Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi
Fen Bilimleri Dergisi (CFD), Cilt 38, No. 1 (2017)
ISSN: 1300-1949

Cumhuriyet University Faculty of Science
Science Journal (CSJ), Vol. 38, No. 1 (2017)
ISSN: 1300-1949

http://dx.doi.org/10.17776/csj.02959

Köpük Betonun Reolojik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi

İsmail DEMİR[1*], M. Serhat BAŞPINAR[2], Erhan KAHRAMAN[1]

[1]*Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Afyonkarahisar, TÜRKİYE*

[2]*Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Afyonkarahisar, TÜRKİYE*

Received: 30.09.2016; Accepted: 30.01.2017

Özet. Köpük beton harcı akış özellikleri geleneksel harçtan farklıdır. Akma dayanımı çok düşük olduğu için kendiliğinden akış özelliği gösterir. Köpük betonun akış özelliklerini belirleyen bir çok faktör vardır. Temel olarak; su/çimento oranı, su/ince malzeme oranı, çimento tipi, köpük ajanının tipi, köpük yoğunluğu, filler malzeme tipi ve miktarı, taze harcın yoğunluğu vb. Bu nedenle nihai beton ve köpük betonun reolojik özellikleri arasında bir yakınlık görülebilir. Köpük betonun bilinen reolojik özellikleri harcın işlenebilirliği, pompalanabilirliği ve kararsızlığı hakkında bilgiler verir. Köpük betonun reolojik özelliklerinin belirlenmesinde en önemli iki faktör olan fiziksel ve mekaniksel özellikler iki farklı yöntemle incelenmiştir. Bu akış özellikleri Marsh konisi yöntemi ve Barookfield viskozimetresi ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Köpük beton, Reoloji, İşlenebilirlik, Viskozite, Marsh konisi

Experimental Investigation of Foam Concrete Rheological Properties

Abstract. The flow properties of foam concrete mortar are different from the traditional mortar. It is shows self flow properties for yield strength is very low. There are many factors that determine the flow properties of foam concrete. Basically they said; water/cement ratio, water /powder ratio, type of cement, the type of foaming agent, the foam density, the type filler material and amount of, the density of the fresh mortar, etc. Therefore can be established a close relationship between the rheological properties of foam concrete and the final concrete properties. To be known the rheological properties of foam concrete offers important information about the workability of mortar, pumpability and instability. Rheological properties of foam concrete have been investigated in two different methods as the most important factors that determine the physical and mechanical properties. This was investigated by flow properties Marsh cone method and Brookfield viscometer.

Keywords: Foam concrete, Rheology, Workability, Viscosity, Marsh Cone

GİRİŞ

Köpük betonun taze haldeki durumu geçici olmakla birlikte, sertleşmiş beton özelliklerine olan etkisi büyük önem taşır [1]. Reolojik çalışmalarda uçucu kül filler malzeme olarak kullanıldığında, kum kullanılan örneklere göre çok daha fazla yayılma göstermiştir. Kıvam ve reolojik özellikler agreganın tane şekli ve tane boyutu dağılımı ile yakından ilgilidir. Uçucu kül kütlece kum ile yer değiştirdiğinde ince tane oranı artacağından akışkanlıkta azalma gerçekleşecektir. Bu durumda istenen kıvamı elde etmek amacı ile su/toz oranın artırılması gerekir [2]. Karışımdaki köpük miktarının artması akışkanlığı azaltmaktadır. Bunun nedeni: 1) Hava hacmimin artması ile birlikte yoğunluğun azalması sonucu kohezyonun artışı neden olur [3]. 2) Harçtaki kabarcıklar ve katı taneler arasındaki adezyon kuvvetleri harcın kıvamını artırır. Görece katı kıvamda bir köpük beton karışımda, hava kabarcıklarının sönümlenmesine yol açarken, yüksek kıvamlı (aşırı akışkan) bir karışımda ise bünyesindeki hava kabarcıklarını tutma yeteneğini kaybederek ayrışmaya neden olabilir. Bu nedenle karalılığı sağlamak için yoğunluk oranları (örneğin, taze beton yoğunluğu ve sertleşmiş beton yoğunluğu oranları) 1:1 yakın

* Corresponding author. *Email address:* idemir@aku.edu.tr

 ©2016 Faculty of Science, Cumhuriyet University

olmalıdır [4]. Bu çalışmada dolgu olarak farklı mineral malzemeler kullanılarak üretilen köpük beton örneklerin reolojik özellikleri Marsh Konisi ve Brookfield Viskozimetresi kullanılarak incelenmiştir.

