genleşmeye sebep olmaktadır. Bu genleşmeler betonda çatlamlar meydana getirmektedir. Ülkemizdeki termik santrallerin uçucu küllerinin özellikleriyle ilgili detaylı bir çalışma Türker ve ark. [2] tarafından yapılmıştır.

Ülkemizde katı atık depolama alanlarına gönderilen diğer bir malzeme de camdır. Atık bir malzeme olan eski camlar genellikle pencere camı, kap ve şişe gibi ürünlerden meydana gelmektedir. 2015 yılında, sadece ambalaj malzemesi olarak üretilen 1025533 t camdan 696176 t'u atık depolama alanlarına gönderilmiştir. Geri dönüşümde kullanılan cam miktarı 212701 t olup, gerçekleşen geri kazanım oranı %31'dir [6]. Atık camların renk çeşitliliğinin çok fazla olması nedeniyle, çok az bir kısmı geri dönüşümde kullanılmaktadır. Dolayısıyla, bu camların büyük bir kısmı doğaya ya da depolama alanlarına atık olarak terk edilmektedir. Toprak içerisinde çözünmeyen atık camın doğaya terk edilmesi, çevreye zarar vermektedir. Bu nedenle, atık camların uygun alanlarda kullanılması, hem çevre sorunlarının azaltılması hem de ülke ekonomisine kazandırılması bakımından önem taşımaktadır [7]. Atık camların betonda agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla yapılan çalışmalarda, betonda çatlamlar meydana geldiği bildirilmiştir [8-10]. Portland çimentosu ve cam tozu yer değiştirilerek üretilen betonlarla ilgili de araştırmalar yapılmıştır. Cam tozu içerisinde önemli miktarda sodyum oksit (Na₂O) bulunmaktadır ve sıradan bir Portland çimentosu klinkerinin içerisinde kullanılmasıyla C₂S ve C₃A'nın farklı modifikasyonlarını kararsızlaştırmada önemli bir rol oynamaktadır. Na₂O, alüminat kristal sistemini kübikten ortorombik olarak değiştirebilen ve böylece bu fazın hidrasyon aktivitesini değiştirebilen tek yabancı oksittir. CaSO₄ ile birlikte kullanıldığında ilk hidrasyon ürünlerini oluştururlar ve bunlar Denklem 1 ve 2'de verilen etrenjit, (C₃A·3Cs·32H), ve monosülfat, (C₃A·Cs·12H), tuzlarıdır.



Etrenjit ve monosülfat pozitif zeta potansiyeline sahip olup, çimentoya göre birkaç kat daha yüksek bir yüzey alanına sahiptir. Dolayısıyla, temel olarak negatif yüklü süper akışkanlaştırıcılar gibi katkı maddeleriyle etkileşimlerden sorumludurlar. Bu nedenle, alüminat fazı için, sodyum ile doplama, polimorfizm ve hidrasyon davranışları arasında, özellikle katkı maddeleri ile etkileşimle ilgili olarak önemli bir ilişki vardır.

Portland çimentosu üretiminde atık camın içerisindeki silisin hammadde olarak kullanılması üzerinde de çalışılmış, ancak üretilen bu çimentoların alkali miktarında artışlar olduğu görülmüştür. Bu çimentonun bir diğer mahsuru da, 2CaSO₄·K₂SO₄ ürünü oluşturarak çimentonun priz süresini kısaltması olmuştur. Olumlu tarafı ise, kür sıcaklığının artırılmasıyla cam tozunun puzolanik aktivitesinin iyileşmiş olmasıdır [11]. Tane boyutu 100 µm'den küçük olan cam tozlarının, harc numunelerinde basınç dayanımı etkili bir şekilde artırdığı bildirilmiştir [12-13]. Puzolanik özelliğe sahip olan cam tozu ile Portland çimentosunun Denklem 3'te verilen kimyasal reaksiyonundan kalsiyum-silikat-hidrat ürünü (C-S-H), oluşmuştur [14].



Literatürde değişik sınıflarda uçucu küller kullanılarak üretilmiş yığma yapı briketleri mevcuttur. Uçucu kül kullanılarak üretilen yığma yapı briketlerini, kullanılan malzemeler bakımından aşağıda verilen üç sınıfa ayırmak mantıklı olacaktır;

- 1) C sınıfı kül ile Portland çimentosunun birlikte kullanılmasıyla üretilen yığma yapı briketleri,
- 2) C veya F sınıfı uçucu küller ile kimyasal katkı (alkali çözelti) kullanılarak üretilen geopolimer yığma yapı briketleri,
- 3) Sadece C sınıfı uçucu kül ya da C sınıfı uçucu kül ile kireç kullanılarak üretilen yığma yapı briketleri.

Dolayısıyla, bu çalışmada üretilen yığma yapı briketlerinin muadili olan, sadece bağlayıcılık özelliğine sahip uçucu külle üretilmiş yığma yapı briketleriyle ilgili aşağıdaki çalışmalar verilmiştir.

Tokuyay ve Çetin [15] Soma-B termik santrali C sınıfı uçucu külü ve kireç kullanarak yığma yapı briketleri üretmiştir. Bu çalışmada ağırlıkça %60 uçucu kül ile %40 hidrate kireç suyla nemlendirilmiş, bu karışım kalıp içerisinde 23,4 MPa'lık basınçla sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan briketler kalıptan çıkarıldıktan sonra, 67 °C sıcaklıkta, %100 bağıl nem ortamında 8 saat buhar kürüne maruz bırakılmıştır. Belirtilen sürenin sonunda, briketler buhar küründen çıkarılmış ve su sıcaklığı 23 °C olan kür havuzunda 7, 28 ve 90 gün boyunca kür edilmiştir. Üretilen briketlerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 44, 47 ve 45 MPa bulunmuştur. Basınç dayanımlarının yanında, briketlerin birim ağırlık ve su emme değerlerini de belirlenmiştir. Üretilen briketlerin ilgili standartlarda belirtilen sınır değerleri sağladığı bildirilmiştir.

Turgut [16-18] Kangal Termik Santrali külünü değişik atık malzemelerle birlikte kullanarak yığma yapı briketleri üretmiştir. Briketlerin üretimi işleminde, toz haldeki malzemeler birlikte karıştırılmış, suyla nemlendirilmiş ve bu karışımlar çelik kalıp içerisinde 20 MPa'lık basınçla sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işleminden hemen sonra, briketler kalıptan çıkartılmıştır. Üzerleri nemli bezle örtülen briketler, oda sıcaklığında 48 saat bekletilmiştir. Belirtilen süre içerisinde, bez örtü kaldırılarak briketlerin üzerine günde birkaç defa su püskürtülmüştür. 48 saat sonunda, sıcaklığı 22 °C olan su içerisinde 7, 28 ve 90 gün kür edilmiştir. Briketlerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının yanında, diğer bazı özellikleri de incelenmiştir. Ağırlıkça %78 uçucu kül ve %22 kalker tozu içeren briketlerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 15, 15 ve 18 MPa olmuştur [16]. Diğer çalışmada, briketler içerisinde ağırlıkça %18 uçucu kül, %78 kalker tozu ve %4 silis dumani kullanılmış ve 7, 28, 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 21, 23 ve 27 MPa'a ulaşmıştır [18]. Ağırlıkça %28 uçucu kül, %50 kalker tozu ve %22 atık cam tozu kullanılan briketlerin 7, 28 ve 90 günlük dayanımları sırasıyla 17, 24 ve 34 MPa olmuştur. Turgut [19] tarafından yapılan bir

