

## Hazır Beton Sektörüne Uygun Polikarboksilat Esaslı Süper Akışkanlaştırıcı Katkı Seçimi ve Kendiliğinden Yerleşen Beton Üretimindeki Performansı

Eren Gödek, Burak Felekoğlu, Kamile Tosun Felekoğlu

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi ABD, İzmir.

e-posta: egodek89@gmail.com, burak.felekoglu@deu.edu.tr, kamile.tosun@deu.edu.tr

Geliş Tarihi:26.01.2015; Kabul Tarihi:07.04.2015

### Özet

Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB), sahip olduğu yüksek akıcılık ve aynı zamanda ayrışma direnci özellikleri sayesinde, hazır beton sektöründe gün geçtikçe artan oranda kullanılmaktadır. Özellikle polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıları KYB üretiminin vazgeçilmez bileşenleri arasındadır. Kimyasal yapıları gereği sınırsız modifikasyon olanağı bulunan polikarboksilat kökenli süper akışkanlaştırıcılar, hazır beton sektöründe kendiliğinden yerleşebilirliği uzun süre koruma ihtiyacına cevap verebilmektedir. Bu çalışma kapsamında piyasadan temin edilen 3 farklı polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcının taze çimento hamurunun reolojik davranışına etkileri incelenmiştir. Elde edilen veriler değerlendirilerek, etkili akışkanlık sağlama ve işlenebilirliği koruma açılarından en uygun süperakışkanlaştırıcı seçilmiştir. Bu katkı kullanılarak 2 farklı su-çimento (S/Ç) oranında KYB üretimi gerçekleştirilmiştir. Taze betonun yayılma çapı, 500 mm yayılma çapına ulaşma süresi ( $T_{500}$  süresi) ve L-kutusu geçiş yeteneği ölçülmüştür. KYB'lerin 3, 7 ve 28 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımları da test edilerek mekanik performansları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, reolojik açıdan uygun bir polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı seçilmesi durumunda, kendiliğinden yerleşebilirliğini 1 saat koruyan C30/37 sınıfı beton üretilebileceğini göstermiştir.

### Anahtar kelimeler

Kendiliğinden Yerleşen Beton; KYB; Süper Akışkanlaştırıcı; Polikarboksilat

## Polycarboxylate-Based Superplasticizer Selection for Ready-Mixed Concrete Industry and Performance in Self-Compacting Concrete Production

### Abstract

Self-Compacting Concrete (SCC) exhibiting high fluidity and segregation resistance at the same time is increasingly used in ready-mix concrete industry day by day. In particular, polycarboxylate based superplasticizers are indispensable components of SCC production. Polycarboxylate based superplasticizers providing unlimited modification possibilities due to its chemical structure can respond to the need for long-term self-compactability retention in ready mixed concrete industry. The effects of 3 different polycarboxylate based superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement paste have been investigated in this paper. The most appropriate superplasticizer was selected in terms of providing effective fluidity and retaining workability by evaluating the obtained data. SCCs were prepared at 2 different water-cement (W/C) ratios by using this superplasticizer. Slump flow diameter, time for reaching 500 mm flow diameter ( $T_{500}$  time), and L-box passing ability of fresh concrete were measured. The mechanical performances of SCCs were evaluated by testing compressive and splitting tensile strengths at 3, 7 and 28 days. Results showed that, SCC maintaining self-compactability up to 1 hour at C30/37 strength grade could be produced by choosing a proper polycarboxylate based superplasticizer.

### Keywords

Self-Compacting Concrete; SCC; Super Plasticizer; Polycarboxylate

## 1. Giriş

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), geleneksel betona (GB) kıyasla oldukça yüksek akıcılığa sahip, aynı zamanda ayrışmaya dirençli, herhangi bir dış etkiye gerek duymadan kendi ağırlığı ile kalıplara yerleşebilen özel bir beton türüdür. 1980'li yılların başında Japonya'da betonarme yapılarda kalıcılık sorunları incelenmiş ve bu sorunların en önemli sebeplerinden birinin, taze betonun yeterli sıkıştırma işlemi uygulanmadan yerleştirilmesi olduğu saptanmıştır (Felekoğlu, 2003). KYB'ye benzer bir betonun gerekliliği ilk olarak 1986 yılında Okamura tarafından dile getirilmiş, 1988 yılında ise mevcut malzemeler kullanılarak ilk KYB prototipi Tokyo Üniversitesi'nde Ozawa tarafından geliştirilmiştir (Okamura ve Ouchi, 2009).

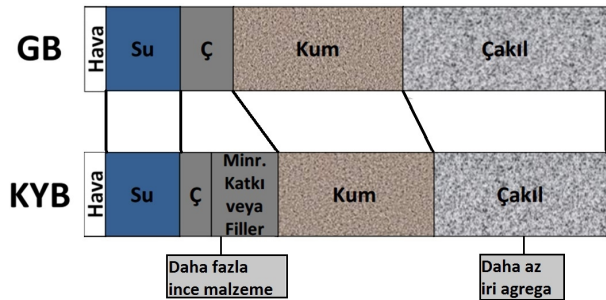
KYB, geleneksel betona kıyasla aşağıda listelenen avantajlara sahiptir.

- ✓ Vibrasyona gerek duymadan kendi ağırlığı ile yerleşir,
- ✓ Sık donatılı ve dar kesitlerde maksimum dolulukta yerleşme sağlar,
- ✓ Bağlantılı boşluk miktarını azaltarak daha dayanıklı bir yapı meydana getirir,
- ✓ Daha pürüzsüz bir yüzey elde edilir, perdahlanabilirlik kolaylaşır
- ✓ Hızlı ve seri üretim sağlar,
- ✓ Kalifiye eleman ihtiyacını azaltır.

Diğer taraftan KYB'nin kullanım potansiyelini azaltan bazı dezavantajlar da bulunmaktadır. Bunlar;

- × Malzeme maliyeti yüksektir,
- × Bazı tasarım yöntemleri bulunmakla beraber kesinleşmiş bir üretim standardı yoktur (Hughes vd., 2002)
- × İnce malzeme miktarı fazla olduğundan plastik büzülme hassasiyeti vardır, erken yaşlarda iyi kür yapılmalıdır,
- × Hidrostatik basınç etkisi sebebiyle daha sağlam kalıplara ihtiyaç duyulur,
- × Eğimli kesitlerde uygulanması güçtür.

