

Araştırma Makalesi / Research Article

Köpük Beton Üretiminde Uygun Akışkanlaştırıcı/Priz Hızlandırıcı Katkı Türünün Araştırılması

İsmail Demir^{1*}, M. Serhat Başpınar², Erhan Kahraman³^{1,3} Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.e-posta: idemir@aku.edu.tr. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8493-0309>sbaspınar@aku.edu.tr. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2086-1935>ekahraman@aku.edu.tr. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7965-2126>

Geliş Tarihi: 13.11.2018; Kabul Tarihi: 06.08.2019

Öz

Anahtar kelimeler

Köpük beton;
Akışkanlaştırıcı;
Priz hızlandırıcı;
Reoloji.

Köpük betonlar günümüzde giderek artan bir kullanıma sahiptir. Uygulanmasının kolaylığı ve birim ağırlığının düşük oluşu sebebiyle tercih edilen bir hafif beton türüdür. Bu çalışmada köpük beton karışımlara ilave edilen akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkıların etkileri incelenerek optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Buna göre akışkanlık, su/bağlayıcı, su/katı oranlarının taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışmada iki farklı süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı ve bir priz hızlandırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı (SAP) katkının, aynı oranlarda Melamin sülfonat polimeri esaslı süper akışkanlaştırıcı (SAM) katkıya göre akışkanlık sürelerinde azalma (daha akışkan) ve buna bağlı olarak daha yüksek dayanım değerleri sağlamıştır. Köpük betonun akışkanlık özelliklerinin Marsh konisi ile ölçülmesinin özellikle şantiye ortamında kolay ve pratik bir yöntem olacağı değerlendirilmiştir.

Investigation of Suitable Plasticizer / Setting Accelerator Additive Type in Foam Concrete Production

Abstract

Keywords

Foam concrete;
Plasticizer;
Setting accelerator;
Rheology.

Foam concrete has an increasing use today. It is a preferred type of lightweight concrete due to its ease of application and low unit weight. In this study, the effects of plasticizer and setting accelerator additives added to foam concrete mixtures were investigated and optimization studies were carried out. According to this, the effect of fluidity, water / binder, water / solid ratios on fresh and hardened concrete properties were investigated. In this study, two different plasticizer additives and one setting accelerator chemical additive were used. The effects of chemical additives on mixtures were investigated. Use of the same proportions of polycarboxylic ether-based superplasticizer (SAP) additive compared to the addition of melamine sulfonate polymer based superplasticizer (SAM) were reduce fluidity times (more fluidty) and accordingly, higher strength values were obtained. Rheological properties of the foam concrete can be determined in practice by Marsh cone method.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Köpük beton fiziksel, mekanik ve termal özellikleri nedeniyle tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Kendiliğinden yayılan, sıkıştırma gerektirmeyen hafif

beton sınıfının bir tipidir. Hava sürükleyici veya köpük katkısı ile yoğunluğu azaltılan bir betondur (Ramamurthy *et al.* 2009). Isı ve ses yalıtımı, dolgu betonu, çatı yalıtımı, köprü yapımı, köprü

yaklaşımlarında dalgalanmanın önlenmesi amaçlı, yolların inşasında, yumuşak zemin tabanında, birçok altyapı uygulamalarında, prekast ve yerinde döküm uygulamaları, duvar blokları vb. geniş bir uygulama alanı vardır (İnt. Kyn. 1).

Köpük beton, çimento, ince kum, uçucu kül vb. malzemelere su ilave edilerek mikserde karıştırılıp akıcı kıvamda elde edilen harca kararlı halde köpük ilave edilmesi ile üretilmektedir. Taze beton harcına köpük ilave edilerek sertleşmiş bünyede gözenek oluşturulur, bu nedenle köpük beton adını alır (Siram *et al.* 2012).

Yüksek akış kabiliyeti, düşük birim ağırlık, minimum agrega tüketimi, kontrollü düşük mukavemet değeri, ve mükemmel ısı yalıtım özelliklerine sahiptir. Kuru birim ağırlığı 400-1600 kg/m³ arasında ve basınç mukavemeti 1-15 MPa arasında üretilebilmektedir. Hidratasyonunu tamamlayan köpük beton yeterli dayanım ve dayanıklılık kazanmaktadır (Jones *et al.* 2005).

Köpük beton karışımlara su azaltıcı ya da priz hızlandırıcılar gibi kimyasal katkıları ilave edilebilir. Su azaltıcı katkıları basınç mukavemetini artırabilir ve büzülme çatlaklarını azaltıcı etki yapabilir. Tek başına ya da bir arada, sıcak su, yüksek-erken dayanımlı çimento ve priz hızlandırıcı katkı kullanımı, priz sürecini hızlandırmaktadır. Çelik ile temas eden köpük betonlarda klorür iyonları içeren katkıları kullanılmamalıdır. Köpüğün, üreticiler tarafından standartlara (ASTM C494) uygunluğu belirtilmeli, ya da deneysel çalışma yürütülerek uygunluğu değerlendirilmelidir. Bazen süper plastikleştirici katkıları kullanılmasına karşı bunlar taze harcın stabilitesini bozabilmektedir (Jones *et al.* 2005). Bu nedenle yapı kimyasalları içeriğinde köpüğe zarar verici bileşenlerin olmamasına dikkat edilmelidir.

1.1 Kararlılık (Stabilite)

Bünyede oluşan gözenekler karıştırma, yerleştirme ve priz sürecinde kararlılığını koruyabilmelidir (Khayat and Assaad 2002). Köpük betonun kararlılığı hiçbir ayrışma ve terleme olmadan, aynı kıvam ve

yoğunluk için yaklaşık aynıdır (ölçülen taze harç yoğunluğu/tasarım yoğunluğu).

Kararlılık önceden üretilmiş köpük ve köpüklü betonun taze hal koşullarını tanımlar. Özellikle köpük hacmi baz karışıma göre % 50'den büyükse köpüğün kararlılığı köpük beton üzerinde güçlü bir etkiye sahip olacağı beklenir (Aldridge 2005). Sentetik yüzey aktif maddelerle üretilen köpüklerin gözenek boyutları daha büyük ve açık gözenekli olup, protein kökenli olanlara göre daha az kararlı olduğu söylenebilir (Carthy 2004).