çalışmada, briket üretim yöntemi değiştirilerek uçucu kül, hidrate kireç ve cam tozundan briketler üretilmiştir. Ağırlıkça %67 uçucu kül, %7 hidrate kireç ve %27 cam tozu 1 dakika kuru olarak karıştırılmış ve daha sonra bu kuru karışım üzerine su ve süper akışkanlaştırıcı eklenerek, 4 dakika daha karıştırmaya devam edilmiştir. Kalıplara konulan taze karışımlar 1 dakika süreyle masa tipi vibratörde sıkıştırılmıştır. Kalıpların açık olan yüzeyi plastik bir örtü ile kapatılmış ve 70 °C sıcaklıktaki etüv içerisinde 24, 48, 72 ve 96 saat kür edilmiştir. 72 saat kür sonunda en büyük basınç dayanımı elde edilmiş ve değeri yaklaşık 50 MPa olmuştur. Üretilen briketlerin basınç dayanımı, birim ağırlık, su emme ve kılcal su emme değerleri ilgili standartlarda verilen sınır değerleri sağlamıştır. Yukarıda belirtilen briketlerin üretiminde Portland çimentosu kullanılmamıştır.

Bu çalışmada kullanılan Kangal Termik Santrali uçucu külü, ASTM C618 [3], TS EN 197-1 [4] ve TS EN 450 [5] standartlarına uymadığından beton üretimi sektöründe kullanılmamaktadır. Söz konusu uçucu kül termik santral içerisinde nemlendirildikten sonra, taşıyıcı bantlar yardımıyla atık depolama alanlarına taşınmaktadır. Söz konusu uçucu kül ilgili standartları sağlamamakla birlikte, C sınıfı uçucu küldeki gibi bağlayıcılık özelliğine sahiptir. Bu çalışmada Kangal Termik Santrali uçucu külünün bağlayıcılık özelliğinden faydalanılarak, atık cam tozu ve kireç kullanılarak kendiliğinden yerleşen yığma yapı briketleri üretilmiştir. Üretilen yığma yapı briketlerinin kendiliğinden yerleşen olması ve taze karışımların 70 °C sıcaklıktaki etüv içerisinde 24 saat kür edilerek kalıplardan erken çıkarılması bir yeniliktir. Üretilen briketlerin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları, 56 günlük birim ağırlık, su emme, kılcal su emme, ısıl iletkenlik değerlerinin yanında, mikro yapıları da TEM analiziyle incelenmiştir. Elde edilen test sonuçları, yığma yapılarında kullanılan briketlerle ilgili ulusal ve uluslararası standartlarda verilen sınır değerleriyle karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kullanılan malzemelerin özellikleri

Bu çalışmada, Kangal Termik Santrali uçucu külü bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Malzemelerin kimyasal kompozisyonları Tablo

2’de verilmiş ve uçucu kül “FA”, atık cam tozu “G” ve hidrate kireç ise “L” harfleriyle gösterilmiştir. Uçucu külün CaO miktarı %32,7’dir ve %10’dan daha büyük olduğundan TS EN 197-1’de [4] belirtilen kalkerli kül sınıfına uymuştur. SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ oksitlerinin toplamı %44,5’tir ve bu toplam %50’den daha küçük olduğundan ASTM C618 [3] standardına uymamıştır. Ancak SiO₂ miktarı %26,8 olduğundan TS EN 197-1’in [4] belirttiği CaO’ın %10 daha fazla olması durumunda, en az %25 SiO₂ gerekliliği koşulunu sağlamıştır.

SO₃ değeri %12,1’dir ve ASTM C618’deki [3] %5 ve TS EN 450’deki [5] %3 sınır değerlerinden oldukça büyük olmuştur. ASTM C618 [3] ve TS EN 197-1 [4] sınıflandırmalarına uymasa da, Kangal Termik Santrali uçucu külünün bağlayıcı özelliğe sahip olduğu daha önceki çalışmalarda görülmüştür [16-19]. Uçucu küldeki serbest CaO miktarı %3,46’dır ve TS EN 450’de [5] belirtilen en fazla %1 olması gereken sınır değerinden daha büyük olmuştur. Atık cam tozu bir geri dönüşüm firmasından temin edilmiş olup, menşei atık beyaz pencere camıdır. Cam tozunda SiO₂ ve Na₂O değerleri yüksek olmuştur. Çalışmada hidrate olmuş toz kireç kullanılmıştır. Uçucu kül, hidrate kireç ve atık cam tozundaki Cl⁻ değerleri %0,3 civarında olmuştur.

Tablo 2. Malzemelerin kimyasal özellikleri

Bileşik formülü, %	Miktarlar, %		
	FA	G	L
CaO	32,7	10,1	70,1
SiO ₂	26,8	68,1	0,9
Fe ₂ O ₃	5,7	0,6	0,1
Al ₂ O ₃	12,0	1,3	0,2
SO ₃	12,1	0,3	1,0
K ₂ O	0,8	0,1	-
Na ₂ O	1,6	13,8	0,5
MgO	4,3	3,1	1,3
K.K.	2,4	0,4	25,7
Serbest CaO	3,46	-	-

Uçucu kül, cam tozu ve kirecin özgül yüzey alanları sırasıyla 216,9; 207,9; 583,1 m²/kg ve yoğunlukları

da 2360, 2350 ve 2240 kg/m³ olarak bulunmuştur. YapıChem firmasının polikarboksilik eter esaslı yeni nesil süper akışkanlaştırıcısı kullanılmıştır (SA). Süper akışkanlaştırıcının yoğunluğu 1,092 kg/m³, pH değeri 7,03 ve katı madde oranı %35,5’dir.

2.2. Numunelerin üretimi

F, 10F1L4G, 10F2L3G, 10F3L2G ve 10F4L1G olarak isimlendirilen, kendiliğinden yerleşen 5 farklı briket üretilmiştir. F briketi sadece uçucu kül içermektedir ve bu briket F sınıfı ismi verilmiştir. 10F1L4G, 10F2L3G, 10F3L2G ve 10F4L1G numuneleri ise, uçucu kül, kireç ve cam tozu içermektedir ve bu numunelere de FLG sınıfı ismi verilmiştir. Harflerden önce verilen rakamlar, o malzemenin karışımdaki ağırlıkça birim miktarlarını göstermiştir. Briket numuneleri oluşturan malzemelerin miktarları Tablo 3’te verilmiştir. Karışımlarda Su/(F+L) oranı sabittir ve değeri 0,38’dir. Toz malzemelerin (F, L ve G) toplam ağırlığının %1,5’u kadar süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Toz malzemeler 1 dakika kuru olarak karıştırılmış ve mikser çalışmaya devam ederken, su ve süper akışkanlaştırıcı kuru karışım üzerine dökülmüştür. Karıştırma işleminde HOBART marka karıştırıcı kullanılmış ve karıştırma hızı 295 rpm seçilmiştir. Taze karışımlar akışkan duruma gelinceye kadar, karıştırma işlemine devam edilmiştir.