KYB ve geleneksel beton tasarımında kullanılacak malzeme miktarları hacimce bazı farklılıklar göstermektedir (Şekil 1). KYB tasarımında kullanılacak iri agrega miktarı istenen akıcılık ve kıvam şartlarının sağlanabilmesi için genellikle hacimce %45-50 civarında kullanılmaktadır. Bu sınırlandırma genellikle sistemdeki fazla iri agreganın ince agrega ya da mineral katkı ile ikame edilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Geçmişte yapılan çalışmalar dikkate alındığında kireçtaşı tozu, uçucu kül ve granüle edilmiş yüksek fırın cürufu gibi inert malzemelerin veya mineral katkıların KYB üretiminde kullanılmasıyla, üretim için gereken çimento miktarı azaltılabilmektedir. Aynı zamanda işlenebilirlik ve dayanıklılık özellikleri geliştirilerek, daha ekolojik ve ekonomik tasarımlar elde edilmiştir (Uysal ve Yılmaz, 2010). Maksimum iri agrega hacminin yanısıra, maksimum tane boyutunun da sınırlandırılması gerekmektedir. İri agrega boyutunun azalması KYB'nin kırılma tokluğunu azaltmaktadır (Beygi vd., 2014).



Şekil 1. KYB ile GB tasarımında hacimsel farklılıklar

KYB tasarımının en önemli hedefi, 650-800 mm yayılabilme özelliğini sağlarken aynı zamanda betonun ayrışmasını ve terlemesini engellemektir. Bu tasarım yöntemine göre tipik bir karışım için tavsiye edilen malzeme miktarları Tablo 1'de gösterilmiştir (Aykan vd., 2004). Benzer kriterlerin dikkate alındığı bir başka tasarım örneği de, EFNARC (2005)'de bulunmaktadır.

**Tablo 1.** KYB'nin tasarım yöntemine göre tavsiye edilen malzeme miktarları (Aykan vd., 2004)

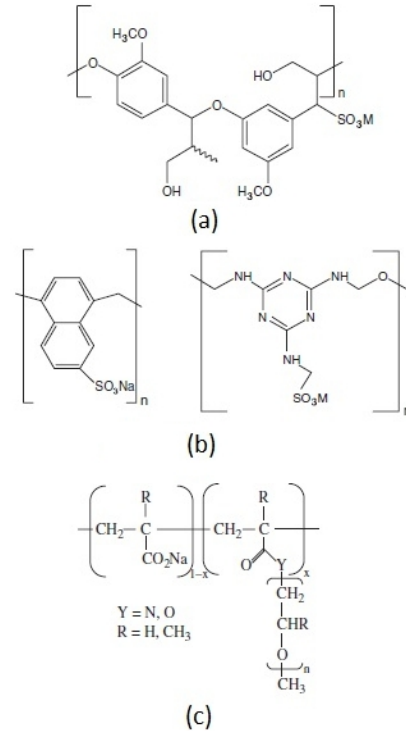
İnce Malzeme Miktarı (<0.125 mm)	400-600 kg/m <sup>3</sup>
Kum Miktarı (0.12mm – 4mm)	Yaklaşık olarak harç hacminin %40'ı
İri Agrega Miktarı (D <sub>maks</sub> = 15 mm)	Yaklaşık olarak gerçek birim ağırlığın %50'si
Uçucu Kül Miktarı	Toplam ince malzeme hacminin %40'ı
Su / Toz	0.9 – 1.0 (hacimsel olarak)

Hazır beton sektöründe KYB'nin sahip olduğu akıcılığı ve reolojik davranışı, uygulama alanına taşınması ve bu esnada geçecek süre boyunca korunması istenir. Taze beton reolojisi ihtiyaçlar doğrultusunda kontrol edilebilirse, kalıba yerleştirme aşamasında KYB'nin sağlayacağı yüksek sıkışma derecesi ve doluluk oranı sertleşmiş beton özelliklerini de olumlu etkileyecektir (Yousaf vd., 2013). KYB reolojisini kontrolde en önemli bileşen süperakışkanlaştırıcı katkılardır. Çünkü, bu katkılar hem betonun erken yaşlarda işlenebilirliğinin korunmasını sağlayabilmekte hem de S/Ç oranını azaltarak sertleşmiş betonun mekanik özelliklerini geliştirmektedir.

Geleneksel beton üretiminde sıkça kullanılan linyosülfonat (Şekil 2a), naftalin formaldehit sülfonat ve melamin formaldehit sülfonat (Şekil 2b) esaslı normal ve süperakışkanlaştırıcılar, KYB üretiminde çoğunlukla yetersiz kalmaktadır (Felekoğlu ve Tosun Felekoğlu, 2014). Bu nedenle, her geçen gün kullanımı daha yaygın hale gelen Polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcılar KYB üretiminde daha çok tercih edilmektedir (Şekil 2c).

Polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcılar, karbon bir ana zincir ve bu zincire bağlı çok sayıda yan zincirlerden oluşmaktadır. Sahip oldukları bu çok dallı yapı sayesinde sınırsız modifikasyon imkânları bulunmaktadır (Felekoğlu ve Tosun Felekoğlu, 2014). DLVO Teorisine göre, katkı ile çevrilmeden önce zıt yüklü çimento taneleri arasında van der Waals çekim kuvvetleri bulunmakta ve bu kuvvetler topaklaşmaya neden

olmaktadır. Katkı ilavesinde çimento taneciklerinin yüzeyine adsorbe olan katkı, yüzeyi negatif yükleyerek elektrostatik itki oluşturmaktadır. Polikarboksilat esaslı katkılarda ise ilave sterik itki kuvvetleri oluşmaktadır. Bunlardan ilk ikisi tüm katkılarda oluşurken, polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcılarda ek olarak gözlenen sterik itkinin kaynağı polioksietilen yan zincirlerdir (Yousaf vd., 2013). Kimyasal yapılarına ve dozajlarına bağlı olarak, polikarboksilat esaslı katkıların, betonun erken yaşlardaki dayanım kazanma hızını azaltarak priz geciktirici etkilerinin olduğu bilinmektedir (Frunz vd., 2010). Özellikle hazır beton sektöründe kullanılacak KYB'nin, sahaya taşınması sırasında hızlı priz almaması, uygulanırken de akıcılığını koruması istenmektedir.