Ayrıca, yüzey yükleri, serbest su miktarı, uçucu kül ve kimyasal katkıları köpük stabilitesini etkileyen faktörlerdir. Köpük betonun kararlılığı; baz karışımın su miktarı, ilave edilen köpük miktarı ve karışımdaki diğer katı bileşenler olarak üç faktöre bağlıdır. Taze halde, kendiliğinden akacak kadar akışkan olduğu kadar, ayrışmaya ve deformasyona karşı koyabilecek kararlılığa da sahip olmalıdır (Rousesel 2007). Bennett (2002), suyun köpükten ayrılarak çökmeyi engellemek için baz karışımın S/Ç oranının oldukça yüksek tutulmasını önermiştir.

Köpük beton harçları geleneksel harçlardan farklı akma özelliklerine sahiptir. Akma limitleri düşük olduğundan kendiliğinden akış yeteneğine sahiptir. Akma özellikleri çok farklı etkenler tarafından belirlenmektedir. Bu etkenler genel olarak; su/bağlayıcı ve su/ince malzeme yüzdesi, çimentonun türü, köpük kimyasalının türü, kullanılan köpüğün yoğunluk değeri, ince taneli malzemenin tipi ve miktarı, taze harç yoğunluk değeri, akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkıların türü ve oranı gibi özelliklerdir. Bundan dolayı köpük betonun akışkanlık özellikleri ile son ürün özellikleri arasında sıkı bağlar vardır. Akışkanlık özelliklerinin belirlenmesi, köpük betonun işlenebilme, pompalanma yeteneği ve kararlılığı konusunda önemli veriler sağlamaktadır.

Düşük kıvamlı olduğu durumda (harcın kıvamı katı halde olduğunda) gözeneklerde bozulma gerçekleşir, ya da çok yüksek kıvamlı ise (gözeneklerin stabilitesi için harç zayıf kalır)

segregasyon başlar ve yoğunlukta artış olur. Stabilité ana karışımın kıvamı ile yakından ilişkili olup su/katı değeri ile biçiminde açıklanabilir. Ana karışıma köpük ilave edildiğinde "beton kıvamında" düşme gerçekleşir. Süper akışkanlaştırıcı katkılar köpüğün stabilitesini azaltmasına karşı yeterli işlenebilirlik elde edilebilmektedir (Saucier *et al.* 1990; Dijik and Jong 1991). Zamanımızda kimyasal katkıların karmaşık yapıları sebebi ile köpük ile olan ilişkilerini genellemek zordur (Du and Folliard 2005).

Kimyasal katkılar; agregalar, mineral katkılar, su ve çimento haricinde karıştırmadan önce veya karıştırma anında sıvı yada toz formunda ilave edilen maddelerin genel adıdır. Karışıma katılan katkılar çimentonun dozajına göre belirlenir. Katkıların başlıca faydaları; betonun maliyetini azaltmak ve bazı beton özelliklerinin etkinliğini artırmaktır (İnt. 2). Betonun karıştırılması, dökülmesi ve yerleştirilmesi süresince gerekli özellikleri karşılaması (erken yada geç priz alma, işlenebilme, istenilen kıvamı sağlama, kalıba yerleşme vb. özellikler). İstenen kıvamda beton elde etmek için gereken su oranını azaltma, istenen akışkanlığı sağlama (beton kıvamını artırma), su/ bağlayıcı oranını azaltmak için kullanılmaktadır.

Katkı tanımı; betonu oluşturan çimento, su, mineral katkılar ve agregaların haricinde, karıştırmadan önce yada karıştırma sürecinde, sıvı yada toz formunda betona ilave edilen maddelerdir. Katkılar karışıma çimentonun oranına bağlı olarak katılır.

Katkılar, taze ve/veya sertleşmiş beton özelliklerini değiştirmek için, karıştırma işlemi sırasında betona, çimento dozajının %5'ini geçmemek üzere eklenen kimyasal maddelerdir.

TS Standartlarında beton katkıları kullanılış amaçlarına göre sınıflandırılmıştır. Betonda kıvamı değiştirmeden su miktarının yüksek oranda azalmasını sağlayan veya su miktarı değişmeden çökmeyi yüksek oranda artıran veya her iki etkiyi birlikte oluşturan katkılar Yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkılar olarak tanımlanır (TS EN 934-2)

Katkılar kimyasal yapılarına göre; lignosülfonat-bazlılar normal, melamin ve naftalin sülfonat formaldehit-bazlı olanlar süper ve polikarboksilat-bazlılar hiper akışkanlaştırıcı katkılar olarak adlandırılır (Ramachandran ve Malhotra 1984, 2004, Şimşek vd. 2004, Neville 2011).

Birinci nesil akışkanlaştırıcılar olan lignosülfonatları çalışan araştırmacılar şekerin rafine edilerek ayrıştırılması ile modifiye lignosülfonatları (MLS) geliştirmişlerdir. Ancak yüksek oranda kullanıldığında kararlılık kaybı ve priz süresinin uzamasına yol açtığından, klasik lignosülfonatlarla en yüksek su azaltma oranı %10'u geçmemektedir (Parlak ve Akman, 2002). İkinci nesil katkılar, melamin (SMF) ve naftalin (SNF) formaldehit sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcılar. Hem su azaltma ve hemde akışkanlık sağlama özelliği lignosülfonatlar'a göre çok daha etkilidir. Yaklaşık %15-30 oranında su azaltabilmektedirler. Bu tür katkılarda en sık karşılaşılan sorun zamanla gelişen işlenebilirlik kaybıdır (Mehta ve Monteiro, 1997). Üçüncü nesil olarak da adlandırılan polikarboksilat esaslı katkılar ise, yüksek oranda su azaltma ve aynı zamanda betonda yüksek işlenebilme özelliği de sağlayan katkılardır (Çil, 2000). Kimyasal katkı sektörü, beton üretiminde ihtiyaçlara cevap verebilecek katkılar geliştirmeye devam etmektedir.

1.2 Su Azaltıcı / Akışkanlaştırıcı Katkılar

Bu katkılar genelde % 5-10 oranında su azaltıcı katkılardır. Sahada normal akışkanlaştırıcı katkı olarak tanınırlar. Genellikle C-20-C-30 betonlarında kullanılmaktadır. Seçilen çimento dozajına göre %1,2 ile % 4 değerlerinde kullanılır. Bunlar linyosülfonat yada hidrokarboksilik asit bazlı olup normal akışkanlaştırıcı olarak anılır.