Akışkan haldeki taze karışımlar kalıplara dökülmüş ve kalıplara kendiliğinden yerleşmiştir. Kalıpların açık olan yüzeyleri plastik örtüyle kapatılmıştır. Ayrıca etüv içerisinde nem oluşturmak için içi su dolu bir kap kullanılmıştır. Taze karışımlar 70 °C sıcaklıktaki etüv içerisinde 24 saat kür edilmiştir. 24 saat sonra etüvün çalışması durdurulmuş ve kalıpların içerisindeki numunelerin sıcaklığı kendiliğinden oda sıcaklığına ulaşmıştır. Daha sonra, sertleşmiş numuneler kalıplardan çıkartılmış ve su sıcaklığı 23 °C kür havuzunda 7, 28 ve 56 günlük sürelerde kür edilmiştir. Daha önce yapılmış çalışmalarda [15-18], taze karışımlar kalıp içerisine belirli bir basınçla sıkıştırılmış ve briketler kalıptan çıkarılmıştır. Uçucu külün hidrasyon hızının yavaş (Portland çimentosundaki C₂S ana bileşenine benzer) olması nedeniyle, üretilen briketlerin su

içerisinde dağılmasını önlemek için 48 saatlik bekleme süresinden sonra kür havuzuna yerleştirilmiştir. Bu durumda, briketlerin üretim süresi uzamıştır.

Tablo 3. Karışım miktarları, kg/m³

Numune adı	FA	L	G	Su	S.A.
F	1038	-	-	394	16
10F1L4G	787	79	315	329	18
10F2L3G	861	172	258	393	19
10F3L2G	836	251	167	413	19
10F4L1G	835	334	83	444	19

2.3. Yapılan testler

Karışıma giren uçucu kül, kireç ve cam tozu malzemelerin pH değerleri bulunmuştur. Bu işlem için, içerisinde 40 mL saf su bulunan cam bir tüp içerisine 20×10⁻³ kg toz malzeme konulmuş, tüpün kapağı kapatılmış ve 60 s boyunca çalkalanmıştır. Bu süre sonunda, sıvının pH değeri ölçülmüştür. Taze karışımların pH değerleri ise, karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra bulunmuştur. Sertleşmiş 56 günlük numunelerin pH değerlerinin bulunması işlemi ise, sertleşmiş numuneler öğütülmüş ve 150 µm ince elekten geçirilmiştir. İçerisinde 40 mL saf su bulunan cam bir tüp içerisine 20×10⁻³ kg toz malzeme konulmuş, tüpün kapağı kapatılarak 60 s boyunca çalkalanmış ve sıvının pH değeri ölçülmüştür.

Numunelerin akışkan duruma geldiği andaki karıştırma süreleri ve yayılma değerleri bulunmuştur. İç çapları 0,07 ve 0,100 m, yüksekliği 0,06 m olan kesik mini huni yardımıyla karışımların çökme-yayılma değerleri bulunmuştur.

7, 28 ve 56 gün kür edilmiş, 50 mm'lik küp numuneler kullanılarak basınç dayanımları bulunmuştur. 56 gün kür edilmiş, 45 mm çapında, 90 mm yüksekliğinde numuneler üzerinden birim ağırlık, ısı iletkenlik, su emme ve kılcal su emme değerleri belirlenmiştir. 56 gün kür edilmiş numuneler kullanılarak mikro-yapı incelemeleri de yapılmıştır. Her bir test için üç adet numune

kullanılmış ve bunların ortalama değeri hesaplanmıştır.

Basınç dayanımı testi ASTM C109 [20] standardına göre yapılmıştır. Test işleminde 900 kN yük kapasiteli ve yükleme hızı 18 kN/s olan cihaz kullanılmıştır. Basınç dayanımı değeri aşağıdaki Denklem 4 ile hesaplanmıştır.

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (4)$$

Bağıntıdaki f_m numunenin basınç dayanımını (MPa), P kırılma yükünü (N) ve A kesit alanını (mm²) göstermektedir.

ASTM C 642'ye [21] göre numunelerin birim ağırlık ve su emme testleri yapılmıştır. Numuneler 110 °C sıcaklıktaki etüv içerisinde 24 saat kurutulmuş ve hassas terazide tartılmıştır. Numunenin ağırlığı görünen hacmine bölünerek birim ağırlık Denklem 5 ile bulunmuştur.

$$d = \frac{G}{V} \quad (5)$$

Burada, d numunenin birim ağırlığı (kg/m³), G kuru ağırlığı (kg) ve V silindirik şekilli numunenin hacmidir (m³).

Kılcal su emme testinde φ45×90 mm numune kullanılarak, TS EN 772-11 [22] standardına göre yapıldı. Kuru haldeki numunelerin yan yüzeyleri su geçirmez plastik bantla sarılmıştır. Numunelerin 45 mm çapındaki yüzeyleri 5 mm su içerisinde kalacak şekilde yerleştirilmiştir. 3×10², 6×10², 18×10², 36×10², 144×10² ve 864×10². s'de numuneler tartılmış ve ağırlık artışları kaydedilmiştir. Başlangıçtaki numune ağırlıkları ve belirtilen sürelerde bulunan ağırlık değerleri farkı hesaplanarak kılcal su emme değerleri Denklem 6 yardımıyla bulunmuştur.

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad (6)$$

Numunenin suyla temas eden yüzey alanı A (m²), yüzeyin temas süresi t (s), emilen su miktarı Q (m³) ve kılcal su emme k (m.s^{-0.5}) olarak gösterilmiştir.

Kuru haldeki φ45×90 mm numuneler tartılarak ağırlıkları kaydedildi. Numuneler 21 °C suda 48

saat bekletildi. Belirtilen sürenin sonunda, numuneler sudan çıkarılmış ve yüzeyleri nemli bezle kurutularak tartılmıştır. Su emme miktarı aşağıda verilen Denklem 7 ile hesaplanmıştır.

$$S_h = \left(\frac{B - G}{G} \right) \times d \quad (7)$$

Burada, B numunenin suya doygun yüzey kuru ağırlığı (kg), G kuru ağırlığı (kg), d birim ağırlığı (kg/m^3) ve S_h hacimce su emme (kg/m^3) değeridir.

Numunelerin ısı iletkenlik değerleri, sıcak tel yöntemine göre çalışan KEM QTM-500 cihazıyla oda sıcaklığında ASTM C 1113M-09 [23] standardına göre ölçüldü. Malzeme içerisindeki sıcaklık farklılığından kaynaklanan enerjinin bir noktadan diğer bir noktaya taşınması olayı ısı iletkenlik olarak isimlendirilmektedir. Malzemelerin ısı yalıtımının hesaplarında kullanılan bir parametredir. Isı iletkenlik Denklem 8 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot A} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (8)$$

Burada, k ısı iletkenliktir. $\Delta Q/\Delta t$ birim zamanda taşınan ısı miktarıdır. $\Delta T/\Delta x$ malzeme içerisinde belirlenmiş noktalar arasındaki sıcaklık farkıdır. A , sıcaklık farklarının ölçüldüğü noktadaki yüzey alanıdır.