**Şekil 2.** Beton üretiminde kullanılan akışkanlaştırıcı katkıların kimyasal yapıları a)Linyosülfonat b)Naftalin formaldehit sülfonat, Melamin formaldehit sülfonat c)Polikarboksilat (Giraudeau, 2009)

Bu çalışmada, 3 farklı polikarboksilat esaslı katkının çimento hamurunun reolojik özelliklerine etkisi incelenmiş, çimento hamuru reolojik performansı açısından hazır beton sektörü ihtiyacına en uygun katkı seçilerek, pratikte kullanılabilir KYB üretilmesi amaçlanmıştır.

## 2. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışma kapsamında, ilk olarak farklı özelliklere sahip 3 adet polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkının, 2 farklı S/Ç oranına (0.25-0.30) sahip çimento hamurundaki reolojik performansları karşılaştırmalı olarak bir reometre yardımıyla incelenmiştir. Daha sonra akışkanlık arttırma ve kıvam koruma açısından en uygun süperakışkanlaştırıcı seçilmiş ve bu süperakışkanlaştırıcı kullanılarak 2 farklı S/Ç oranında (0.48-0.60) KYB üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen KYB'ler; yayılma çapı,  $T_{500}$  süresi, L-kutusu deneylerine tabii tutularak taze hal performansları incelenmiştir. Sertleşmiş haldeki KYB örneklerinin ise basınç (3, 7 ve 28 günlük) ve yarmada çekme (7 ve 28 günlük) dayanımları test edilerek mekanik performansları değerlendirilmiştir.

### 2.1. Kullanılan Malzemeler ve Karışım Oranları

Yapılan tüm deneylerde CEM-I 42,5 R tipi Portland çimentosu (Tablo 2) ve viskozite artırmak için inert bir madde olan öğütülmüş kireçtaşı tozu kullanılmıştır. Kullanılan kireçtaşı tozunun özgül ağırlığı, 63 µm elek bakiyesi ve Blaine özgül yüzey alanı sırasıyla 2.58, %96, 443 m<sup>2</sup>/kg'dır.

**Tablo 2.** CEM-I 42.5R tipi çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal analiz (%)		Basınç Dayanımları (MPa)	
CaO	63.7	2 günlük	25.4
SiO <sub>2</sub>	19.68	7 günlük	41.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.75	28 günlük	50.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	Diğer Fiziksel Özellikler	
MgO	0.9	Kıvam Suyu	28.8 %
Na <sub>2</sub> O	0.2	Priz Başlangıç Süresi	135 dk.
K <sub>2</sub> O	0.83	Priz Bitiş Süresi	245 dk.
SO <sub>3</sub>	2.78	Hacim Sabitliği	2.5 mm
Cl	0.01	Blaine	340 m <sup>2</sup> /kg
Kızdırma kaybı	2.84	Özgül Ağırlık	3.14
Serbest CaO	1.55		
Çözünmeyen	0.7		

KYB üretiminde agrega olarak  $D_{maks}=15mm$  olacak şekilde kırma taş (5-15) ve ince agrega (0-5) kullanılmıştır. Agregaların elek analizleri ve fiziksel özellikleri Tablo 3'de verilmiştir.

SV, GA ve BA harfleriyle kodlanmış 3 farklı polikarboksilat esaslı katkı kullanılmıştır. Katkıların üreticileri tarafından beyan edilen fiziksel özellikleri Tablo 4'de verilmiştir. Katkıların kimyasal yapıları ticari sır kapsamında olup, beyan edilmemiştir.

**Tablo 3.** Karışımlarda kullanılan agregaların a) Elek analizi sonuçları, b) Fiziksel özellikleri

Elek Açıklığı (mm)	Elekten geçen(%)	
	5-15	0-5
32	100	100
16	100	100
8	46	100
4	6	97
2	2	70
1	1	39
0.5	1	22
0.25	1	13
Elek altı	0	0
Özellik		
Kuru Özgül Ağırlık	2.70	2.59
K.Y.D Özgül Ağırlık	2.71	2.62
Su emme (%)	0.39	1.21
Gevşek BHA (kg/l)	1.46	1.57
Sıkışık BHA (kg/l)	1.64	1.85

**Tablo 4.** Kullanılan Akışkanlaştırıcıların Fiziksel Özellikleri

Katkı	GA	BA	SV
İçeriği:	Modifiye sentetik karboksilat polimeri koyu kahverengi	Modifiye sentetik karboksilat polimeri opak	Modifiye sentetik karboksilat polimeri açık kahverengi
Renk:			
Yoğunluk(@ 20°C): (TS 781 ISO 758)	1.065±0.02 g/cm <sup>3</sup>	1.06±0.02 g/cm <sup>3</sup>	1.10±0.02 g/cm <sup>3</sup>
pH(@ 20°C): (TS 6365 EN1262)	4.0±1.5	4.0±1.5	3.0±0.7
Önerilen dozaj:	0.5-2.0%	0.8-1.5%	1.0-2.0%

\*Tüm katkıların suda çözünen klorür miktarı ve alkali sırasıyla TS EN 480-10 ve TS EN 480-12 standartlarında verilen sınır değerlerin altındadır.

Yukarıda özellikleri verilen malzemeler kullanılarak iki farklı S/Ç oranında KYB tasarımı gerçekleştirilmiştir. KYB1 ve KYB2 tasarımlarının karışım oranları Tablo 5'de verilmiştir. Tasarımlar hazırlanırken, akıcılık ve kıvam koruma açısından en iyi performans gösteren süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Katkının seçim kriterleri ve reolojik parametrelere etkisi bir sonraki bölümde ele alınmıştır.