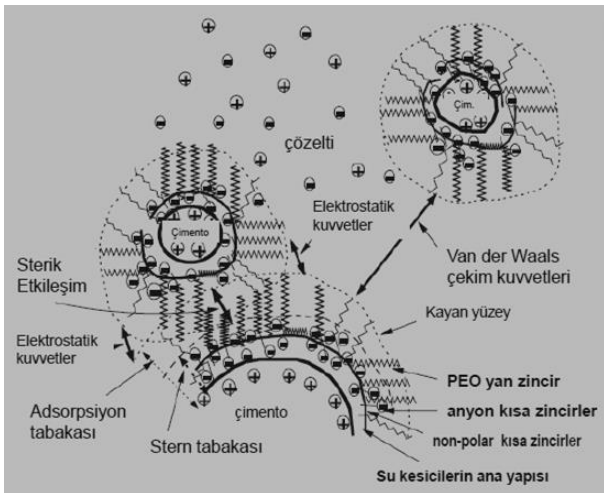
Yüksek miktarda Su Azaltan/Süper Akışkanlaştırıcı Katkılar: genelde su miktarını % 12 ile %25 arasında eksilten katkılardır. Bu katkılara süper akışkanlaştırıcılar denmektedir. Genel olarak beton sınıfı C-30'dan yüksek dayanımlı betonlarda kullanılır. Çimentonun %0,6 ile %3'ü oranında katılır. Bunlar çoğunlukla melamin yada naftalin sülfonat kökenlidir.

Polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkıları geleneksel katkılardan ayıran en önemli özelliği onun büyük ölçüde çimento dağıtma etkinliğini artıran iyi işlenebilir eşsiz mekanizmaya sahip olmasıdır. Melamin ve naftalin sülfonat esaslı

geleneksel yüksek oranda su azaltıcı katkıları çimento partikülleri tarafından absorbe edilen polimerlere dayanmaktadır. Bu polimerler beton karıştırma işleminin çok erken bir aşamasında çimento partiküllerinin etrafını sarmaktadır. Sülfonik grup polimer zincirler çimento partikülünün negatif yükünü artırır ve elektriksel itme ile bu partikülleri dağıtır. Bu elektrostatik mekanizma çimento hamurunun dağılmasına neden olur ve sabit işlenebilirlik için daha az karışım suyu gerektirecek olumlu bir sonuca sahiptir. Polikarboksilik eter esaslı katkı uzun yan zincirlere sahip karboksilik eter esaslı polimerlerden meydana gelmektedir. Karıştırma işleminin başında, bu polimerler geleneksel yüksek oranda su azaltıcı katkıları gibi elektrostatik dağıtma mekanizmasına benzer bir mekanizma göstermektedir. Ancak, polimerin ana zincirine bağlı yan zincirler ayırma ve dağıtma yeteneği kazanan partikülleri dengeleyecek sterik etki meydana getirir. Bu süreç ile önemli ölçüde su miktarını azaltarak akışkan bir beton elde edilmektedir. Bu mekanizma geleneksel yüksek oranda su azaltıcı katkıları göre önemli ölçüde uzun süreli işlenebilirlik, su miktarının azalması ve yüksek erken dayanım sağlamaktadır (İnt. Kyn. 3).

1.3 Beton Katkılarının Çalışma İlkeleri

İki farklı tipteki bu katkıların işlevi, katkının çimento taneciklerini sararak, eksi elektrik yükleyip bu tanelerin birbirlerini itmeye zorlar ve topaklaşmayı engeller. Katkıların etki mekanizmaları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Katkı çalışma mekanizması (İnt Kyn. 2).

1.4 Priz Hızlandırıcı Katkıları

Çabuk priz ve erken mukavemet istenen yerlerde kullanılan sıvı katkı çeşididir. Kullanım alanları; soğuk hava koşullarında ve prefabrike eleman üretiminde kullanılır. Birinci gün sonunda çabuk priz ve mukavemet artışı sağlar. Kullanım şekli çimento dozajının %1 ila %5 arasındadır.

Akışkanlık sağlayan katkıları genelde beton kıvamını sabit tutup su miktarını azaltan, ya da su miktarı aynı kaldığı halde kıvamı artıran katkılarıdır. Bu tip katkıları lignin, melamin ve naftalin sülfonat bazlı süper akışkanlaştırıcı ve günümüzde polikarboksilat temelli hiper akışkanlaştırıcı katkıları biçiminde gelişmişlerdir (Sağlam vd. 2007, Neville 2003, Türkel ve Felekoğlu 2004).

Çimentonun süper akışkanlaştırıcı ile olan uyumunu etkileyen değişik faktörler vardır. Bunlar; çimentonun kimyasal yapısı, tane boyutu dağılımı, içeriğindeki sülfatların miktarı ve çözünme oranı vb. etkenler, betonların akışkanlık özelliklerini belirleyen önemli kriterlerdir (Ramyar 2007, Tangit ve Aitcin 1993).

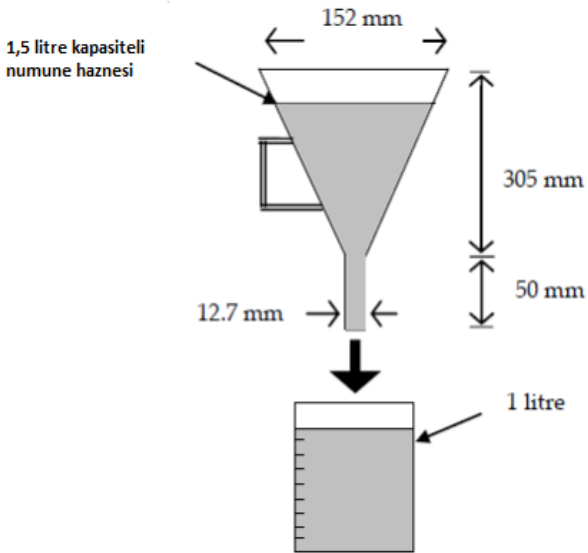
1.5 Reoloji Özellikler

Köpük beton harçlarının akışkanlıkları normal harçlara göre farklılık gösterir. Düşük akma sınırları dolayısı ile kendiliğinden akışkan özelliğe sahiptir. Köpük betonlarda akışkanlığı etkileyen çok sayıda etken vardır. Bunlar genel olarak; su miktarı (su/çimento) ve su/toz oranı, çimentonun tipi, köpük kimyasalının türü, köpüğün yoğunluğu, dolgu malzemesinin türü ve oranı, seçilen taze harç ağırlığı vb. olarak sayılabilir. Buna göre köpük beton harcının akışkanlık özellikleri ile sertleşmiş beton özellikleri arasında sıkı ilişkiler kurulabilir. Reolojik özelliklerin bilinmesi aynı zamanda köpük beton harcının işlenebilme, pompalanabilme ve stabilite özellikleri konusunda değerli bilgiler sunar.