MARSH KONİSİ YÖNTEM İLE AKIŞKANLIK ÖZELİKLERİNİN İNCELENMESİ

Taze haldeki köpük beton harcında dikkate alınacak ilk iki özellik kıvam ve reolojidir. Bu değerler genellikle bir akış konisi ile ölçülerek karışımın performansı incelenir [5]. Köpük betonların akışkanlığını belirlemede Marsh Konisi pratik bir yöntem olarak (Şekil 1) kullanılır [6]. Bu yöntem temel olarak 1,5 litrelik döküme hazır harcın basit bir huniden 1 litrelik harç kısmının akma süresinin ölçülerek not edilmesi prensibine dayanır. Akış süresinin ölçülmesinin yanında akma davranışı da görsel olarak belirlenerek not edilir. Buna göre 1 litrelik taze harcın 1 dakikanın altında akması durumu sabit ve düzenli akış olarak değerlendirilir (Tab. 1, [7]). Akış süreleri 1 dakikayı geçen harçlar ise engelli veya zor akış olarak not edilir. Harç akmıyorsa "akmadı" olarak not edilir [8].



Şekil 1. Akış (Marsh) konisi

Tablo 1. Köpük betonun akış süresine göre sınıflandırılması [7].

Ana sınıf	Tanımlama	Alt sınıf	Açıklama
1	1 litre < 1 d	A*	Sabit/düzenli akış
2	1d<akış <2 d	B*	Kesikli akış
3	0.5 litre< akış <1 litre	C	Hafifçe sıkıştırma ile akış tamamlanması
4	Akış<0,5 Litre	-	Yalnızca 1. ve 2. Sınıflar kullanılabilir.
5	Akış yok	-	

Tasarım yoğunluğunu ulaşmak için su katı oranı olarak tanımlanabilen baz karışımın kıvamı, ilave edilen köpüğe bağlı olarak, karışımın kararlılığını (stabilite) etkileyen en önemli faktördür. Bu nedenle kıvam ağırlıklı olarak filler tipine bağlıdır. Köpük ilavesi ile birlikte baz karışımın kıvamı dikkate değer biçimde azalır. Köpük betonun kıvamındaki bu azalma muhtemelen kendi ağırlığının azalması ve yüksek hava içeriğinden kaynaklanan güçlü kohezyon nedeniyledir.

İstenen kıvamda bir karışım elde etmek için; i) Uçucu kül ikame miktarına bağlı olarak köpük hacmindeki bir artış su/katı oranını artırmaktadır. ii) Herhangi bir köpük hacminde (köpük sabit iken) uçucu kül miktarındaki bir artış, su/katı oranın artırmaktadır. iii) Belli bir su/katı oranında artan uçucu kül miktarına bağlı olarak gereken köpük miktarı azalır. Kum kütlece uçucu kül ile yer değiştirdiğinde ince madde miktarındaki artış nedeniyle karışımın kıvamı düşer. Bu nedenle uçucu kül ikame oranının artması, su/katı oranında bir artış gerektirir.

Kıvam değerleri düşük olduğunda (karışım çok katı kıvamda ise kabarcıklar bozulur) veya çok yüksek olduğunda (kabarcıkları tutmak için harç çok zayıf kalır ve ayrışmaya yol açar) yoğunluk değerlerinde artış gerçekleşir. Karalılık baz karışımın kıvamına bağlıdır ve bu su/katı oranı olarak ifade edilebilir. Baz karışıma köpük katıldığında "köpük betonun kıvamı" düşer. Her ne kadar süper akışkanlaştırıcılar köpüğün kararlılığını azaltsa da uygun işlenebilirliği sağlayabilmektedir [9,10]. Günümüzde yapı kimyasallarının karmaşıklığı nedeniyle köpük ile etkileşimleri genellenemez [11].