**Tablo 5.** KYB tasarımlarının karışım oranları

Malzeme Cinsi	KYB1 (kg/m <sup>3</sup> )	KYB2 (kg/m <sup>3</sup> )
Çimento	364	362
Taş tozu	163	157
Su	176	219
5-15 kırma taş	611	650
0-5 kırma ince agregası	999	947
Süperakışkanlaştırıcı katkı	14.1	5.2

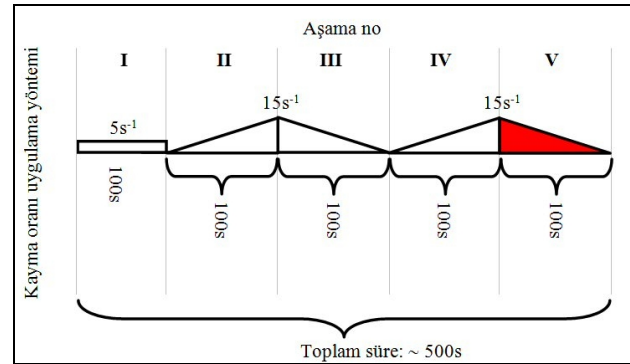
## 2.2. Süper akışkanlaştırıcı katkıların reolojik performanslarının değerlendirilmesi ve uygun katkının seçimi

Taze beton reolojisi, KYB tasarımında istenilen akıcılığın sağlanabilmesi için önemli bir kriterdir. Özellikle yeni nesil polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıları kullanılarak taze haldeki betonun reolojik özellikleri geliştirilebilmektedir. KYB'nin akma özellikleri yayılma çapı, V kutusu, L kutusu gibi bazı deney yöntemleriyle tayin edilebilmektedir. Ancak bu deneylerde yüksek miktarda malzeme ihtiyacı olmakta, kendiliğinden yerleşebilirliğin sağlanamaması durumunda malzeme, emek ve zaman kaybı oluşmaktadır. Yalnızca çimento hamuru ve katkı kullanılarak hazırlanacak az miktardaki karışımlarda reolojik davranışlarının incelenmesi hem söz edilen kayıpların azalmasını hem de tasarımı düşünülen betonun taze haldeki davranışı hakkında bir ön fikire sahip olunmasını sağlayacaktır.

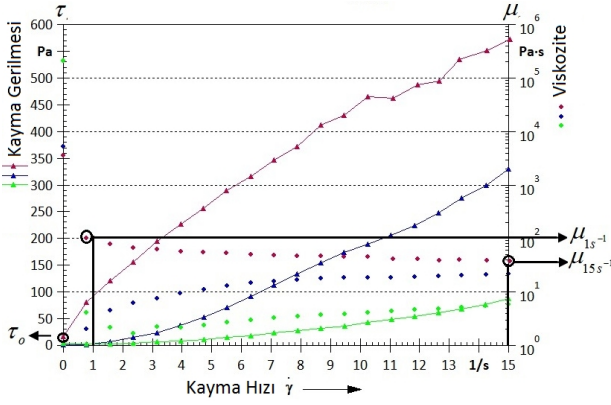
Çimentolu süspansiyonların (harç, hamur vb.) taze haldeki davranışı reometrelerle incelenebilir. Reometreler yardımıyla elde edilen akma eğrisi verileri yaygın olarak Bingham ya da Hershell-Bulkley modelleri ile ilişkilendirilmektedir (Wu ve An, 2014). Akma davranışını açıklamak için eşik kayma gerilmesi, viskozite ve kayma hızı parametrelerinin bilinmesi gerekir. Eşik kayma gerilmesi ( $\tau_o$ ) malzemenin akmaya başlaması için uygulanması gereken en düşük gerilmedir. Bu değer kayma gerilmesi-deformasyon hızı eğrisinin (akma eğrisi) y eksenini kestiği noktadır. Viskozite ( $\mu$ ) ise, akışkanın akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir ve kayma gerilmesinin deformasyon hızına oranını ifade eder. Viskozite

sabit bir değer alabileceği gibi kayma hızına bağlı olarak değişen değerler alabilir.

GA, SV ve BA katkıları değişik oranlarda (%0.5, %1, %1.5) kullanılarak, iki farklı S/Ç oranına sahip (0.25 ve 0.30) 400 cm<sup>3</sup> hacimli çimento hamurları hazırlanmıştır. Karışım hazırlandıktan hemen sonra (t=0) ve 1 saat beklemenin ardından (t=1), bilyalı bir reometre (Anton Paar Physica MCR51 BMS) yardımıyla akma eğrileri elde edilmiştir. Kayma gerilmesi – kayma oranı bağıntısı Rheoplus programında yazılan 5 aşamalı kayma oranı makrosu kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 3). 8 mm çaplı metal bilyenin çimento hamuru içerisinde dönüşü sırasında bilye üzerinde bir sürtünme direnci oluşur. Oluşan bu direnç moment hesabı için kullanılmaktadır. Bilyenin dönüş hızı Şekil 3'te sunulan makro ile değiştirilirken, Shatzmann dönüşümleriyle moment kayma gerilmesine, dönme hızı da kayma oranına çevrilmektedir (Shatzmann vd., 2003). Kayma gerilmesi-deformasyon hızı ile deformasyon hızı-viskozite eğrilerinin elde edilmesinde kararlı rejime ulaşılan son aşamadaki (Şekil 3, V. aşama) veriler kullanılmıştır. Çimento hamurlarının eşik kayma gerilmeleri ( $\tau_o$ ) ve farklı deformasyon hızlarındaki anlık viskoziteleri ( $\mu_{15s^{-1}}$  ve  $\mu_{15s^{-1}}$ ) elde edilen eğrilerden Şekil 4'te gösterildiği gibi okunmuştur.



**Şekil 3.** Rheoplus- 5 aşamalı kayma oranı makrosu



**Şekil 4.**  $\tau_0$ ,  $\mu_{1s^{-1}}$  ve  $\mu_{15s^{-1}}$  değerlerinin %0.5 (mor), %1 (mavi) ve %1.5 (yeşil) BA katkıli çimento hamuru verilerinden okunması

Ayrıca, katkıların t=0 ile t=1 saatteki reolojik özelliklerinin ( $\tau_0$ ,  $\mu_{1s^{-1}}$  ve  $\mu_{15s^{-1}}$ ), kullanım oranlarına bağlı olarak değişimleri grafiklere dönüştürülerek katkı performansları kıyaslanmıştır (Şekil 5-8).