Taze durumdaki köpük beton harcının önemli iki özelliği kıvamı ve reolojisidir. Bu özellikler genel olarak bir akma konisi kullanılarak ölçülmek sureti ile harcın performansı değerlendirilir (Kearsley and

Wainwright 2001). Köpük beton harçlarının akışkanlık özelliklerini Marsh Konisi (Şekil 2.) ile belirlemek yaygın metot olmuştur (Roussel et al. 2005). Bu metot genellikle 1,5 litre hazır harcın bu huniden 1 litresinin akış süresinin ölçülmesine dayanmaktadır. Akma süresi yanında akış davranışı da izlenerek kaydedilir. Bir litre harcın bir dakikadan daha az sürede akması halinde sabit ve dengeli akma şeklinde değerlendirme yapılır (Çizelge. 1, Jones et al. 2003). Buna karşı akma süresi 1 dakikayı geçiyorsa engelli yada zor akan harç şeklinde kayıt edilir. Eğer hiç akma yoksa “akmadı” şeklinde yazılır (Mohammad 2011).

Su/katı oranı ile ifade edilebilen baz karışımın kıvamı, karışıma katılan köpük miktarına bağlı olarak kararlılığı etkileyen en önemli etken olmaktadır. Kıvam büyük ölçüde dolgu malzemesinin cinsi ile ilişkilidir. Katılan köpüğe bağlı olarak baz karışım harcının kıvamı önemli ölçüde azalır. Kıvamdaki azalma kendi ağırlığının azalmasından ve hava oranının artışından gelen kohezyon sebebiyledir. Bu çalışmada köpük betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleyen en önemli faktör olan reolojik özellikler Marsh Konisi yöntemi ile incelenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Kullanılan akış (Marsh) konisi.

Çizelge 1. Köpük beton harcının akma süresine göre yapılan sınıflandırılma (Dhir et al. 1999).

Temel Sınıf*	Tanımı	Alt sınıfı	Açıklama
1	1 litre < 1 dk	A	Sabit-düzenli akma
2	1 litre > 1 dk	B	Kesikli olarak akma
3	0.5 litre < akış < 1 litre	C	Hafifçe sıkıştırılarak akışın tamamlanması
4	Akma < 0,5 Litre	-	Sadece 1. ve 2. akış
5	Akma yoktur	-	sınıfları uygundur.

*Sadece 1. ve 2. sınıf akışlar kullanıma uygundur.

Düşük kıvamda (harcın kıvamı çok katı ise gözenekler bozulur) ya da aşırı yüksek olduğunda (gözenekleri tutabilmek için harç zayıf kalarak ayrışmaya neden olur) yoğunlukta artış meydana gelir. Stabilite karışımın kıvamına bağlı olup su/katı oranı olarak açıklanabilir. Baz karışıma ilave edilen köpük, “köpük beton kıvamını” düşürür. Süper akışkanlaştırıcı kullanımı köpüğün kararlılığını azaltmakla birlikte gerekli işlenebilmeyi sağlamaktadır (Saucier et al. 1990, Dijik 1991) Oldukça karmaşık yapıları nedeniyle kimyasalların köpük ile olan ilişkilerini genellemek zordur (Du and Folliard 2005).

Reçeteyi oluşturan bileşenler, reoloji ve kıvamı belirleyen ana faktörlerdir. Karışımındaki su muhtevası kıvam ve reolojiyi belirleyen ana faktördür. Taze harcın işlenebilirliğini etkileyerek ayrışmasına yol açacağından minimum su/çimento oranı seçilmesi uygun olmaktadır (Valore 1956).

Reçetede kullanılan bileşenler ile kullanılan katkılar Köpük betonun su ihtiyacını belirlemektedir. Su miktarı ayrıca reçetenin homojen yapısını, kıvamını ve kararlılığı belirlemektedir (Nambiar and Ramamurthy 2008, Karl and Woerner 1994).

Su içeriğinin düşük olması karışımın çok katı olmasına, karıştırma sırasında kabarcıkların sönümlenmesine neden olmakta ve yoğunluğu artırmaktadır (Nambiar and Ramamurthy 2006, a). Aynı biçimde yüksek su içeriği, harcın köpükten ayrılarak kabarcıkları koruyamaması sonucu nihai yoğunlukta artışa neden olmaktadır (Nambiar and Ramamurthy 2006, b). Buna göre her iki koşulda da çökme gelişmektedir. Genellikle su/çimento oranı 0,4 - 1,25 yada hedeflenen yoğunluğun %6,5 ile %14'ü olarak önerilmektedir (Amran et al, 2015).

Valore (Valore 1954) göre, su/çimento oranı artırılırsa kum da artırılmalıdır. Bir ön hesaplama ile tayin edilen su/çimento miktarı yerine kıvam gözlemlenerek, karışıma uygun miktarda su katılabilir. Bununla birlikte, baz karışımın işlenebilirliğini ve hedef taze köpük beton dizaynını elde etmek için yeterli su miktarı dikkate alınmalıdır. Aksi durumda çimento tanecikleri köpüğün suyunu emerek köpüğün hızla bozulmasına yol açabilir (ASTM C869-91; Kearsley and Visagie 1999; BCA, 1994).

Kıvamı ve akışkanlık değerlerini geliştirmek, köpük betona KYB özelliği sağlamak, bağlayıcı ile köpük arasında adezyon ve kohezyonu geliştirmek için karışımındaki bileşenlerin doğru hesaplanması gerekir (Karl and Woerner 1994). Yoğunluğu hafif iri agregalar kıvamı negatif yönde etkilemektedir. Bu soruna çözüm olarak uçucu kül ilavesi önerilmektedir (Nambiar and Ramamurthy 2008).