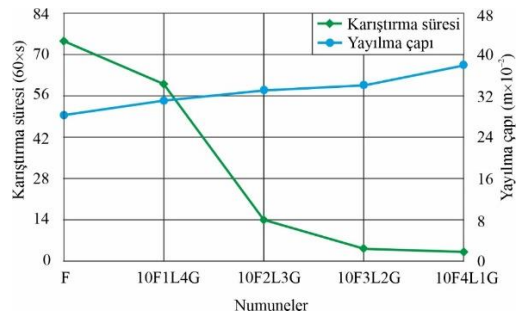
3. Bulgular ve Tartışma

Briket numunelerin üretiminde kullanılan toz malzemelerin, taze karışımların ve 56 günlük sertleşmiş numunelerin pH değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Kirecin pH değeri en büyük, cam tozunun ise en küçük bulunmuştur. Uçucu külün pH değeri 13.0 olmuştur. Karışım içerisinde cam tozu miktarı artınca, taze karışımın pH değeri de artmıştır. En fazla cam tozu içeren taze karışımın pH değeri de en büyük olmuştur. pH'deki değişikliğin, numunelerdeki Na_2O oranının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü Na_2O ilavesi, özellikle başlangıçtaki taze karışımlarda FLG sisteminin hidrasyon hızını hızlandırmakta çok etkilidir. Bu durum, harçtaki çözeltinin pH değerini artırabilen ve karışım bileşenlerinin çözünmesini hızlandırabilen Na_2O kaynaklı Na iyonlarının varlığına bağlanabilir.

Tablo 4. Toz malzemeler, taze karışımlar ve sertleşmiş numunelerin pH değerleri

Toz malzemeler			Numuneler					
FA	G	L	F	10F1L4G	10F2L3G	10F3L2G	10F4L1G	
13,0	8,5	13,5	Taze karışımlar	13,0	13,6	13,4	13,3	13,2
			Sertleşmiş numuneler	9,6	10,4	10,3	10,5	10,7

Şekil 1'de taze karışımların akışkan duruma geldiği süreler ve bu sürelerdeki çökme-yayılma değerleri gösterilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, karışım içerisinde kireç miktarı arttıkça, karışımın akışkan duruma gelmesi için gerekli olan süre oldukça kısalmış ve yayılma çapı değerleri de artmıştır.

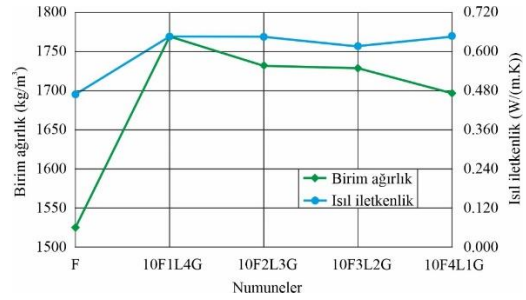


Şekil 1. Karıştırma süresi ve çökme-yayılma çapları

Örneğin, sadece uçucu kül içeren F karışımının akışkan duruma gelmesi için gerekli karıştırma süresi 45×10^2 s ve yayılma çapı 0,29 m olurken, karışımındaki kirecin etkisiyle 10F2L3G karışımında bu süre $8,4 \times 10^2$ s ve yayılma çapı da 0,34 m olmuştur. Daha fazla kireç içeren 10F3L2G ve 10F4L1G karışımlarının akışkan duruma gelmeleri için gerekli karıştırma süreleri sırasıyla 240 ve 180 s, yayılma çapları da sırasıyla 0,35 ve 0,39 m olmuştur. Değişik oranlarda hidrate kireç içeren 10F1L4G, 10F2L3G, 10F3L2G ve 10F4L1G karışımlarının akışkan duruma gelmeleri için gerekli süreler, sadece uçucu kül içeren F karışımına kıyasla sırasıyla 1,25; 5,36; 18,75 ve 25 kat azalmıştır. Sadece uçucu kül içeren F karışımına kıyasla, yayılma çapları da 1,10; 1,17; 1,21 ve 1,34 kat daha büyük olmuştur. Kireç ile süper akışkanlaştırıcı arasındaki iyi etkileşimden kaynaklanan itme kuvvetinin artmış olması, toz malzemelerin topaklaşmasını önleyip akışkanlaşma süresini azaltmış olabilir.

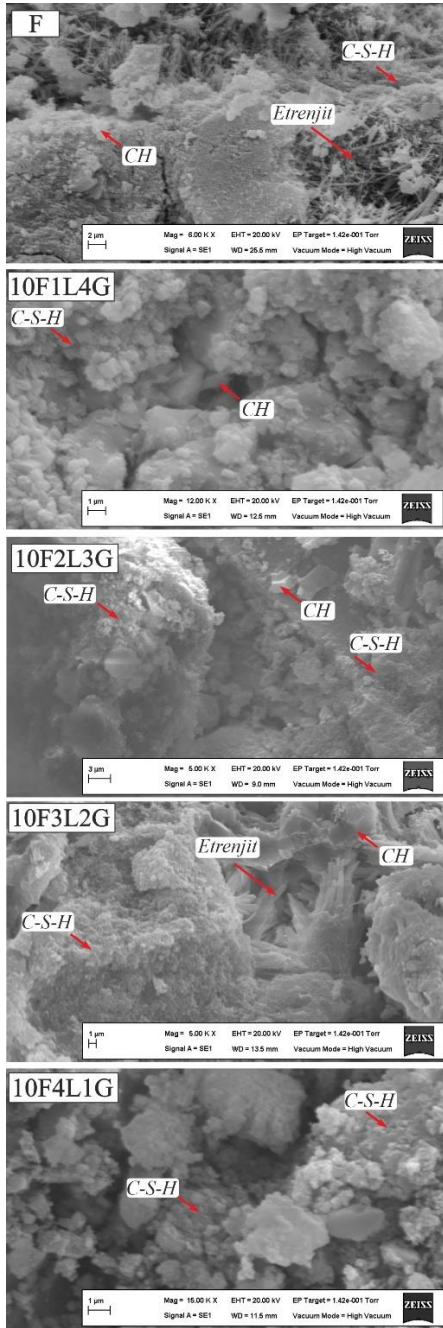
Numunelerin birim ağırlık ve ısı iletkenlik değerleri Şekil 2'de verilmiştir. Uçucu kül, cam tozu ve kireçle üretilen FLG numunelerinin birim ağırlık değerleri, sadece uçucu kül kullanılarak üretilen numuneden daha büyük olmuştur. 10F1L4G numunesinde birim ağırlık değeri artmıştır. Karışım tasarımında, FLG numunelerinin tümünde cam tozu miktarı artırılırken, kireç miktarı da azaltılmıştır. FLG numunelerinde cam tozu miktarı artırıldığında birim ağırlıkların artma nedenlerinden birisi, cam tozunun yoğunluğunun (2350 kg/m^3) kirecin yoğunluğundan (2240 kg/m^3) daha büyük olmasıdır. Sadece uçucu külden üretilmiş olan F numunesinin ısı iletkenlik değeri, cam tozu içeren FLG numunelerinin ısı iletkenlik değerlerinden oldukça küçüktür. Birim ağırlık değeri en küçük olan F numunesinin boşluklu yapısından dolayı bu beklenen bir durumdur (Şekil 2). Boşluğun içerisindeki havanın ısıyı iletme kabiliyeti zayıf olduğundan, F numunesinin ısı iletkenlik değeri azalmıştır. Numunelerin taramalı elektron mikroskop (TEM) görüntülerinde (Şekil 3), F numunesinde aşırı miktarda etrenjit ürünü ve boşluk olduğu görülmüştür. Ancak FLG numunelerinin içyapısında hemen hemen hiç etrenjit görülmemiştir ve numune içerisindeki cam tozu miktarı arttıkça daha sıkı ve boşluksuz bir yapı

oluşturmuştur (Şekil 4). Daha sıkı ve yoğun içyapıya sahip olan tüm FLG numunelerinin ısı iletkenlik değerleri arasında fazla bir fark meydana gelmemiştir. Şekil 4'te numunelerin normal ve kılcal su emme değerleri gösterilmiştir. En fazla cam tozu içeren ve birim ağırlık değeri en büyük olan 10F1L4G numunesindeki normal su emme değeri en az olmuştur. Numuneler içerisindeki cam tozu miktarları arttığında, numunelerin normal su emme değerleri azalmıştır. Şekil 3'te görüldüğü gibi, numuneler içerisinde cam tozu miktarı artışı ile normal su emme değerindeki azalma değerleri arasında yaklaşık doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür.