Taze haldeki köpük betonun özellikleri köpük hacmi ve su/katı madde oranı ile birlikte karışıma giren diğer katı maddeleri tarafından belirlenmektedir. Buna göre köpük betonun yaş veya plastik haldeki özelliklerini etkileyen filler/çimento oranı, uçucu kül ikame miktarı, su/katı oranı ve köpük hacmi dikkate alınmalıdır. Bunlar baz karışımın kararlı yapıda ve uygun kıvamda bir köpük beton üretimi için gerekli su miktarının ve diğer bileşenlerin oranlarını belirlemeye yardım edecektir.

Tasarım karışımı oluşturan bileşenler, kıvam ve reolojiyi etkileyen başlıca faktörlerdir. Taze harcın kıvam ve reolojisini etkileyen en önemli faktör karışımın su içeriğidir. Fazladan ilave edilen su işlenebilirliği etkileyerek taze harçta ayrışmaya yol açacağı için, su/çimento oranının minimum tutulması tavsiye edilir [12].

Köpük betonun su ihtiyacı karışımı oluşturan bileşenlere ve kullanılan katkılara bağlıdır. Su miktarı aynı zamanda istenen karışımın üniform yapısını, kıvam ve kararlılığını belirler [13,14]. Düşük su içeriği karışımın çok katı olmasına ve karıştırma sırasında kabarcıkların sönümlenmesine yol açarak yoğunluk artışına neden olur [15], a). Benzer biçimde su içeriğinin yüksek olması ise, harcın kabarcıkları korumak için çok zayıf kalarak köpüğün karışımdan ayrılmasına yol açarak nihai yoğunluğu artırmaktadır [15], b). Diğer bir anlatımla her iki durumda da çökme meydana gelmektedir. Genel olarak su/çimento oranı 0,4 ile 1,25 arasında veya hedef yoğunluğun %6,5 ile %14'ü arasında önerilmektedir [16]. Su/çimento oranı artırıldığında kum miktarı da buna bağlı olarak artırılmalıdır [17]. Bir ön hesaplama ile belirlenen su/çimento oranı yerine harcın kıvamı gözlenerek, karışıma uygun miktarda su ilave edilebilir. Ayrıca, başlangıçtaki hamurun yada harcın işlenebilirliliğini ve hedeflenen taze köpük beton tasarımını sağlamak için su miktarı yeterli olmalıdır. Aksi halde çimento köpüğün suyunu absorbe ederek köpükte hızlıca bir bozulma oluşur [18-20].

Köpük betonun kıvamını ve reolojik özelliklerini geliştirmek, KYB özelliği kazandırmak, köpük ve bağlayıcı arasındaki adezyon ve kohezyonu geliştirmek amacıyla karışımı oluşturan bileşenler doğru hesaplanmalıdır [14]. Yoğunluğu etkileyen diğer bir faktör iri agrega yoğunluğudur. Hafif yoğunlukta iri agrega ilavesi karışımın kıvamını olumsuz etkilemektedir. Bu sorunu çözmek için, karışıma uçucu kül ilave edilmesi önerilmektedir [21]. İri agrega çapı 4 mm'yi ve toplam agrega hacimdeki oranı %25'i geçmemelidir. Daha fazla miktardaki iri agrega köpüğün bozulmasına yola açabilmektedir [22,23,7]. Ayrıca S/Ç oranındaki bir artış ve köpük miktarındaki azalma plastik yoğunluğu oransal olarak artırırken kıvam ve reolojisini olumsuz etkilemektedir [15]. Yüksek miktarda köpük ilavesi hava miktarını artırarak taze betonun kıvamını azaltırken, süper akışkanlaştırıcı katkı ilavesi akış hızını artırmaktadır [24].