İri agrega hacmi toplam agreganın 1/4' ünü geçmemeli ve tane boyutu maksimum 4 mm olmalıdır. İri agreganın artması köpükte bozulmaya yol açmaktadır (Kayali et al 2003; BS EN 12350; Jones et al 2003). Ayrıca S/Ç oranının artması ve köpük miktarındaki bir azalma plastik haldeki yoğunluğu artırmakta, buna karşılık kıvamı ve reolojiyi olumsuz etkilemektedir (Nambiar and Ramamurthy 2006). Fazla miktardaki köpük, hava miktarını artırıp taze beton kıvamını azaltırken, süper akışkanlaştırıcı katkıları akma hızını artırmaktadır (ASTM C796). Akışkanlaştırıcıların kullanım amacı işlenebilirliği iyileştirmek ve köpük betonun kıvamını korumaktır (Tikalisky et al 2004; Shi 2002; Ergene 1975).

Taze betonun akışkanlık ve plastiklik performansını geliştirmek için kullanılan su azaltıcı katkıları ayrışmaya yol açmazlar (Agarwal et al 2000). Köpük betonda en çok flor içeren yüzey aktif maddeler (FS1) akışkanlaştırıcı olarak tercih edilmektedir. FS1 karışım suyunu azaltırken, aynı zamanda hidrasyonu hızlandırmaktadır (Jezequel and Mathonier 2014).

Köpük beton, istenen akışkanlık ve sıkıştırılabilirliği sağlamak için, su içeriğinden ve katılan köpük miktarından kısmen etkilenecek, kendiliğinden yerleşen betona benzer şekilde tasarlanır. Genellikle istenen özelliklere sahip köpük beton elde etmek için deneme ve yanılma süreci pratik yöntem olarak benimsenmiştir. (Nehdi et al. 2001)

Katı kıvamdaki bir karışım, kabarcıkların dağılmasına yol açarken, kıvamı yüksek (aşırı akışkan) bir karışım ise bünyedeki kabarcıkları tutamayıp ayrışmaya yol açabilir. Bu sebeple karalılığı korumak için yoğunluk oranları (örneğin, taze beton ve sertleşmiş beton yoğunluğu) 1/1'e yaklaşmalıdır (Ramamurthy et al. 2009).

2. Materyal ve Metot

Çalışmada bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R Tipi Portland çimentosu ve F tipi uçucu kül, kullanılmıştır (Çizelge 2). Köpük üretiminde sentetik esaslı köpük ajanı kullanılmıştır.

Çizelge 2. Çimento ve uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri.

% Oksit	CEM I 42,5 R	Uçucu kül
SiO ₂	16.80	56.01
Al ₂ O ₃	4.81	22.35
Fe ₂ O ₃	3.55	9.84
CaO	63.90	2.12
MgO	1.94	3.76
Na ₂ O	0.74	0.19
K ₂ O	1.24	2.07
SO ₃	3.02	0.60
K.K.	1.24	1.08
Serbest Kireç	1.90	-
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3.12	2.1
Özgül yüzey (Blaine, cm ² /g)	3315	3465
Priz baş. (dak)	177	-
Priz sonu (dak)	244	-

Köpük beton üretiminde iki farklı yöntem vardır: 1) Ön köpük üretim yöntemi ve 2) Karışıma köpük ajanı ilave yöntemi (Mohammed and Hamad 2014). Bunlardan ön köpük üretim yöntemi daha ekonomik ve pratik olduğu için daha çok tercih edilmektedir. Çalışmada ön köpük üretim yöntemi uygulanmıştır.

Köpük beton harcı için malzemeler belirlenen karışım oranlarına göre tartılarak hazırlanmış ve belirlenen döküm yoğunluğunda malzemelerin üniform bir şekilde dağılması için, mekanik olarak karıştırılmıştır (Çizelge 3). Köpük beton harcın hazırlanmasında

aşağıdaki sıra takip edilmiştir. Köpük makinesinde köpük üretimi yapılarak hazır hale getirilmiştir. Kullanılan köpüğün litre ağırlığı bütün karışımlarda 80 g/L olarak tasarlanmış ve bu ağırlıkta köpük üretilerek kullanılmıştır. (Şekil 3). Birinci aşamada sırasıyla; karışım suyu (katkılarla birlikte), lif katkısı, çimento, uçucu kül, kütlece oransal olarak alınmıştır. Karşılaştırmalı sonuçları elde etmek amacı ile taze harç yoğunlukları 700 g/L ve 800 g/L olarak iki farklı yoğunlukta tasarlanmıştır. Karışımlara biri katkısız (kontrol serisi), ve iki farklı özellikte süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Bunlar “Melamin sülfonat polimeri esaslı süper akışkanlaştırıcı” (SAm) ve Polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı (SAP) sırasıyla çimento kütlelerinin %0.35; %0.5 ve %0.75 oranında katılmıştır. Köpük beton örneklerin hızlı priz yapmalarını sağlamak amacı ile çimento kütlelerinin %3’ü oranında priz hızlandırıcı (P) kullanılmıştır (Çizelge 3).

Çizelge 3. Örneklerin karışım oranları.

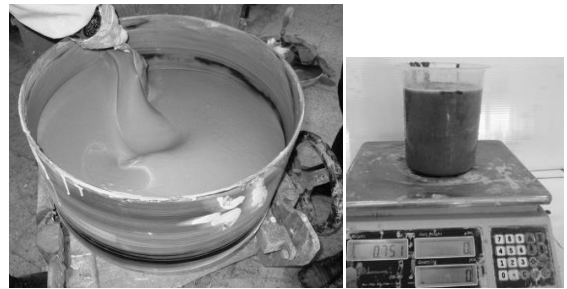
Ser i	Çim .	U K	Sam (%)	Sap (%)	P (%)	S/Ç	S/T	THY. (Gr/L)
1	2	2	-	-	3	0.85	0.52	700
2	2	2	0.35	-	3	0.70	0.48	700
3	2	2	0.5	-	3	0.70	0.48	700
4	2	2	0.75	-	3	0.70	0.48	700
5	2	2	-	0.35	3	0.70	0.48	700
6	2	2	-	0.5	3	0.70	0.48	700
7	2	2	-	0.75	3	0.70	0.48	700
8	2	2	-	-	3	0.85	0.52	800
9	2	2	0.35	-	3	0.70	0.48	800
10	2	2	0.5	-	3	0.70	0.48	800
11	2	2	0.75	-	3	0.70	0.48	800
12	2	2	-	0.35	3	0.70	0.48	800
13	2	2	-	0.5	3	0.70	0.48	800
14	2	2	-	0.75	3	0.70	0.48	800

Kısaltmalar: UK: Uçucu kül, SAm: Melamin sülfonat polimeri esaslı süper akışkanlaştırıcı, SAP: Polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı, P: Priz hızlandırıcı katkı S/Ç:Su/Çimento, S/T: Su/Toz oranı, THY: Taze Harç Yoğunluğu.