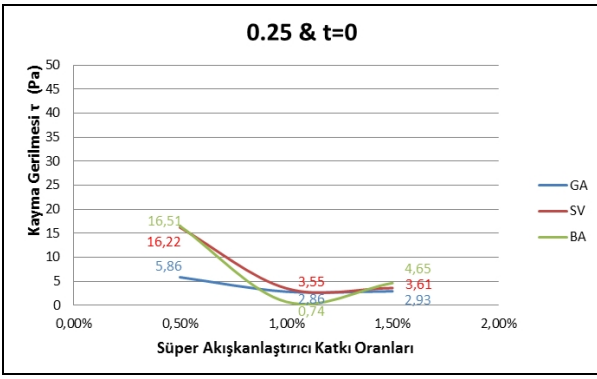
0.25 S/Ç oranında katkısız olarak hazırlanan kontrol numunesi oldukça kıvamlı bir yapıda olduğundan reometrenin bilyesinin dönmesine izin vermemiş ve veri alınamamıştır. Ancak, katkı kullanımı ile çimento hamurunun eşik kayma gerilmesi önemli ölçüde azalmış ve katkıli çimento hamuru içinde reometre bilyesi döndürülerek veri alınabilmıştır (Şekil 5a). Düşük dozajlarda, kullanılan SV katkısı t=1 saat sonra halen eşik kayma gerilmesini azaltıcı etki gösterirken, GA ve BA katkıları t=1 saat sonunda eşik kayma gerilmesini azaltıcı etkisini kaybetmiştir. Daha yüksek dozajlarda katkı kullanıldığında, zamanın eşik kayma gerilmesi üzerine etkisinin azaldığı görülmektedir (Şekil 6a).

Deformasyon hızının,  $1 \text{ sn}^{-1}$  Pa.s olduğu andaki viskozite değeri ( $\mu_{1s^{-1}}$ ) çimento hamurunun akmaya başladığı andaki akma direncini ve  $15 \text{ sn}^{-1}$  andaki değeri ( $\mu_{15s^{-1}}$ ) ise pompalanma ya da püskürtme andaki akma direncini temsil etmektedir. %0.5 oranında GA ve BA katkıları kullanılan örneklerin t=1 saat sonraki  $\mu_{1s^{-1}}$  değerleri artarken, %0.5 SV katkısı kullanılan örnekte önemli bir değişiklik olmamıştır (Şekil 5b, 6b). %1 katkı kullanım oranında  $\mu_{1s^{-1}}$  değerleri

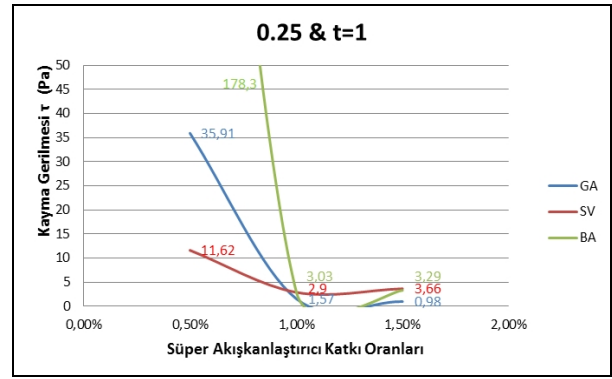
minimum seviyelerdedir (Şekil 5b, 6b). Kullanılan katkı miktarı arttıkça t=0 anında GA katkısı  $\mu$  değerine fazla bir etki göstermezken, SV ve BA katkıli örneklerin  $\mu_{15s^{-1}}$  değerleri giderek azalma eğilimindedir (Şekil 5c). SV ve GA katkılarının %1 ve üzeri dozajda kullanıldığı çimento hamurlarında  $\mu_{15s^{-1}}$  değerleri 1 saat bekleme sonrasında daha düşük ölçülmüştür (Şekil 5c, 6c). Bu durum, üretilen çimento hamurunun SV ve GA katkılarının etkinliklerini kaybetmediklerini, zaman geçmesine rağmen işlenebilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir.

S/Ç oranının 0.25'den 0.30'a çıkartılması örneklerin  $\tau_0$ ,  $\mu_{1s^{-1}}$  ve  $\mu_{15s^{-1}}$  değerlerinde katkı dozajına göre değişmekle beraber önemli ölçüde azalma meydana getirmiştir.  $\tau_0$  değerleri, tüm örnekler için aradan bir saat geçmesine rağmen hala çok düşük seviyelerde kalmaktadır (Şekil 7a, Şekil 8a). Katkı kullanım oranı arttıkça örneklerin  $\mu_{1s^{-1}}$  ve  $\mu_{15s^{-1}}$  değerleri giderek azalmakta (Şekil 7b-c, Şekil 8b-c) hatta  $\mu_{15s^{-1}}$  değeri SV katkısında 0.85 Pa.s gibi oldukça düşük seviyelere düşmektedir (Şekil 8c). S/Ç oranı 0.30 olan örneklerde ise SV ve GA katkısının kullanıldığı çimento hamurlarında katkı oranı %1'in üzerine çıktığında, katkı dozajının fazla gelmesinden dolayı çimento hamurunda çökme meydana gelmiş ve veri alınamamıştır.

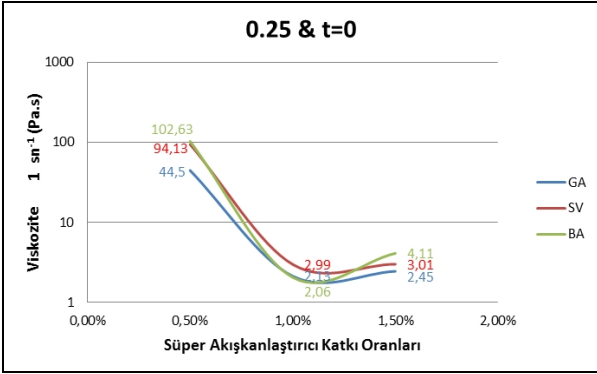
Tüm katkıları, çimento hamurunun eşik kayma gerilmesini büyük ölçüde azaltmıştır. Özellikle S/Ç oranının 0.30 olduğu karışımlarda %1 katkı kullanılmasıyla elde edilen veriler (Şekil 7c, Şekil 8c), SV katkısını performans açısından diğer katkıların önüne geçirmektedir. Ayrıca, düşük S/Ç oranlarında SV katkısı eşik kayma gerilmesini en düşük dozajda kullanılması halinde bile yaklaşık 1 saat süreyle diğer katkılara nazaran düşük seviyelerde tutmuştur. Sahip olduğu bu avantajlardan dolayı ikinci aşamada üretilen KYB'lerde SV katkısı kullanılmıştır.