Akışkanlaştırıcılar işlenebilirliği önemli ölçüde iyileştirmek ve köpük beton kıvamını korumak için kullanılır [25-27]. Su azaltıcı katkılar uygulamada taze betonun akışkanlığını ve plastikliğini kolaylaştırarak performansını artırmak için kullanılmakta olup, ayrışmaya neden olmazlar [28] Köpük beton üretiminde en popüler akışkanlaştırıcılar flor içerikli yüzey aktif (FS1) maddedir. FS1 genellikle karışım suyunun miktarını azaltıcı ve aynı zamanda hidratasyon sürecini hızlandırıcı etkiye sahiptir [29].

Çalışmada akışkanlık, su/bağlayıcı, su/katı oranlarının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan SA'nın özellikleri aşağıda sunulmuştur:

Polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltıcı, yeni nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkısıdır. Polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltan, erken ve nihai yüksek dayanım ve dayanıklılığa gereksinim duyulan hazır beton ve prekast endüstrisi için geliştirilmiştir. Klor içeriği %1 ve max. alkali içeriği %3'tür.

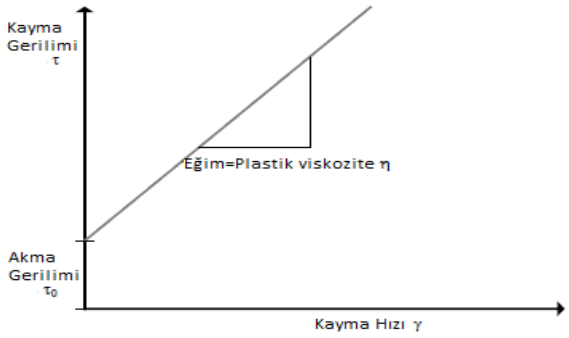
Yeni nesil süper akışkanlaştırıcıların kimyasal mekanizması çimento tanecik yüzeyleri, geleneksel melamin ve naftalin sülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı polimerlerde, beton karıştırma işleminin en erken aşamasında kuşatılırlar. Polimer zincirlerinin sülfonik grupları, çimento tanecik yüzeylerinin negatif yükünü artırır ve elektrostatik kuvvet bu tanecikleri iter. Bu elektrostatik mekanizma, çimento hamurunun dağılmasına neden olur ve buna bağlı olarak, beton işlenebilirliğinin daha az su karışımı ile elde edilmesi sağlanır. Bununla beraber hidratasyon işlemi, çimento taneciklerinin suya temas etmesi ile birlikte başlar. Hızla büyüyen hidratasyon kristalleri, taneciklerin yüzey mekaniğini değiştirir, böylece bunların serbestçe dağılımını önler. Süperakışkanlaştırıcı uzun zincirli karboksilik eter polimerlerinden oluşur. Karıştırma işleminin başlangıcında, geleneksel süper akışkanlaştırıcılarda olduğu gibi, elektrostatik itme mekanizmasını harekete geçirir. Bu işlemle, su ihtiyacı büyük ölçüde azalan akışkan bir beton elde edilir. Ancak polimer omurgasına bağlanan zincirler, çimento taneciklerinin dağılma ve yayılma yeteneğini büyük ölçüde stabilize ederek, sterik bir engel oluşturur. Bu sayede daha düşük su ile yüksek akışkanlık sağlanır.

Brookfield Viskozimetresi Reolojik Model Çalışması

Malzemelerin akış ve deformasyon davranışı olarak tanımlanan Reoloji uygulanan gerilim, gerinim, gerinim hızı ve zaman ile ilgili ilişkileri kapsar. Çimento pastası, harç ve beton Non-Newtonian sıvı olarak kabul edilir. Bu durumda sıvının viskozitesi uygulanan deformasyon hızıyla değişmektedir. Çimento içeren sistemlerin reolojik davranışı genelde Bingham modeli ile ifade edilir ve iki önemli terimle tanımlanır; akma gerilimi t_0 ve plastik viskozite:

$$t = t_0 + h\,g \quad (1)$$

Burada: t kayma gerilimini (N/m^2) ifade etmektedir. g uygulanan kayma gerinim (deformasyon) hızını, t_0 akma gerilimini (N/m^2) ve h plastik viskozite (Ns/m^2) değerini ifade etmektedir (Şekil 2). Akma gerilimi malzemenin akmaya başlaması için gerekli olan gerilim seviyesini ifade eder. Plastik viskozite değeri, akma gerilimi aşıldıktan sonra malzemenin ne kadar kolay akacağının bir göstergesidir. Düşük akma gerilimi demek malzemenin akmaya başlaması için çok daha düşük direnç var anlamına gelmektedir. Yüksek viskozite segregasyonları engeller ancak malzemenin zor akmasına neden olur.



Şekil 2. Bingham akış modeli $t = t_0 + h\,g$.

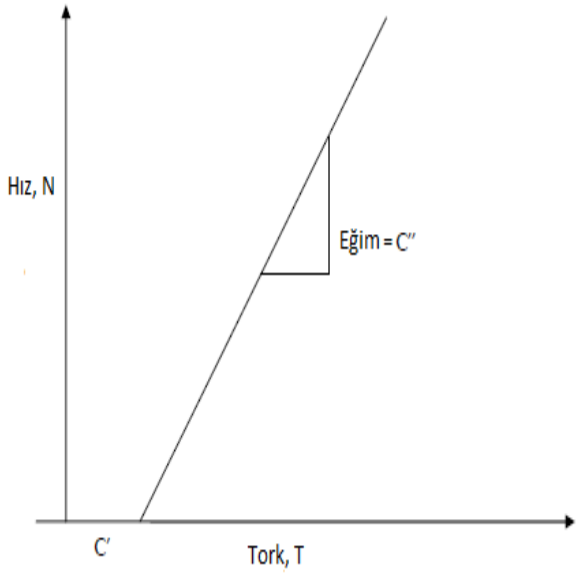
Çalışmada Brookfield Viskozimetresi kullanılmıştır (Şekil 3). Brookfield Viskozimetresi ile yapılan Reolojik ölçüm prosedürü;

(i) Cihaz önce 4 nolu disk için kalibrasyon sıvısı ile kalibre edilmiştir.
(ii) Her defasında taze hazırlanan harç karışımından alınan 1 litrelik karışım behere konmuştur.
(iii) Disk beher ortasında merkezlenerek daldırılmıştır.
(iv) 30 saniye arayla ölçüm ekranından maksimum tork değerleri (Çoğu zaman % doğruluk olarak belirtilen değer) ölçülmüştür. Her karışım ve her farklı dönüş hızı (deformasyon hızı) için 3 ölçüm alınmış ve ortalama değerleri not edilmiştir.
(v) Farklı deformasyon hızları için 5, 20 ve 50 rpm disk hızları seçilmiştir.

Ölçüm ortalamaları ve hız değerleri grafiğe aktarılmıştır. X ekseni kayma gerilimi (tork değerleri) ve Y ekseni kayma değerleridir (dönme hızı). Noktalardan geçen doğrusal çizdirilerek, x eksenini kesen nokta akma gerilimi, doğrunun eğimi ise plastik viskozite olarak değerlendirilmiştir (Şekil 4) [30].



Şekil 3. Çalışmada kullanılan Brookfield Viskozimetresi



Şekil 4. Tork, T ve hız, N arasındaki Bingham ilişkisi [30].