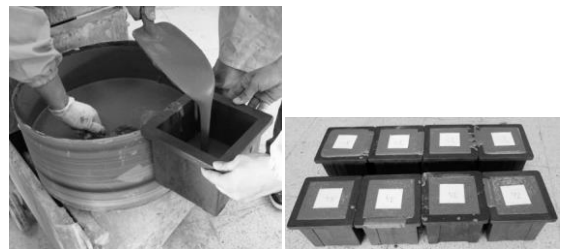


Şekil 3. Köpük üretimi ve yoğunluk kontrolü.

Rötre çatlaklarını önlemek amacı ile, çimentonun %0.5'i oranında polipropilen lif ilave edilmiştir. Harcın akışkanlığı dikkate alınarak S/Ç oranları 0.70 ile 0.85 arasında seçilmiştir. İkinci aşamada belirlenen hedef taze harç yoğunluğunu elde edilebilmesi için belirlenen yoğunlukta ve gerekli miktarda köpük miksera ilave edilerek homojen karışım sağlanıncaya kadar karıştırma işlemi uygulanmıştır (Şekil 4). Kullanılan köpük yoğunluğu bütün karışımlar için 80 g/L olarak seçilmiştir. Homojen hale gelen taze harcın yoğunluğu tartılarak belirlenmiştir (Şekil 4). Eğer yoğunluk fazla ise yeterli miktarda köpük ilavesi yapılarak tekrar karıştırma işlemi ve tartım yapılarak istenen taze beton yoğunluğu elde edilmiştir. Taze haldeki köpük beton harcı beklenmeden kalıplara dökülmüştür Her bir seriden en az 6 adet küp numune (15x15x15 cm) üretilmiştir (Şekil 5).



Şekil 4. Homojen halde köpük beton harcı üretimi ve taze harcın yoğunluk kontrolü (g/L).



Şekil 5. Köpük beton harcının kalıplara dökümü.

Üretilen her seri için ayrı ayrı olmak üzere koni akış süreleri ölçülerek kaydedilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Düzenli akış (sol), kesikli akış (sağ).

3. Bulgular

Çalışmada köpük beton üretiminde katkı olarak kullanılan iki farklı özellikte süper akışkanlaştırıcı ve bir adet priz hızlandırıcı katkının köpük betonun akışkanlık özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmada taze harç örnekleri üzerinde Marsh Konisi yöntemi ile akışkanlık testleri yürütülmüştür. Elde edilen bulgular bu bölümde sunulmuştur. Çalışmada kullanılan kimyasal katkıların akış sürelerine etkisi Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 4. Kimyasal katkıların akış sürelerine etkisi.

Seri	Çim.	UK	Sam (%)	Sap (%)	P	S/Ç	S/T	AS (s)	BA* (kg/m ³)	Bas. Dy.** N/mm ²	Açıklama
1	2	2	-	-	3	0.85	0.52	Akma yok	-	-	KÇ
2	2	2	0.35	-	3	0.70	0.48	65	600	1.85	-
3	2	2	0.5	-	3	0.70	0.48	54	600	1.72	-
4	2	2	0.75	-	3	0.70	0.48	28	-	-	KÇ
5	2	2	-	0.35	3	0.70	0.48	50	600	2.14	-
6	2	2	-	0.5	3	0.70	0.48	38	600	2.30	-
7	2	2	-	0.75	3	0.70	0.48	24	-	-	KÇ
8	2	2	-	-	3	0.85	0.52	Akma yok	-	-	Ç
9	2	2	0.35	-	3	0.70	0.48	57	660	1.94	-
10	2	2	0.5	-	3	0.70	0.48	48	660	1.81	-
11	2	2	0.75	-	3	0.70	0.48	24	660	-	KÇ
12	2	2	-	0.35	3	0.70	0.48	46	660	2.53	-
13	2	2	-	0.5	3	0.70	0.48	34	660	2.64	-
14	2	2	-	0.75	3	0.70	0.48	21	660	-	KÇ

Kısaltmalar: UK: Uçucu kül, SAm: Melamin sülfonat polimeri esaslı süper akışkanlaştırıcı, SAp: Polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı, P: Priz hızlandırıcı katkı S/Ç:Su/Çimento, S/T: Su/Toz oranı. AS: Akış süresi, BA*: Kuru birim ağırlık (± 5 g), Ç: Çökme, KÇ: Kısmi çökme. ** Basınç Dayanımı TS 13655'te 1,5 N/mm² olarak verilmiştir.

SA katkı kullanılmayan (kontrol serisi) örneklerde belirli bir akışkanlık için gerekli olan su miktarında artış olmuştur. Bununla birlikte sudaki artışa karşı koniden akış süreleri (AS) uzamış ve genel olarak akış süreleri 1 dk'yı geçmiştir (engelli akış). Diğer bir deyimle karışımın su miktarı artmasına karşılık yeterli bir akışkanlık sağlanamamıştır. Taze harç yoğunluğu 700 g/L olan (no:1-7) ve SA katkısı kullanılan serilerde akış süresi 24- 65 s arasında tamamlanmıştır. Buna karşı harç yoğunluğu 800 g/L olan (no:8-14) ve SA katkısı kullanılan serilerde akış süresi 21- 57 s arasında tamamlanmıştır (Çizelge 4).

