



## SİLİS DUMANI VE UÇUCU KÜL KATKILI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN TAZE BETON ÖZELLİKLERİ VE BASINÇ DAYANIMLARI

### (*FRESH CONCRETE PROPERTIES AND COMPRESSIVE STRENGTH OF SELF COMPACTING CONCRETES WITH SILICA FUME AND FLY ASH*)

İlhan TOHUMCU\*, A. Ferhat BİNGÖL\*\*

#### ÖZET/ABSTRACT

Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB), geleneksel betona oranla işlenebilirlik, işçilik maliyetindeki azalmalar ve yüksek dayanım gibi önemli faydalar sağlayan beton teknolojisindeki gelişmelerdendir.

KYB üretiminde yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıları, fazla miktarda toz malzeme ve/veya viskozite düzenleyici katkı maddesi kullanılmalıdır. Kendiliğinden yerleşme yeteneği; doldurma yeteneği, ayrışmaya karşı direnç ve geçiş yeteneği olmak üzere 3 parametre ile karakterize edilebilir. KYB üretiminde toz malzeme olarak genellikle kireçtaşı tozu, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılmaktadır.

Bu çalışmada mineral katkı maddesi olarak çimento yerine ağırlıkça % 5, % 10 ve % 15 oranlarında silis dumanı ve % 25, % 40 ve % 55 oranlarında uçucu kül kullanılarak KYB üretilmiş ve taze beton özellikleri ile sertleşmiş betonların 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. silis dumanı ilavesi basınç dayanımlarında artışa yol açarken uçucu kül katkıları betonlarda dayanım azalmaları tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri 88 MPa değeri ile %15 silis dumanı kullanılarak üretilen betonlardan elde edilmiştir.

*Self Compacting Concrete, is one of the developments in concrete technology, which have important benefits as workability, labor cost reductions and high-strength, compared to traditional concrete.*

*In SCC production, high-range water reducing super plasticizer chemical additives, powder material and/or viscosity regulators additive must be used. Self-settlement capability may be characterized with 3 parameters; filling ability, resistance to decomposition and, passing ability between reinforcement bars. Limestone powder, fly ash, granulated blast furnace slag and silica fume is used as a powder material in SCC production.*

*In this study SCC were produced with using silica fume instead of cement by weight, by the ratios of 5%, 10% and 15%, and fly ash with the ratios of 25%, 40% and 55%. Fresh concrete properties and 3, 7 and 28 days compressive strengths were determined. While SF increased compressive strength, addition of fly ash, on the contrary, decreased it. The highest compressive strength was observed from the concrete specimens with using 15% silica fume, with the value of 88 MPa.*

#### ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS

Kendiliğinden yerleşen beton, Silis dumanı, Uçucu kül, Basınç dayanımı, Taze beton  
Self setting concrete, Silica fume, Fly ash, Compressive strength, Fresh concrete

\* İzocam Tic. ve San. A.Ş., ERZURUM

\*\* Atatürk Üni., Mühendislik Fak., İnşaat Müh. Böl., ERZURUM

## 1. GİRİŞ

Beton üretildikten ve yapının bulunduğu yere kadar taşındıktan sonra, taze beton için bir sonraki aşama yerine yerleştirilmesidir. Beton üretiminin önceki safhalarında yer alan karışım oranlarının belirlenmesi, betonun karıştırılması ve taşınması gibi aşamaların tamamı kusursuz olarak yerine getirilse bile taze betonun yerleştirilmesi işlemi uygun yapılmadığı takdirde betondan beklenen performansı elde etmek mümkün değildir.

Vibrasyon uygulanmamış betonların basınç dayanımında, vibrasyon uygulanmış olanlara göre % 30'lara varan düşüşler görülmektedir. Ayrıca sağlıklı vibrasyon yapılmamış beton elemanlarda yüzey bozuklukları görülebilir. Özellikle binaların depreme karşı güçlendirilmesi için yapılan güçlendirme projelerinde tüm bu etkenlere dar beton kesitleri ve sık donatı eklenince, vibrasyon uygulaması daha da zahmetli, bazen de imkansız hale gelir (Gürdal ve Yüceer, 2004).

Geleneksel yöntemlerle üretilen betonun yerleştirilmesinde uygulanan vibrasyon işlemi, betonun içinde bulunan boşlukları en aza indirerek dayanımı daha yüksek, dış etkilere karşı daha dayanıklı ve düzgün yüzeyli bir beton elde etmek için mutlaka yapılmalıdır. Betonun yeterli akıcılığa sahip olmaması durumunda yerleştirilme sorunları ortaya çıkmakta ve bazen işçiler tarafından kontrol dışı betona su ilave edildiği gözlenmektedir. Bu durumda, pratikte dökülen beton dayanımının, hesaplarda belirlenen dayanımdan çok daha düşük olacağı açıktır. Bunun yanı sıra dar kesitlerde, donatıların yoğun olduğu birleşim bölgelerinde ve donatılar arası mesafelerin az olduğu elemanlarda betonun yerleştirilmesi esnasında sorunlar yaşanmaktadır. Özellikle güçlendirme projelerinin tatbikinde bu sorunla sıkça karşılaşmaktadır. Betonun yerleştirilmesinden kaynaklanan sorunlar dikkate alındığında yeterli akıcılığa sahip olan ve uygulamada ek bir sıkıştırma ya da vibrasyon işlemine gerek duyulmayan KYB kullanımının yaygınlaşması bir çözüm olarak düşünülebilir.