Şekil 2. Birim ağırlık ve ısı iletkenlik değerleri

Şekil 3'de gösterilen TEM görüntülerinde, gözlemsel olarak cam tozu içeren numunelerin çok yoğun C-S-H yapısına sahip olduğu görülmüştür. Burada muhtemelen iki farklı türde reaksiyon oluşmuştur. Birincisi, uçucu külün kendi bünyesinde meydana gelen reaksiyonlardan (birincil C-S-H oluşumu) sonra, puzolanik özelliğe sahip olan cam tozu arta kalan CH'i tüketmiş ve ikincil bir C-S-H ürünü oluşturmuştur. İkincisi ise, karışım içerisindeki kireç (CH) ile cam tozu reaksiyona girerek üçüncül bir C-S-H yapısı oluşturmuş olabilir. İleri sürülen bu durumların doğrulanması için termogravimetrik analizlerin yapılması gereklidir. Şekil 3'de gösterilen TEM görüntülerinde ilginç olan durum şudur ki, F numunesinde bol miktarda etrenjit oluşmasına rağmen, çok az olmakla birlikte 10F3L2G numunesi hariç, cam tozu içeren numunelerde etrenjit ürününe hemen hemen hiç rastlanmamıştır.



Şekil 3. TEM görüntüleri

Numunelerin kılcal ve normal su emme durumları birbirine benzer olmuştur. Örneğin, numunelerin içerisindeki cam tozu miktarı arttığında, kılcal su emme değerleri de azalmıştır. 10F4L1G numunesinin kılcal su emme değeri en büyük olmuştur. Normal ve kılcal su emme değerleri, 10F1L4G numunesinde en az olmuştur. Yığma yapıların taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan duvarlarında kullanılan briketlerin su emme değerinin 288 kg/m³'ten daha az olması gerektiği ASTM C 140'ta [24] belirtilmiştir. Üretilen numunelerin hepsi bu sınır değeri sağlamış olup, F, 10F1L4G, 10F2L3G, 10F3L2G ve 10F4L1G numunelerinin su emme değerleri sırasıyla 189, 108, 117, 143 ve 170 kg/m³ olmuştur. Piyasada kullanılan bims betonun kılcal su emme değeri 5,41 ile $6,47 \times 10^{-5} \text{ m} \times \text{s}^{-0.5}$ değerleri arasında değişmektedir [25]. Şekil 4'te gösterildiği gibi, tüm numunelerin kılcal su emme değerleri, bims betonun kılcal su emmesinden çok daha küçük olmuştur.

7, 28 ve 56 gün kür edilmiş numunelerin basınç dayanımı değerleri Şekil 5'te verilmiştir. Bağlayıcılık özelliği olan C sınıfı uçucu külün su ile reaksiyonu sonucunda oluşan hidrasyon ürünleri Denklem 9-12'de verilmiştir [26]. C-S-H, C-A-H, C-A-S-H ve C-A-CS-H ürünleri sırasıyla kalsiyum silikat hidrat, kalsiyum alüminat hidrat, kalsiyum alüminat silikat hidrat ve kalsiyum alüminat kalsiyum sülfat hidratlarıdır.

Şekil 5'te görüldüğü gibi, salt uçucu kül içeren F numunesinin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları sırasıyla 16,7; 43,3 ve 48,5 MPa'dır. Bu çalışmadaki salt uçucu kül içeren numunelerin basınç dayanımlarının yüksek olmasının muhtemel nedenleri şunlar olabilir. Turgut [17] tarafından yapılan çalışmada, kontrol numunesi içerisinde 327 kg/m³ uçucu kül ve 1463 kg/m³ inert kireçtaşı tozu bulunan taze karışımın 20MPa'lık basınçla sıkıştırılmasıyla üretilen briketin 90 günlük nihai basınç dayanımı 18 MPa olmuştur. Ancak, bu çalışmadaki kontrol numunesi içerisindeki uçucu kül miktarı ise 1038 kg/m³'tür. Bu çalışmada 1 m³ karışım içerisindeki salt uçucu kül miktarının fazla olması, numunenin basınç dayanımının yüksek olmasının (48,5 MPa) nedenlerinden birisi olabilir. Diğer taraftan, basınç dayanımındaki artış hem karışımda süper akışkanlaştırıcı kullanılması hem de uzun karıştırma süresinden de (75 dakika)

kaynaklanmış olabilir. Chi ve Huang [27], C sınıfı uçucu küllerin tane yapıları genellikle iri, açılal, plaka şeklinde, oldukça düzensiz bir şekle sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumda, tanelerin özgül yüzey alanı artarken, hidrasyon olayının etkili bir şekilde gerçekleşebilmesi için gerekli olan karışım suyu ihtiyacı da artmaktadır. Dolayısıyla, uçucu külün bu türlerinde uygun süper akışkanlaştırıcının kullanılması zorunlu olmaktadır.

Xie ve Kayali [28] polikarboksilik esaslı süper akışkanlaştırıcı ile C sınıfı uçucu külün etkileşimini incelemişlerdir. C sınıfı uçucu kül içerisinde aşırı miktarda kalsiyum iyonlarının bulunmasından dolayı, polikarboksilik esaslı süper akışkanlaştırıcının bu uçucu kül üzerinde iyi bir dispersiyon yaptığını ileri sürmüşlerdir. Karışım suyuyla temas eden uçucu kül tanelerinin yüzey alanının artmasına bağlı olarak, hem hidrate olan tane sayısı artmış hem de işlenebilirliğinin iyileşmesi sayesinde taze karışımın kalıptaki doluluk oranı artmıştır. Karışım suyunun uçucu küldeki CaO kısmıyla teması ve dış kabuğunun çatlayarak daha iç kısımlara hareket etmesi de önemlidir. Böylece, CaO tanelerinin çekirdek kısmına yakın yerlerde de hidrasyon olayı meydana gelmektedir. Bunun yanında, uçucu kül içerisindeki SO₃ miktarının fazla olması da C sınıfı uçucu külün kendiliğinden bağlayıcılık özelliğini artırmaktadır [29]. Wu ve ark. [30] kimyasal kompozisyonu bu çalışmadaki uçucu küle benzeyen bir tür uçucu kül kullanarak çimentosuz gaz beton üretmişlerdir. Bu çalışmalarında, süper akışkanlaştırıcının uçucu kül üzerindeki etkisini de detaylı bir şekilde araştırmışlardır. Süper akışkanlaştırıcı etkisiyle makro düzeydeki uçucu kül topaklaşmasının azalarak yerini mikro düzeydeki topaklaşmalara bıraktığını ve böylece makro düzeydeki topaklaşmalar içerisindeki hapsolmüş karışım suyunun daha fazla uçucu kül tanesinin etrafını sardığını belirtmişlerdir. Süper akışkanlaştırıcının kullanılmasının gaz betonların basınç dayanımında artışlar meydana getirdiğini ileri sürmüşlerdir.