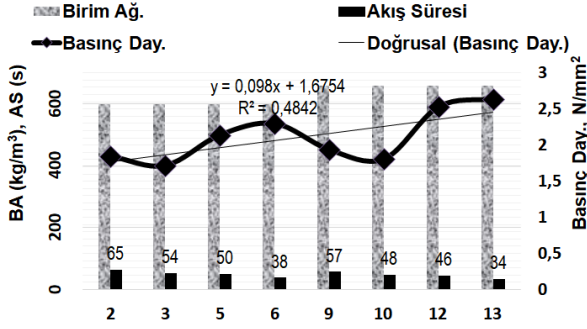
Harca %0.35-%0.5 oranında katılan örneklerde çökme görülmemiştir. SA katkının %0.7,5 olarak katıldığı serilerin tamamında 30 s'nin altında akış tamamlanmıştır (aşırı akışkan). Bu karışımlarda aşırı

akışkanlıktan kaynaklanan çökmeler ve/veya kısmen çökmeler meydana gelmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Uygun olmayan kıvamlardaki örneklerde segregasyon gelişimi.

Örneklerin birim hacim ağırlık değerleri 600- 660 kg/m³ arasında değişmektedir. Basınç mukavemetleri 1.72- 2.64 N/mm² arasında değişmekte ve standartta (TS 13655) verilen 1,5 MPa değerini sağlamıştır (Çiz. 4, Şek. 8).



Şekil 8. Örneklerin birim ağırlık, akış süresi, mukavemet ilişkisi.

4. Tartışma ve Sonuç

Elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur. Kalıplara dökülen taze haldeki köpük beton örneklerden bazı karışım serilerinde priz süreci içinde çökmeler (segregasyon) gelişmiştir (Şekil 7). Bu karışımlar; göreceli olarak su/çimento oranının yüksek olduğu ve SA katkısı kullanılmayan (kontrol) seriler ve SA katkısının yüksek oranda (%0.75) kullanıldığı serilerde gerçekleşmiştir.

Akışkanlaştırıcı katkı katılan örneklerde, katılmayanlara göre aynı karışım ve akışkanlık değerleri için daha az su ihtiyacı belirlenmiştir. Polikarboksilik eter kökenli (SAp) ve düşük alkali oranına (%3) sahip süper akışkanlaştırıcılar Melamin sülfonat polimeri kökenli (SAM) ve yüksek alkaliliğe (%7) sahip süper akışkanlaştırıcılara göre Koni akış sürelerini azaltmıştır. Diğer bir deyimle aynı akışkanlık değerini elde etmek için gerekli su miktarı azalmıştır. Diğer araştırmacılar da benzer sonuçlar bulmuşlardır (Pan et al. 2014).

Taze harcın yoğunluğundaki bir düşme (köpük miktarında artma) akış süresini uzatmakta, yani akışkanlıkta azalma gerçekleşmektedir.

Akış süresi 30 sn'nin altına düştüğünde (aşırı akışkan) mekanik özellikler (basınç dayanımı vb.) olumsuz etkilenmektedir. Bunun su/bağlayıcı oranındaki artıştan kaynaklandığı ve normal betonlara benzer bir davranış gösterdiği düşünülmektedir.

Köpük beton harcına katılacak su miktarının belirlenmesinde Marsh Hunisi pratik bir fayda sağlamıştır. Harcın akma süresi 1 dakikayı geçtiğinde, harcın yüksek viskoziteli olduğu ve nihai ürünün mekanik özellikleri negatif yönde etkilendiği tespit edilmiştir. Buna karşı akış süresinin 30 sn'den kısa olduğu durumlarda aşırı akışkanlık ve buna bağlı olarak kalıpta çökmeye (ayrışma) yol açmaktadır.

Kullanılan akışkanlaştırıcı katkı türlerinden Polikarboksilik eter esaslı (SAp) katkının aynı oranlarda Melamin sülfonat polimeri esaslı (SAM) katkıya göre akışkanlık sürelerinde azalma (daha akışkan) ve buna bağlı olarak daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir.

Köpük beton üretiminde karşılaşılan önemli bir problem taze harcın kalıba döküldükten sonra priz sürecini tamamlayamadan segregasyon (çökme) oluşmasıdır. Çökme olayı taze harcın akışkanlık özelliği ile ilgili olup hem aşırı akışkan harçlarda ve hem de akışkanlığı düşük harçlarda gelişebilmektedir. Harcın akışkanlığını artırmak için uygun akışkanlaştırıcı katkı ve buna bağlı akış süreleri Marsh konisi yöntemi ile ölçülmüştür. Çalışmada Polikarboksilik eter esaslı (SAp) düşük alkali oranına sahip akışkanlaştırıcı katkı tipinin daha yüksek performans gösterdiği belirlenmiştir. Köpük beton taze harçlarının akışkanlık özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesinde Marsh konisi yönteminin özellikle şantiye ortamında kolay ve pratik bir yöntem olarak önerilebileceği sonucuna varılmıştır.

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

5. Kaynaklar

Agarwal, S.K, Masood, I. and Malhotra, S.K., 2000. Compatibility of superplasticizers with different cements. *Construction and Building Materials*, **14 (5)**, 253–259.

Aldridge, D., 2005. Introduction to foamed concrete What, Why and How? In: Dhir, R.K., Newlands, M.D. and McCarthy, A. (Eds). *Use of foamed concrete in construction*. London: Thomas Telford. 1-14.