Hazırlanan iki farklı köpük beton karışımı üzerinde reolojik deneyler gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birincisinde tamamen mermer tozu (A) kullanılırken, diğerinde mermer tozu ve uçucu kül yarı yarıya olacak şekilde hazırlanmıştır. Harçların yoğunluk (litre ağırlıkları) değerleri 840 ve 870 kg/m^3 arasında hazırlanmıştır. Şekil 5 ve Şekil 6'da Brookfield viskozimetresi ile yapılan reolojik deneylerden elde edilen tork-hız ilişkileri verilmiştir. Şekil 4'te belirtilen ilişkiler doğrultusunda;

$$T = C' + C''N \quad (2)$$

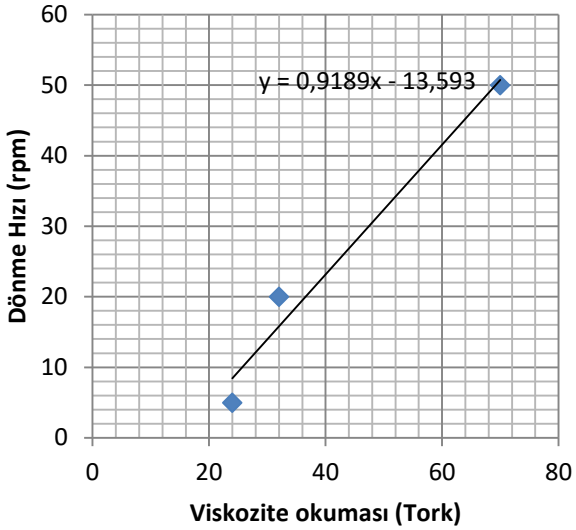
T = tork (Nm)
C" = doğrunun eğiminin tersi plastik viskozitedir.
C' = x eksenini kestiği nokta akma gerilimidir.

Elde edilen doğruların denklemleri "y = mx + c" şeklinde yazıldığında, denklemler yardımıyla hazırlanan köpük betonlar harçlarının reolojik değerleri hesaplanabilmektedir.
Şekil 5'te y = 0,9884x - 9,593 olarak hesaplanmıştır.
m=eğim ise
Plastik viskozite= 1/tan α olacağından
Plastik viskozite=1/0,9189;

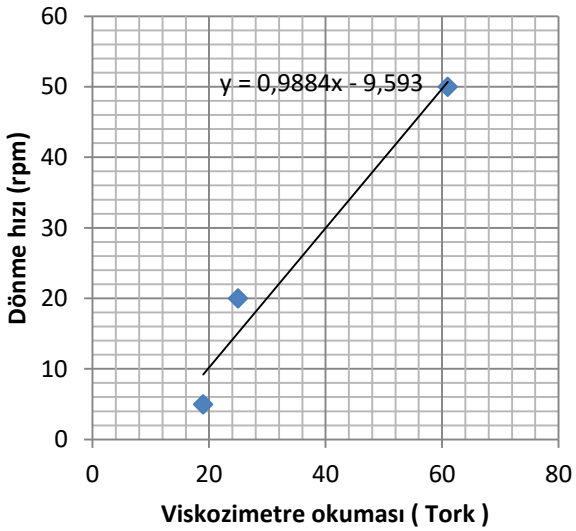
Plastik viskozite=1,088 Ns/m^2

Akma gerilimi x eksenini kesen nokta olarak tanımlanırsa; y=0 verildiğinde
X= 13,593/0,9189= 14,79

Akma gerilimi= 14,79 N/m^2



Şekil 5. Sadece mermer tozu içeren köpük beton tork-hız ilişkisi.



Şekil 6. %50 uçucu kül ihtiva eden kül-mermer tozu karışımından oluşan köpük beton tork-hız ilişkisi.

Benzer hesaplamalar Şekil 6'te verilen
y = 0,9884x - 9,593 denklemi için yapıldığında;

Plastik viskozite= 1,012 Ns/m^2

Akma gerilimi= 9,71 N/m^2 olarak hesaplanmıştır.

Her iki karışımın değerleri karşılaştırıldığında, harç bünyesine uçucu kül girdiğinde harcın akma geriliminde önemli bir azalma meydana geldiği görülmüştür. Bununla birlikte az da olsa plastik viskozite değerinde bir azalma hesaplanmıştır. Uçucu külün mermer tozuna göre daha küresel tane yapısına sahip olmasının akmayı kolaylaştırdığı düşünülmektedir.