Sheng ve ark. [31] ile Lee ve Kim [32], bağlayıcılık özelliği olan C sınıfı uçucu kül taze karışımındaki pH değerinin 12.8'e yükselmesinin, uçucu kül içerisindeki reaktif silikatın çözünmesinin

kolaylaştırdığını bulmuşlardır. Bunun sonucu olarak, C-S-H ve Aft ürünlerinin oluşumu hızlanırken, C-S-H miktarının artışına bağlı olarak basınç dayanımı da artmaktadır. Bu çalışmada, Tablo 4'te verildiği gibi, taze kontrol numunesi (F) karışımındaki pH değerinin 13'e yükselmesi basınç dayanımındaki artışın bir diğer nedeni olabilir. Literatürde C sınıfı uçucu küllerin kendiliğinden bağlayıcılık özelliği kullanılarak, yüksek basınç dayanımı elde edilen bazı ürünler bulunmaktadır. Shon ve ark. [33] ağırlıkça %60 oranında bağlayıcılık özelliğine sahip C sınıfı uçucu kül, %7 F sınıfı uçucu kül, %3 sönmüş kireç ve %30 kum kullanarak, 28 günlük basınç dayanımı yaklaşık 40 MPa olan briket üretmişlerdir. Zhang ve Qiu [34] ise, C sınıfı uçucu külü ile F sınıfı uçucu külü birlikte kullanarak, 28 günlük basınç dayanımı 32,5 ile 42,5 MPa arasında değişen malzemeler üretmişlerdir.

7 günlük numunelerde, 10F1L4G numunesinin basınç dayanımı değeri (32MPa) en yüksek olurken, 28 günlük numunelerde 10F2L3G'nin basınç dayanımı değeri (52,7MPa) olmuştur. 56 günlük numunelerde ise, 10F1L4G numunesinin basınç dayanımı değeri en büyük olup, değeri 67,5MPa ulaşmıştır. Görüldüğü gibi, tüm kür sürelerinde, karışım içerisindeki cam tozu miktarı yüksek olan numunelerin basınç dayanımı değerleri en büyük olmuştur. ASTM C 90 [35] standardında, yığma yapıların yük taşıyan kısımlarında kullanılacak briketlerin 28 günlük kür sonundaki basınç dayanımı değerinin en az 11,7 MPa olması gerektiği belirtilmiştir. 7 günlük kür süresinde dahi numunelerin tamamının basınç dayanımı değerleri 11,7 MPa değerinden çok daha büyük olmuştur.

Şekil 5'te görüldüğü gibi, 7 günlük numunelerin içerisindeki cam tozu artış miktarı ile basınç dayanımı artışı arasında doğrusal bir ilişki gözlenmiştir. Karışım içerisinde ağırlıkça 1 (10F4L1G), 2 (10F3L2G), 3 (10F2L3G) ve 4 (10F1L4G) birim cam tozu içeren 7 günlük FLG numunelerinin basınç dayanımı değerleri, cam tozu içermeyen 7 günlük F numunesine kıyasla %44, %55, %70 ve %92 daha büyük olmuştur.

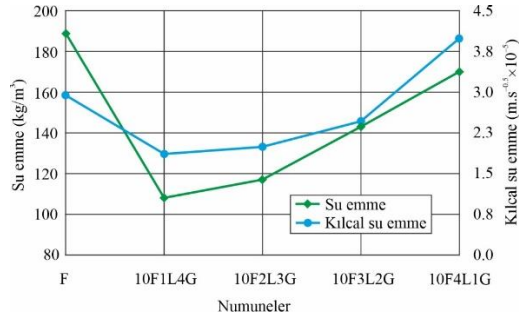
28 günlük numuneler içerisinde, 3 ve 4 birim cam tozu içeren 10F2L3G ve 10F1L4G numunelerinin basınç dayanımları, diğer numunelerden daha

büyük büyük olmuştur. 10F2L3G ve 10F1L4G numunelerinin basınç dayanımı değerleri birbirlerine yakın olup, sırasıyla 51,4 MPa ve 52,7 MPa'dır. Aynı numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları birbirleriyle kıyaslandığında, F numunesinin 28 günlük basınç dayanımı, 7 günlük dayanımından %159 daha büyük olmuştur. 10F1L4G, 10F2L3G, 10F3L2G ve 10F4L1G numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı değerleri ise, 7 günlük basınç dayanımı değerlerinden sırasıyla %60, %86, %77 ve %89 daha fazladır. Cam tozu içeren 10F1L4G, 10F2L3G, 10F3L2G ve 10F4L1G numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı değerleri, cam tozu içermeyen F numunesinin 28 günlük basınç dayanımı değerinden sırasıyla %19, %22, %6 ve %5 daha büyük olmuştur. Buradan şu sonuç çıkarılabilir, cam tozu miktarı az olan 28 günlük numunelerin (10F3L2G ve 10F4L1G) basınç dayanımı değerleri, cam tozu içermeyen 28 günlük F numunesine kıyasla pek fazla artmamıştır.

Ağırlıkça 3 (10F3L2G) ve 4 (10F4L1G) birim cam tozu içeren 56 günlük numunelerde, basınç dayanımı değerleri yaklaşık olarak eşittir ve değerleri sırasıyla 67,5 MPa ve 67,4 MPa'dır. Aynı numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri de birbirlerine yakındır. Buradan şu sonuç çıkarılabilir ki, basınç dayanımı açısından ağırlıkça 3 birim cam tozu miktarında, karışım cam tozuna doymuştur ve daha fazla miktarlarda kullanılmasının basınç dayanımına katkısı yoktur. 56 günlük F numunesinin basınç dayanımı değeri, 28 günlük basınç dayanımı değerinden %12 daha büyük olmuştur. Cam tozu içeren 56 günlük 10F1L4G, 10F2L3G, 10F3L2G ve 10F4L1G numunelerinin basınç dayanımı değerleri ise, 28 günlük basınç dayanımı değerlerinden sırasıyla %31, %28, %36 ve %12 daha büyük olmuştur. Buradan şu sonuç çıkarılabilir ki, ağırlıkça 1 (10F4L1G) birim cam tozu kullanılmasının, 56 günlük basınç dayanımına katkısı hemen hemen hiç olmamıştır. Çünkü 56 günlük F numunesinin basınç dayanımı değeri, 28 günlük F numunesinin basınç dayanımı değerinden %12 daha büyük olmuştur ve aynı şekilde 56 günlük 10F4L1G numunesinin de basınç dayanımı değeri, 28 günlük 10F4L1G numunesinin basınç dayanımı değerinden %12 daha büyük olmuştur.

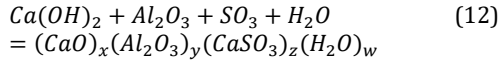
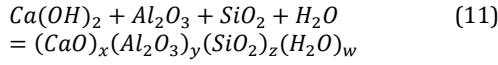
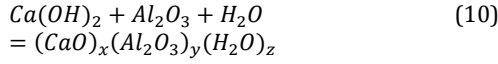
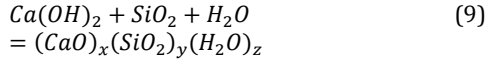
Numunelerin 56 ve 7 günlük basınç dayanımları birbirleriyle kıyaslanacak olursa, 56 günlük F, 10F1L4G, 10F2L3G, 10F3L2G ve 10F4L1G numunelerinin basınç dayanımı değerleri, 7 günlük basınç dayanımı değerlerinden sırasıyla %190, %110, %137, %141 ve %110 daha büyük olmuştur.