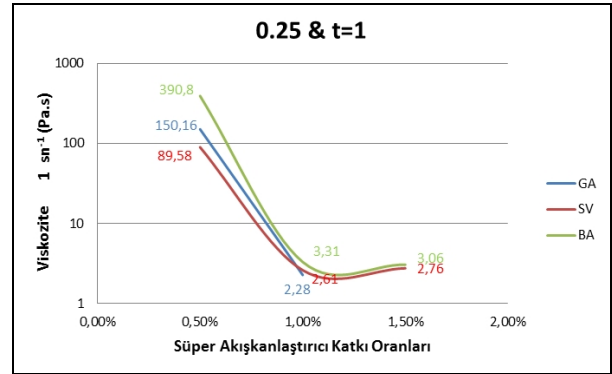
(a)



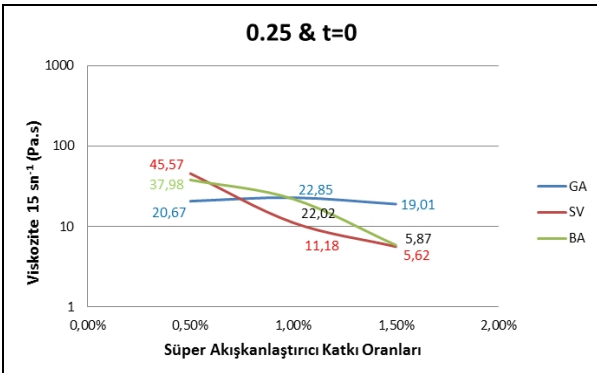
(a)



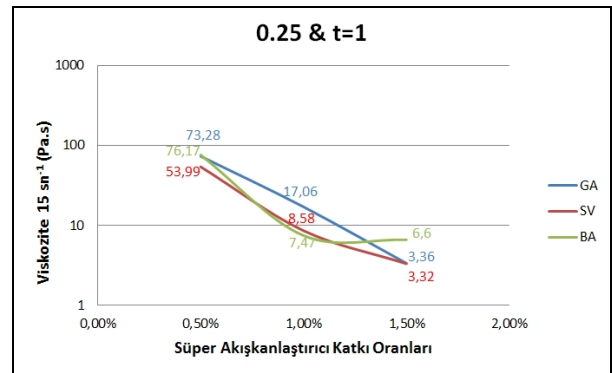
(b)



(b)



(c)



(c)

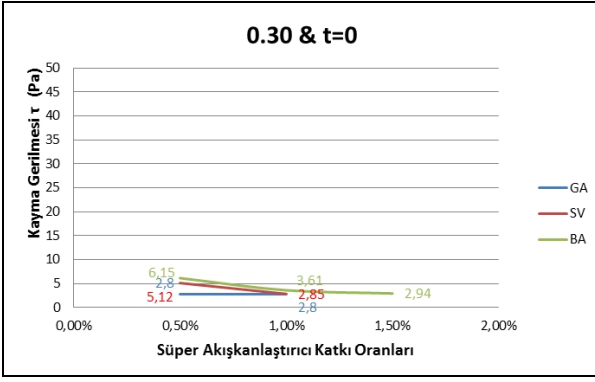
**Şekil 5.** Süper akışkanlaştırıcı katkı içeren, S/Ç oranı 0.25 olan çimento hamurunun, t=0 saat anındaki reolojik performansları

**Şekil 6.** Süper akışkanlaştırıcı katkı içeren, S/Ç oranı 0.25 olan çimento hamurlarının, t=1 saat anındaki reolojik performansları

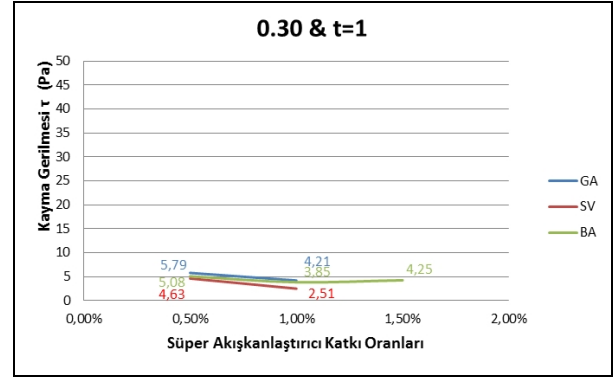
### 2.3. KYB üretimi

SV katkısının kullanılacağı KYB karışım oranları Tablo 5'de verilmiştir. KYB1 ve KYB2 kodu KYB'lerin S/Ç oranları sırası ile 0.48 ve 0.60'dır. İki seriden de 45 dm<sup>3</sup>'lük karışımlar, 100 dm<sup>3</sup> efektif karıştırma hacmi bulunan bir betoniyer yardımı ile laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. İlk olarak iri ve ince agrega 1 dakika süre ile karıştırılmış, sonrasında çimento ve öğütülmüş kireçtaşı tozu ilave edilerek kuru karışım 1 dakika daha karıştırılmaya devam edilmiştir.

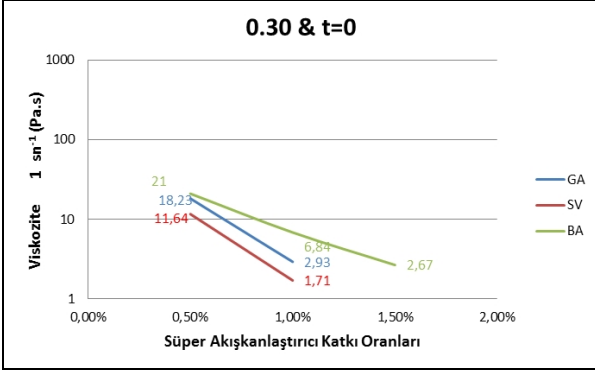
Ardından bir miktar süperakışkanlaştırıcı katkı karışım suyuna katılarak karışıma ilave edilmiştir. 2 dakikalık bir karıştırma süresinin ardından taze haldeki betondan örnek alınarak yayılma çapı hedefi olan 750 mm değerinin sağlanıp sağlanmadığının kontrolü yapılmıştır (Şekil 9). Aynı zamanda T<sub>500</sub> süresi de ölçülmüştür (500 mm yayılma çapına ulaşma süresi). Gerekli olması durumunda süperakışkanlaştırıcı katkı ilave edilmiştir. Nihai süperakışkanlaştırıcı miktarları Tablo 5'de verilmiştir.