BULGULAR

SA katkısı kullanılmayan serilerde belirli akışkanlığı sağlamak için gereken su miktarında artış gerçekleşmiştir. Ancak su miktarındaki artışa rağmen koni akış süreleri (AS) uzamış ve genel olarak 1 dakikadan fazla sürelerde akış (engelli akış) tamamlanmıştır. Diğer bir anlatımla karışımdaki su miktarının artmasına rağmen yeterli akışkanlık elde edilememiştir. SA katkısının ‰3,5 ve ‰5 olarak kullanıldığı serilerde akış süresi 33- 52 s arasında (düzenli akış) tamamlanmıştır. Bu aralıklarda SA kullanılan karışımlarda herhangi bir çökme sorunu gözlenmemiştir. SA katkısının ‰7,5 olarak kullanıldığı serilerin tamamında akış süresi 30 s'den önce tamamlanmıştır (aşırı akışkan). Bu serilerde aşırı akışkanlık kaynaklanan nedeniyle çökme ve/veya kısmi çökmeler gerçekleşmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

(i) Akışkanlaştırıcı katkı kullanılan serilerde, akışkanlaştırıcı kullanılmayanlara göre aynı karışım ve akışkanlık değerleri için daha az su gereksinimi belirlenmiştir.

(ii) Sülfonat polimeri esaslı ve alkali oranı yüksek olan süper akışkanlaştırıcılara göre, polikarboksilik eter esaslı ve alkali oranı düşük süper akışkanlaştırıcılar ile aynı karışımlarda aynı akışkanlığı sağlamak için daha az su gereksinimi olduğu belirlenmiştir. Benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da ortay konmuştur [31].

(iii) Aynı karışım için harç yoğunluğu azaldığında (köpük miktarı artırıldığında) aynı akışkanlığı sağlamak için gereken su miktarı artmaktadır.

(iv) Taze harç yoğunluğu azaldığında akış süresi uzamakta, diğer deyimle akışkanlık azalmaktadır.

(v) Mineral malzeme olarak sadece mermer tozu kullanılan karışımların daha az su ihtiyacı olurken, mermer tozu ile uçucu külden oluşan karışımlarda aynı akışkanlığı sağlamak için gereken su ihtiyacı bir miktar artış göstermiştir. Buna uçucu külün gözenekli yapısının neden olduğu düşünülmektedir.

(vi) Normal betonlara benzer biçimde, köpük beton karışımlarda su/bağlayıcı oranındaki ilave bir artış mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir.

(vii) Karışımdaki su miktarının belirlenmesinde Marsh Hunisi kullanılması pratik olarak yarar sağlamaktadır. Buna göre akış süresinin 1 dakikayı geçmesi durumunda harcın yüksek viskoziteyi sahip olduğu ve nihai mekanik özellikleri olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Bununla birlikte 25 saniyeden az olan akış sürelerinde harcın aşırı akışkan olması ve harcın kalıpta çökmesine neden olmaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar verdiği destek için (Proje no: 5140029) TUBİTAK'a teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

[1] Hanehara S. and Yamada K., Rheology and early age properties of cement systems. Cement and Concrete Research, 2008; 38(2), 175-195.

[2] Jones MR, McCarthy A. (a) Utilising unprocessed low-lime coal ash in foamed concrete. Fuel, 84,1398–409, 2005.

[3] Karl S, Worner JD., Foamed concrete-mixing and workability. In: Bartos PJM, editor. Special concrete-workability and mixing. London: E&FN Spon, p. 217–24, 1993.

[4] Ramamurthy K, Nambiar E, Ranjani G. A classification of studies on properties of foam concrete. Cem Concr Compos,31(6):388–96, 2009.

[5] Kearsley E.P., Wainwright P.J., The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete, Cement and Concrete Research 3, 2001; (1) 105–112.

[6] Rousesel N., Rheology of fresh concrete: from measurements to predictions of casting processes, Materials and Structures, Vol. 40, 2007; pp.1001–1012.