F, 10F1L4G, 10F2L3G, 10F3L2G ve 10F4L1G numunelerinde, 7 günden 28 güne basınç dayanımlarındaki artışlar sırasıyla %159, %60, %86, %77 ve %89 olurken, 28 günden 56 güne basınç dayanımlarındaki artış %12, %31, %28, %36 ve %12 olmuştur. Görüldüğü gibi, 28 güne kadar tüm numunelerin basınç dayanımlarında hızlı bir artış meydana gelmiştir. 28. günden sonra ise, basınç dayanımı artış hızı azalmıştır. Özellikle cam tozu içermeyen F ve ağırlıkça 1 birim cam tozu (10F4L1G) içeren numunelerdeki basınç dayanımı hızı azalmaları daha büyüktür. Ancak yeterli miktarda cam tozu içeren 10F1L4G, 10F2L3G ve 10F3L2G numunelerinde 28. günden sonra da önemli artışlar meydana gelmiştir. Bu durum, C-S-H hidrasyon ürününün artmasına neden olan cam tozunun puzolanik özelliğinin bir sonucudur. Üretilen bu numunelerden, 10F2L3G numunesi fiziko-mekanik ve ısıl özelliklerinin yanında akışkan duruma ulaşma süresinin kısa olması ve iyi bir kendiliğinden yerleşebilme sağlamıştır. 10F2L3G numunesindeki malzeme oranları kullanılarak briket üretilebilir. Ancak üretilen bu briketin dayanıklılık özelliklerinin de belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 4. Normal ve kılcal su emme değerleri

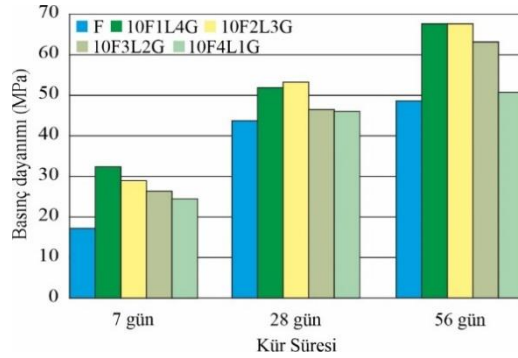
Şekil 3'te verilen TEM görüntülerinde, aşağıda verilen hidrasyon ürünlerinin bazıları görülmüştür.



Na₂O içermeyen hidrate olmuş uçucu külden üretilen briket numunede, ince altıgen plakalarla birlikte ince uzun yapılar görülmüştür. Morfolojik görünüşleriyle altıgen plakalar monosülfat, ince uzun yapılar ise etrenjit olarak tanımlanmıştır. Az veya fazla cam tozu miktarlarında, yani Na₂O katkılı numunelerde monosülfatın ve etrenjitin görünümü farklı olmuştur. Kristalimsi monosülfat ve etrenjit oluşumu, artan Na₂O miktarlarıyla gecikmiştir. Na₂O oranı arttıkça, kristalleşmesi gecikmiş amorf etrenjit ve monosülfat oluşmuş ve daha sonra bu fazlar kristaller oluşturmak için yeniden kristalleşmiştir. Kristalin ve etrenjitin morfolojisi üzerinde, pH'nin önemli bir etkiye sahip olmuştur. Bu durum, etrenjit ve monosülfatın amorf halden yeniden kristalleştirilmesi için de geçerlidir [36]. Dolayısıyla, FLG sistemlerinde Na₂O oranı artışıyla, etrenjit ve monosülfat kristalleri küçülmüş ve daha az kristalleşmiştir. Etrenjit ve monosülfatın farklı ebat ve morfolojik görünüşleri, numunelerdeki Na₂O oranının artmasından kaynaklanan pH değişiklikleriyle bağlantılıdır. Aynı etki, etrenjitin farklı pH değerlerinde kristalleşmesinden de iyi bilinmektedir. Etrenjitin kristalleşmesinin, pH değerinin yükselmesiyle azaldığı bazı araştırmacılar tarafından da bulunmuştur [37-38]. Söz konusu yapı, pH değerinin 11 olması durumunda, uzun ve ince olan yapıdan, kısa ve kalın olan görünüme dönüşmüştür.

Numuneler içerisindeki cam tozu miktarı artınca, tüm kür sürelerinde basınç dayanımı değerleri de artmıştır. Uçucu kül içeren numunelerde, erken dayanım sağlayan hidrasyon ürünü etrenjittir. Cam tozu içerisinde yüksek oranda Na₂O (%13,8) ve kullanılan uçucu külden SO₃ (%12,1) bulunması,

Denklem 1 ve 2'de verilen ilk hidrasyon ürünü etrenjit ve monosülfat tuzlarını oluşturmuştur. Oluşan etrenjit, kullanılan cam tozu oranına bağlı olarak erken yüksek basınç dayanımı sağlamıştır. C-S-H oluşumu ise, nihai dayanıma önemli katkıda bulunmuştur. Briket numune için kullanılan karışımlarda yüksek kalsiyum ve yüksek serbest kireçli uçucu külün bulunması, karışımın çözülmesine ve sistemin pH değerini artmasına neden olmuştur ve bu durum hidrasyonu başlatmıştır. Böylece, daha sonra hidrasyon olayına katılan cam tozunun çözünmesini arttırmıştır. Uçucu külün kendisi etrenjit üretmek için suyla reaksiyona girmiş, sertleşme ve başlangıçtaki güç kazancından sorumlu olmuştur. Cam tozundan çözülen bileşenler daha sonra uzun vadeli dayanım gelişiminden sorumlu olan C-S-H oluşumuna yol açmıştır [39]. Cam tozunun puzolanik etkisinden dolayı, cam tozu içeren numunelerin basınç dayanımlarında artışlar meydana gelmiştir.



Şekil 5. Basınç dayanımı değerleri

4. Sonuçlar

Bu çalışma, Portland çimentosu ve ilave kimyasal aktifleştiriciler kullanılmaksızın, sadece standart olmayan uçucu kül, atık cam tozu ve kireç kullanılarak kendiliğinden yerleşen yüksek dayanımlı briket üretme imkânı araştırılmıştır. Standartlara uymayan yüksek kireçli uçucu kül ve öğütülmüş atık cam tozu karışımlarının kireçle kuvvetli ve sulu faz gelişimi incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Kireç miktarı arttıkça karışımın akışkan hale gelmesi için gerekli olan süre oldukça azalmış ve

yayımla çapı değerleri de artmıştır. Hazırlanan taze karışımlar kalıp içerisine kendiliğinden yerleşmiştir.

- Yüksek Na₂O veya cam tozu içeriği, kristalimsi monosülfat ve etrenjit oluşumunu geciktirmiş ve bu etrenjit ve monosülfatın amorf halden yeniden kristalleşmesini sağlamıştır. Morfoloji daha küçük ve daha az şekillendirilmiş kristallere doğru değişmiştir.
- Cam tozu miktarı arttırıldığında, basınç dayanımı değerleri artmış olup, su emme ve kılcal su emme değerleri de azalmıştır.
- Sadece uçucu külden üretilmiş olan briketin ısı iletkenlik değerinin diğer FLG briketlerinin ısı iletkenlik değerlerinden oldukça düşük olduğu ve FLG briketlerinin ısı iletkenliklerinin birbirine çok yakın oldukları gözlemlenmiştir. Bu durumun F numunesinin boşluklu yapısından kaynaklandığı düşünülmüştür.
- 10F2L3G numunesindeki karışım oranlarının, briket üretimi için oldukça uygun olduğu görülmüştür.
- Üretilen briketlerin dayanıklılığıyla ilgili testler ileri bir çalışma olarak kalacaktır.