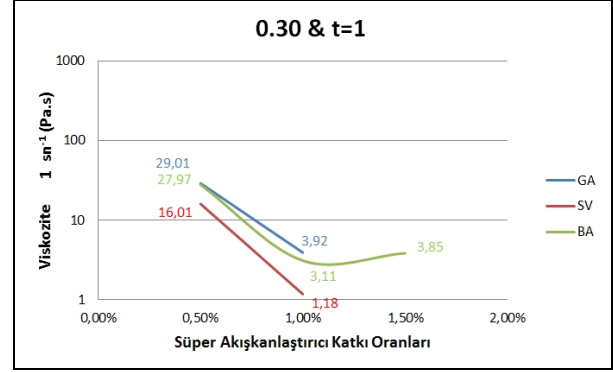
(a)



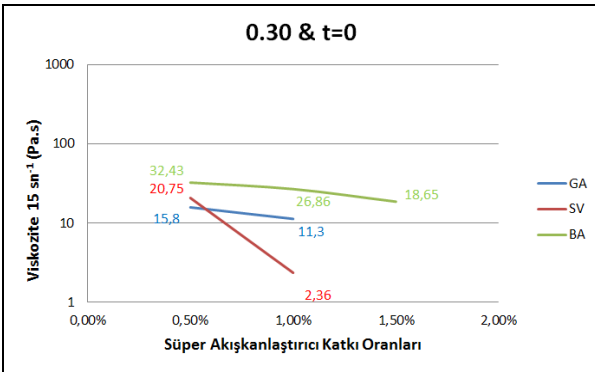
(a)



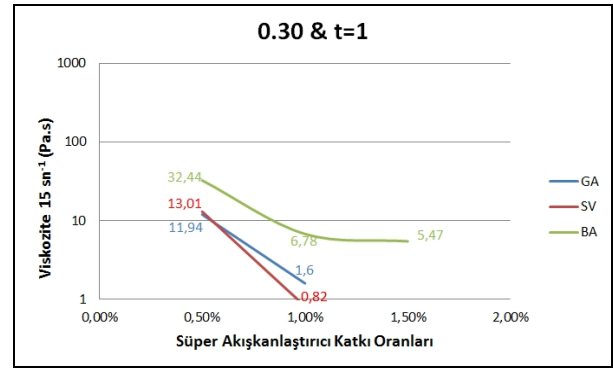
(b)



(b)



(c)



(c)

**Şekil 7.** Süper akışkanlaştırıcı katkı içeren, S/Ç oranı 0.30 olan çimento hamurunun, t=0 saat anındaki reolojik performansları

Hedeflenen yayılma çapı değerini sağlayan taze beton ile L kutusu deneyleri yapılmıştır (Şekil 10). Sertleşmiş beton deneyleri içinse iki karışımdan da 15\*15\*15 küp ve 10 cm çap, 20 cm yüksekliğinde silindirik numuneler her yaşta üçer adet test edilmek üzere kalıplara alınmıştır.

Üretilen KYB'lerden taze halde alınan örneklere ilk anda yayılma testi uygulanmış ve her iki örnek de 780 mm yayılma çapı değerine ulaşmıştır. 1 saatlik bekleme süresi sonunda tekrarlanan yayılma testinde iki karışımın da yayılma çapları 740 mm'ye

**Şekil 8.** Süper akışkanlaştırıcı katkı içeren, S/Ç oranı 0.30 olan çimento hamurunun, t=1 saat anındaki reolojik performansları

gerilemiş %5 civarında yayılma kaybı oluşmuştur. T<sub>500</sub> süreleri ise sırasıyla 10s ve 1.5s değerine çıkmıştır. Özellikle KYB1 karışımında yayılma çapı kaybı oldukça düşük mertebede iken viskozite artışının yüksek olduğu betonun akış hızının azaldığı gözlenmiştir. KYB2 karışımı ise yayılma hızı azalmasına rağmen 1 saat önceki özelliğini büyük ölçüde korumuştur. EFNARC (2005)'e göre KYB1 karışımı VS2 (T<sub>500</sub> süresi 2 saniyeden uzun), KYB2 karışımı ise VS1 sınıfına (T<sub>500</sub> süresi 2 saniyeden kısa) girmektedir. Yapılan L kutusu deneylerinde ise her iki karışımda da donatılar arasından geçiş



yeteneği problemi gözlenmemiş ve L-kutusunun uç noktasına kadar seviyelenme farkı oluşmamıştır. Geçiş yetenekleri %100 olarak belirlenmiş, ancak KYB2 karışımı KYB1 karışımına göre daha kısa sürede L kutusunun kalıbına yerleşmiştir. EFNARC' a göre her iki karışım da PA2 (L-Kutusunda ölçülen geçiş yeteneği oranı 3 donatılı geçiş için %80'in üzerinde) kategorisindedir (Şekil 10).



Şekil 9. Yayılma çapı kontrolü



Şekil 10. L kutusu deneyi

KYB'lerden alınan küp ve silindir numuneler 3., 7. ve 28. günde sırasıyla basınç ve yarmada çekme deneyleri için kullanılmıştır. Tek eksenli basınç deneyi 300 ton kapasiteli pres kullanılarak 680

kgf/sn yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Silindir numunelerin yarmada çekme deneyleri aynı preste çelik bir yükleme çerçevesi kullanılarak 94 kgf/sn yükleme hızıyla yapılmıştır. KYB1 (S/Ç=0.48) karışımı ilk 3 günde basınç dayanımının %55.4'üne, KYB2 (S/Ç=0.60) karışımı ise %58.5'üne ulaşmıştır. 7. günde KYB1 (S/Ç=0.48) karışımı basınç dayanımının %86'sına KYB2 karışımı ise %80'ine ulaşmıştır. 28 günlük basınç dayanımları KYB1 serisi için 44 MPa, KYB2 serisi için 42 MPa olarak belirlenmiştir. S/Ç oranları arasında önemli derecede fark olmasına rağmen KYB1 ve KYB2 serilerinin 28 günlük basınç dayanımlarının arasındaki fark beklenmedik şekilde düşük çıkmıştır. KYB1 serisinde mekanik özelliklerin gelişiminin kullanılan katkı dozajının yüksekliği nedeniyle olumsuz etkilendiği düşünülmektedir. Diğer yandan daha düşük dozajda katkı kullanılarak üretilen KYB2 serisinde böyle bir problemle karşılaşılma, hedeflenen mekanik özelliklere ulaşılmıştır. Bu açıdan KYB2 tasarımının SV katkılı KYB üretiminde hem teknik hem de ekonomik olarak daha avantajlı olduğu söylenebilir.