[7] M.R. Jones, M.J. McCarthy, A. McCarthy, Moving fly ash utilization in concrete forward: a UK perspective, in: Proceedings of the 2003 International Ash Utilisation Symposium, Centre for Applied Energy Research, University of Kentucky, 2003; pp. 20–22

[8] Maziah M., Development of foamed concrete: enabling and supporting design. a thesis presented in application for the degree of doctor of philosophy Division of Civil Engineering University of Dundee, 2011.

[9] Saucier F., Pigeon M., and Plante P., Air-void Stability, Part III: Field test of Superplasticized Concretes, ACI Materials Journal, 1990; 87 (1) p.3-11.

[10] Dijik V. W. and Jong P., Determining the Rn exhalation rate of building material using liquidscintillation counting. Healt Phys., 1991, 64 (4), 501-509.

[11] Du L.and Folliard K. J., Mechanisms of air entrainment in concret, Cement and Concrete Research, 2005; 35 (8)1463-1471.

[12] Valore Jr. R.C., Insulating concretes, ACI J. Proc. 53 (11), 1956.

[13] Nambiar E.N., Ramamurthy K., Fresh state characteristics of foam concrete, J. Mater. Civ. Eng. 2008; 20 (2), 111–117

[14] Karl S., Woerner J.D., Foamed Concrete-mixing and Workability, in: Rilem Proceedings, Chapman and Hall, 1994; p. 217.

[15] Nambiar E.K., Ramamurthy K., Influence of filler type on the properties of foam concrete, Cem. Concr. Compos. 2006; 28 (5) (2006, b) 475–480.

[16] Mugahed Amran Y.H., Farzadnia N., Abang A., Properties and applications of foamed concrete; a review, Construction and Building Materials 101, 2015; 990–1005

[17] Valore Jr. R.C., Cellular concretes Part 1 composition and methods of preparation, ACI J. Proc. 1954; 50 (5)

[18] ASTM, Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete, ASTM C869-91, Q. C138, Philadelphia, 1991.

[19] Kearsley E.P., Visagie M., Micro-properties of Foamed Concrete. Specialist Techniques and Materials for Construction, Thomas Telford, London, 1999; pp. 173–184.

[20] British Cement Association, Foamed Concrete; Composition and Properties, Report Ref. 46.042, BCA, Slough, 1994.

[21] Nambiar E.K., Ramamurthy K., Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology, Cem. Concr. Compos. 2006; 28 (9) (2006, a) 752–760.

[22] Kayali O., Haque M.N., Zhu B., Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete, Cem. Concr. Compos. 2003; 25 (2) 207–213.

[23] BS EN12350-6, Testing Fresh Concrete: Density, British Standards Institution, London, UK, 2009.

[24] ASTM, Standard test method for foaming agents for use in producing cellular concrete using preformed foam, in: ASTM C796-97; Standard Test Method for Unit Weight. Yield, and Air Content (Gravimetric) of concrete, ASTM C138, Q. C138, Philadelphia, 1997.

[25] Tikalsky P.J., Pospisil J., MacDonald W., A method for assessment of the freeze–thaw resistance

of preformed foam cellular concrete, Cement and Concrete Research 2004, 34 (5) 889–893.
[26] Shi C., Composition of materials for use in cellular lightweight concrete and methods thereof, Advanced Materials Technologies LLC, Hamburg, NY (US), Patent no: US6488762 B1, 2002.
[27] Ergene M. T., Foamed Concrete Structures, Hamburg, NY (US), Patent AU 115 FX Ergene, Stanley Works, New Britain, Patent no. US3867159 A, 1975.
[28] Agarwal S.K., Masood I., Malhotra S.K., Compatibility of superplasticizers with different cements, Constr. Build. Mater. 2000, 14 (5) 253–259.
[29] Jezequel P.H., Mathonier B., Foamed Concrete, Lafarge, Washington, DC (US), Patent no. WO2011101386 A1, 2014.
[30] Tattersall G.H., Workability and Quality Control of Concrete, E & FN Spon, 1991, pp 262.
[31] Zhihua P., Hengzhi L., Weiqing L., Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures, Construction and Building Materials 2014,72 256–261.