Kaynakça

- [1] <https://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2017-12/Kguc2017.pdf> (Erişim Tarihi: 01.04.2018).
- [2] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğinoğlu, A. 2003. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 111s.
- [3] ASTM C 618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. ASTM, Philadelphia, 1998.
- [4] TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [5] TS EN 450, Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1998.
- [6] <http://www.pagcev.org/atik-istatistikleri> (Erişim Tarihi: 01.01.2019).
- [7] Turgut, P. 2007. Kireçtaşı ve cam tozunun briket yapımında kullanılması. 7. Ulusal Beton Kongresi, 29 Kasım-1 Aralık, İstanbul, 343-352.
- [8] Schmidt, A., Saia, W.H.F. 1963. Alkali-aggregate reaction tests on glass used for exposed aggregate wall panel work, ACI Materials Journal, Cilt. 60, s. 1235-1236.
- [9] Johnston, C.D. 1974. Waste glass as coarse aggregate for concrete, Journal of Testing and Evaluation, Cilt. 2(5), s. 344-350.
- [10] Meyer, C., Baxter, S., Jin, W. 1987. Alkali-aggregate reaction in concrete mechanism, Cement and Concrete Research, Cilt. 17(1), s. 141-152.
- [11] Xie, Z., Xi, Y. 2002. Use of recycled glass as a raw material in the manufacture of Portland cement, Materials and Structures, Cilt. 35(8), s. 510-515. DOI: 10.1007/BF02483139
- [12] Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., Rodriguez, D. 2000. Studies on concrete containing ground waste glass, Cement and Concrete Research, Cilt. 30(1), s. 91-100. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00213-6
- [13] Shi, Y., Wu, C., Riefler, C., Wang, H. 2005. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, Cement and Concrete Research, Cilt. 35(5), s. 987-93. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.05.015
- [14] Urhan, S. 1987. Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: Interpretation of published results and a hypothesis concerning the mechanism, Cement and Concrete Research, Cilt. 17(1), s. 141-152. DOI: 10.1016/0008-8846(87)90068-8
- [15] Tokyay, M., Çetin, B.K. 1991. Preslenmiş, buhar kürü uygulanmış uçucu kül-kireç tuğlalarının dayanım ve su emme özellikleri, Teknik Dergi, Cilt. 2(4), s. 385-394.
- [16] Turgut, P. 2010. Masonry composite material made of limestone powder and fly ash, Powder Technology, Cilt. 204(1), s. 42-47. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.07.004
- [17] Turgut, P. 2012. Manufacturing of building bricks without Portland cement, Journal of Cleaner Production, Cilt. 37, s. 361-367. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.07.047
- [18] Turgut, P. 2013. Fly ash block containing limestone and glass powder wastes, KSCE Journal of Civil Engineering, Cilt. 17(6), s. 1425-1431. DOI: 10.1007/s12205-013-0280-6
- [19] Turgut P. 2018. Uçucu kül, kireç ve cam tozu kullanarak blok üretimi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt. 24(3), s. 413-418. DOI: 10.5505/pajes.2016.70048
- [20] ASTM C 109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, ASTM, Philadelphia, 2016.
- [21] ASTM C 642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM, Philadelphia, 2013.

- [22] TS EN 772-11, Kâgir Birimler-Deney Metotları-Bölüm 11: Betondan, Yapay ve Doğal Taştan Yapılmış Kâgir Birimlerde Kapiler Su Emme ve Kil Kâgir Birimlerde İlk Su Emme Hızının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [23] ASTM C1113M-09, Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories by Hot Wire (Platinum Resistance Thermometer Technique), American Society for Testing and Materials, ASTM, Pennsylvania, 2019.
- [24] ASTM C 140, Methods of Sampling and Testing Concrete Masonry Units. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2017.
- [25] Özdemir, A. 2002. Bazı yapı malzemelerin kapiler su emme potansiyelleri, Jeoloji Mühendisleri Odası Dergisi, Cilt. 26 (1), s. 19-32.
- [26] Pollard, T.J.S., Montgomery, M.D., Sollar, J.C., Perry, R. 1991. Organic compounds in the cement-based stabilisation/solidification of hazardous mixed wastes-mechanistic and process considerations. Journal of Hazardous Materials, Cilt. 28(3), s. 313-27. DOI: 10.1016/0304-3894(91)87082-D
- [27] Chi, M., Huang, R. 2014. Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete, Cement and Concrete Composites, Cilt. 45, s. 148-156. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.10.001
- [28] Xie, J., Kayali, O. 2016. Effect of superplasticiser on workability enhancement of Class F and Class C fly ash-based geopolymers, Construction and Building Materials, Cilt. 122, s. 36-42. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.067
- [29] Xu, G., Shi, X. 2018. Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review, Resources, Conservation and Recycling, Cilt. 136, s. 95-109. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.04.010
- [30] Wu, R., Dai, S., Jian, S., Huang, J., Lv, Y., Li, B., Azizbek, N. 2020. Utilization of the circulating fluidized bed combustion ash in autoclaved aerated concrete: Effect of superplasticizer, Construction and Building Materials, Cilt. 237, s. 117644. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117644
- [31] Sheng, G., Li, Q., Zhai, J. 2012. Investigation on the hydration of CFBC fly ash, Fuel, Cilt. 98, s. 61-66. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.02.008
- [32] Lee, S.H., Kim, G.S. 2017. Self-cementitious hydration of circulating fluidized bed combustion fly ash, Journal of the Korean Ceramic Society, Cilt. 54(2), s. 128-136. DOI: 10.4191/kcers.2017.54.2.07
- [33] Shon, C.S., Saylak, D., Zollinger, D.G. 2009. Potential use of stockpiled circulating fluidized bed combustion ashes in manufacturing compressed earth bricks, Construction and Building Materials, Cilt. 23(5), s. 2062-2071. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.025
- [34] Zhang, H., Qiu, K. 1997. The proposed utilization of fluidized bed combustion ash in the production of a special cement. In Proceedings of 14th International Conference on FBC, ASME Vancouver, 2, 699-702.
- [35] ASTM C 90, Standard Specification for Load-Bearing Concrete Masonry Units. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2016.
- [36] Wistuba, S., Stephan, D., Raudaschl-Sieber, G., Plank, J. 2007. Hydration and hydration products of two-phase Portland cement clinker doped with Na₂O, Advances in Cement Research, Cilt. 19(3), s. 125-131. DOI: 10.1680/adcr.2007.19.3.125
- [37] Chartschenko, I.J., Volke, K., Stark, J. 1993. Untersuchungen über den einfluss des pH-wertes auf die ettringit bildung, Wis-senschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Cilt. 39, s. 171-176.
- [38] Chartschenko, I.J. 1995. Theoretische grundlagen zur anwendung von quellzementen in der baupraxis, Habilitationsschrift, Weimar.
- [39] Sahin, M., Mahyar, M., Erdogan, S.T. 2016. Mutual activation of blast furnace slag and a high-calcium fly ash rich in free lime and sulphates, Construction and Building Materials, Cilt. 126, s. 466-475. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.064