Silindir numuneler ile 3, 7 ve 28 günde yapılan yarmada çekme deneylerinde ise KYB1 numuneleri sırasıyla 2.6, 2.7 ve 3.4 MPa, KYB2 numuneleri ise 2.4, 2.9 ve 3.1 MPa dayanım değerleri vermiştir. Bu sonuçlar, zamana bağlı olarak yarmada çekme dayanım KYB'lerin basınç dayanımına benzer şekilde arttığını göstermektedir. Ayrıca numunelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde 3. ve 7. günde kırılmanın matris-agrega arayüzeyinden gerçekleştiği 28. günde ise matris-agrega aderansının gelişerek kırılmanın agregada olduğu gözlenmiştir.

Tablo 6. KYB'lerin taze hal ve mekanik özellikleri

Seriler	Yayıma çapı (mm),		T500 süresi (s)		Basınç dayanımı (MPa)			Yarmada çekme dayanımı (MPa)		
	t=0	t=1saat	t=0	t=1saat	3g	7g	28g	3g	7g	28g
KYB1	780	740	3.5	10	24.4	37.8	44	2.6	2.7	3.4
KYB2	780	740	1.0	1.5	24.6	33.6	42	2.4	2.9	3.1

### 3. Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada 3 farklı süper akışkanlaştırıcı katkı (GA, SV, ve BA) kullanılarak farklı S/Ç oranlarında çimento hamurları hazırlanmış ve akış özellikleri bilyalı bir reometre yardımıyla kapsamlı şekilde incelenmiştir.  $t=0$  ve  $t=1$  saatte çimento hamurları için ölçülen eşik kayma gerilmesi,  $1 \text{ sn}^{-1}$  ve  $15 \text{ sn}^{-1}$  kayma hızlarındaki viskozite değerleri dikkate alındığında, hazır beton sektörü için incelenen katkıları arasında en uygun katkı türü SV katkısı olduğu söylenebilir.

Reolojik incelemelerden sonra, ilk anda yüksek akıcılığı düşük dozajlarda bile sağlama ve başlangıçtaki reolojik özelliklerini koruma açısından uygun bulunan SV katkısı ile 2 farklı KYB ( $S/\text{Ç}=0.48$ ,  $S/\text{Ç}=0.60$ ) üretimi yapılmıştır. Her iki karışım da ilk anda 780 mm yayılma çapına ulaşmış ve yayılma çapını 1 saat sonunda büyük ölçüde korumuştur.

Üretilen KYB'ler aynı zamanda S/Ç oranına göre değişen akış hızlarına sahiptir. S/Ç oranı yüksek olan KYB2 betonunun akış hızı yüksekken daha düşük S/Ç oranına sahip KYB1 betonunun akış hızı daha düşüktür.  $T_{500}$  süreleri KYB2 karışımında ilk anda 1 saniye iken  $t=1$  saatte 1.5 saniyeye, KYB1 karışımında ise ilk anda 3.5 saniye iken  $t=1$  saatte 10 saniyeye çıkmıştır. Her iki karışım da L kutusu geçiş yeteneği KYB şartlarını sağlamıştır.

Basınç dayanımı gelişimi ve yarmada çekme dayanımı sonuçları dikkate alındığında, daha düşük katkı dozajı ile kendiliğinden yerleşebilirlik özelliği sağlanarak üretilen KYB2 karışımının C30/37 sınıfı KYB üretiminde hem teknik hem de ekonomik olarak hazır beton sektörü için daha avantajlı olacağı tespit edilmiştir.

### Teşekkür

Bu makalede sunulan deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı, İnş. Müh. Hakan Sümengen ve İnş. Müh. Kemal Çetin'e teşekkür ederiz.

### Kaynaklar

- Aykan, G., Gürol, G., Tezel, O.O., Yüceer, Z., 2004.
- Kendiliğinden Yerleşen Beton Deney Metodları ve Uygulama Örnekleri. Hazır Beton Kongresi, Bildiriler Kitabı, İstanbul, 266-276.
- Beygi, M.H.A., Kazemi, M.T., Amiri, J.V., Nikbin, I.M., Rabbanifar, S. and Rahmani, E., 2014. Evaluation of the effect of maximum aggregate size on fracture behavior of self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, **55**, 202–211.
- EFNARC, 2005. The European Guidelines for Self Compacting Concrete, May, 68.
- Felekoğlu, B., 2003. Kendiliğinden yerleşen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri. YL Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 273.
- Felekoğlu, B., and Tosun Felekoğlu, K., 2014. Kendiliğinden Yerleşen Beton Üretiminde Polikarboksilat Esaslı Süper Akışkanlaştırıcı Katkıların Kullanımı. *Hazır Beton*, **124**, Temmuz-Ağustos, 60-69.
- Frunz, L., Lootens, D., Flatt, R.J., Wombacher, F., and Velten, U., 2010. Production and Placement of Self-Consolidating Concrete. **1**, Khayat, K.H., and Feys, D. (editors), RILEM Bookseries, 53-63.
- Hughes, D.G., Knight, G.F., and Mansky, E.F., 2002. Self-Consolidating Concrete – Case Studies Show Benefits to Precast Concrete Producers. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 405-412.
- Okamura, H., and Ouchi, M., 2003. Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technologies*, **1(1)**, 5-15.
- Schatzmann, M., Fischer, P., and Bezzola, G.R., 2003. Rheological Behaviour of Fine and Large Particle Suspensions. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, **129(10)**, 796-803.
- Uysal, M., and Yilmaz, K., 2011. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cement & Concrete Composites*, **33**, 771-776
- Wu, Q., and An, X., 2014. Development of a mix design method for SCC based on the rheological characteristics of paste. *Construction and Building Materials*, **53**, 642–651.
- Yousaf, M., Siddiqi, Z.A., Sharif, B., and Khan, A.H., 2013.

Performance of 3rd Generation Locally Available  
Chemical Admixtures in the Production of SCC.  
*Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*,  
**12**, 9-20.