- Amran, Y.H.M, Farzadnia, A.A. and Abang A., 2015. Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*, **101**, 990–1005.
- Anonim, 1997. 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.
- Anonim, 2017. ASTM C 494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ACI.
- Anonim, 1991. ASTM, Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete, ASTM C869-91, Q. C138, Philadelphia.
- Anonim, 1997. 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.
- Anonim, 2009. BS EN 12350-6, Testing Fresh Concrete: Density, British Standards Institution, London, UK.
- Anonim, 1994. British Cement Association (BCA), Foamed Concrete; Composition and Properties, Report Ref. 46.042, Slough.
- Anonim, 2010. TS EN 934-2 Kimyasal katkılar- Beton, harç ve şerbet için- Bölüm 2: Beton katkıları- Tarifler ve özellikler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme, Ankara.
- Anonim, 2016. TS 13655 Kâgir Birimler - Özellikler - Köpükbeton Kâgir Birimler, Ankara.
- Bennett, D., 2002. Innovations in Concrete, Thomas Telford, London, 62.
- Dhir, R.K., Jones, M.R. and Nicol, L.A. (1999). Development of structural grade foamed concrete. Final Report, DETR Research Contract 39/3/385, pp.84.
- Dijk, V.W. and Jong, P., 1991. Determining the Rn exhalation rate of building material using liquidscintillation counting. *Health Physics*. **64 (4)**, 501-509.
- Du, L. and Folliard, K. J., 2005. Mechanisms of air entrainment in concret, *Cement and Concrete Research*, **35 (8)**, 1463-1471.
- Ergene, M. T., 1975. Foamed Concrete Structures, Hamburg, NY (US), Patent AU 115 FX Ergene, Stanley Works, New Britain, Patent no. US3867159A
- Jezequel, P.H. and Mathonier B., 2011. Foamed Concrete, Lafarge, Washington, DC (US), Patent no. WO2011101386A1.
- Jones, M. R., McCarthy, M.J., 2003. Moving fly ash utilization in concrete forward: a UK perspective, in: Proceedings of the International Ash Utilisation Symposium, Centre for Applied Energy Research, University of Kentucky, 20–22.
- Jones, MR, McCarthy, A., 2005. Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. *Magazine of Concrete Research*, **57**:21–31.
- Karl, S. and Woerner, JD., 1994. Foamed Concrete-mixing and Workability, in: Rilem Proceedings.; Chapman and Hall, 217.
- Kearsley, EP and Visagie, M., 1999. Micro-properties of Foamed Concrete. Specialist Techniques and Materials for Construction, Thomas Telford, London, 173–184.
- Kearsley, E.P. and Wainwright P.J., 2001. The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete, *Cement and Concrete Research*, **3 (1)**, 105–112.
- Khayat, K.H. and Assaad, J., 2002. Air-void stability in self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, **99(4)**, 408-416.
- Kayali, O., Haque M.N., and Zhu, B., 2003. Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, **25 (2)**, 207–213.
- McCarthy, A., 2004, Thermally insulating foundations and ground slabs for sustainable housing using foamed concrete, PhD Thesis, University of Dundee.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., 1997. Concrete Microstructure, Properties and Materials, Chapter 8: Admixtures, Indian Concrete Institute, Chennai, 256-271.
- Mohammad, M., 2011. 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, 214.
- Mohammed, J.H., and Hamad A. J., 2014. A classification of lightweight concrete: materials, properties and

- application review, *International Journal of Advanced Engineering Applications*, **7 (1)**, 52-57
- Nambiar, E.K.K., and Ramamurthy, K., 2006 (a). Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology, *Cement and Concrete Composites*, **28 (9)**, 752–760.
- Nambiar, E.K.K., and Ramamurthy, K., 2006 (b). Influence of filler type on the properties of foam concrete, *Cement and Concrete Composites*, **28 (5)**, 475–480.
- Nambiar, E.K., and Ramamurthy, K., 2008. Fresh state characteristics of foam concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **20 (2)**, 111–117.
- Nehdi, M., Djebbar Y., and Khan A., 2001. Neural network model for preformed foam cellular concrete. *ACI Materials Journal*, **98**, 402–409.
- Neville, A., 2003. Neville on Concrete, ACI International. Farmington Hills, Michigan.
- Neville, A.M., 2011. Properties of Concrete. Fifth ed. Prentice Hall, Harlow, UK, 822-890.
- Pan, Z., Li H. and Liu W., 2014. Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures. *Construction and Building Materials* **72**, 256–261.
- Parlak N., ve Akman M. S., 2002, Lignosülfatların üretimi, özellikleri ve süper akışkanlaştırıcı olarak geliştirilmesi, *Sika Teknik Bülten*, **1**, 3-13.
- Ramachandran, V.S. and Malhotra, M., 1984. Concrete Admixtures Handbook-Part 7: Superplasticizers, Noyes Publications, 462-63.
- Ramamurthy, K., Nambiar, E., Ranjani, G., 2009. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, **31(6)**, 388–96.
- Ramyar, K., 2007, Portland Çimentosu-Süperakışkanlaştırıcı Katkı Uyumunu Etkileyen Faktörler. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumuna Sunulmuş Bildiri, 197-208.
- Rousesel, N., 2007. Rheology of fresh concrete: from measurements to predictions of casting processes, *Materials and Structures*, **40**, 1001-1012.
- Roussel, N., and Coussot, P., 2005. Fifty-cent rheometer for yield stress measurements : from slump to spreading flow. *Journal of Rheology*, **49 (3)**, 705–718.
- Saucier, F., Pigeon, M. and Plante, P., 1990. Air-void Stability, Part III: Field test of Superplasticized Concretes, *ACI Materials Journal*, **87 (1)**, 3-11.
- Sağlam, A.R., Parlak N. ve Özkul M.H. 2007. Polikarboksilat Esaslı Kimyasal Katkıların Beton Üretiminde Kullanımı. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumuna Sunulmuş Bildiri, 107-120.
- Shi, C., 2002. Composition of materials for use in cellular lightweight concrete and methods thereof, Advanced Materials Technologies LLC, Hamburg, NY (US); Patent no: US6488762 B1.
- Siram, K.K.B., 2012. Cellular Light-Weight Concrete Blocks as a Replacement of Burnt Clay Bricks, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, Volume-2, Issue-2, 149-151.
- Şimşek, O., Dur, A. ve Yaprak, H., 2004. Silis dumanı ve Süperakışkanlaştırıcı Katkılı Harçların Özellikleri, *Politeknik Dergisi*, **7 (2)**, 41-44.
- Tangit-Hamou, A., and Aitcin, P.C., 1993. Cement and Superplasticizer Compatibility, *World Cement*, **24 (8)**, 38-42.
- Tikalsky P.J., Pospisil J. and MacDonald W., 2004. A method for assessment of the freeze–thaw resistance of preformed foam cellular concrete, *Cement and Concrete Research*, **34 (5)**, 889–893.
- Türkel, S., Felekoğlu, B., 2004. Aşırı Dozda Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Kullanımının Taze Ve Sertleşmiş Betonun Bazı Özellikleri Üzerine Etkileri, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, **6(1)**, 77- 89.
- Valore JRC., 1956. Insulating concretes, American Concrete Institute (ACI) Proceedings, 53 (11).
- Valore JRC., 1954. Cellular concretes Part 1 composition and methods of preparation, *American Concrete Institute (ACI) Proceedings*, **50 (5)**, 773-796.

İnternet Kaynakları

- 1- www.foamconcrete.co.uk (15.12. 2016)
- 2- www.iksa.com.tr/pdf/beton1.pdf (04.05.2017)
- 3- <https://www.master-buildersolutions.basf.com.tr/> (04.05.2017)