Kimya alanındaki gelişmeler ve polimer teknolojisinin ilerlemesi, 1980'li yılların ortalarından itibaren çok etkili akışkanlaştırıcıların keşfine sebep olmuştur. Yüksek oranda su kesme yeteneğine sahip bu akışkanlaştırıcılar aynı zamanda taze betonun işlenebilirliğini de arttırmaktadır. Yeni nesil akışkanlaştırıcıların sağladığı bu etki, bilim adamlarını taze betonun yerleştirilmesi sırasında gereken sıkıştırma işlemini ortadan kaldırmak için araştırma yapmaya yöneltmiştir. Böylece KYB kavramı ortaya çıkmıştır (Felekoğlu, 2003).

KYB'nin üretiminin ilk olarak 1980'lerin ikinci yarısında Japonya'da geliştirilmesi, sismik bölgelerde yoğun donatılı betonarme elemanlarda sıkıştırma işlemine gerek duyulmadan yerleştirilebilen bir betona olan gereksinimden kaynaklanmıştır (Okamura ve Ouchi, 2003; Eroğlu vd., 2007). KYB, kendi ağırlığı altında akabilmesi ve kalıba kolayca yerleşebilme özeliği nedeniyle yüksek performanslı beton olarak da tanımlanabilmektedir. KYB'nin kendiliğinden yerleşebilme özelliğinin yanında; imalat süresini kısaltma, işçilik maliyetini düşürme, özellikle yoğun donatılı betonarme elemanlarda betonun kalıba boşluksuz bir şekilde yerleşmesini sağlama ve vibrasyon kaynaklı ses kirliliğini azaltma gibi geleneksel betona göre birçok üstünlüğü vardır.

KYB gerek prefabrike (hazır) olarak üretilen ve gerekse şantiyede yerinde üretilen ve lif takviyeli betonlarda da kullanılabilir. (Skarendahl ve Peterson, 2000; Sağlam ve Özkul, 2006)

Uygun bir şekilde tasarlanmış KYB, yeterli akıcılığı sağlamak için düşük akma gerilmesine ve ayrışma olmadan homojen bir deformasyon sağlamak için de yeterli bir viskoziteye sahip olmalıdır (Eroğlu vd., 2007; Khayat, 1999). KYB'nin akıcı kıvamda olması, fakat akış sırasında engeller arasından blokajlaşma veya tıkanma olmadan geçebilmesi ve ayrışmaya uğramaması gereklidir (Felekoğlu ve Baradan, 2004). KYB'nin iki temel özelliği, çok miktarda toz malzeme ve süperakışkanlaştırıcı kullanımı ile elde edilen yüksek akıcılık ve ayrışmaya karşı dirençtir (Khayat ve Guizani, 1997; Felekoğlu, 2003). KYB'de yüksek

akıcılık için, yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkıları kullanılmaktadır. Uzun polimer zincirlerine sahip olan yeni kuşak süperakışkanlaştırıcılar, ince taneciklerin yüzeyinde birikerek (adsorbe olarak), elektriksel itki ve sterik etki yolu ile çimento tanelerinin dağıtılmasını sağlar. Geleneksel süperakışkanlaştırıcılar, sülfone naftalin formaldehit veya sülfone melamin formaldehit esaslı iken, yeni kuşak süperakışkanlaştırıcılar ana zincirinde karboksilik grubunun bulunduğu ve polietilen glikol grubunun yan zincir olarak bağlandığı kopolimerlerdir (Sağlam ve Özkul, 2006- Houst vd., 1999).

Yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkıların kullanımı KYB'nin ayrışma direncinde bir miktar düşüşe yol açmaktadır. Bu nedenle genellikle karışımlarda süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımıyla meydana gelebilecek ayrışmayı azaltmak için ince agrega ve/veya bağlayıcı miktarını artırma yoluna gidilmektedir. Başka bir çözüm yolu olarak süperakışkanlaştırıcı katkılarla birlikte, viskozite düzenleyici katkıların kullanımı tercih edilmektedir. KYB üretiminde kullanılan kimyasal katkı ve bağlayıcı miktarının geleneksel betonlara göre daha fazla olması nedeniyle yüksek maliyetlerle karşılaşmaktadır. Yüksek maliyeti azaltma ve KYB özelliklerini elde etmenin olası bir yolu ise beton karışımlarında ilave mineral katkı kullanımınıdır. KYB'de viskozite artırıcı toz malzeme olarak uçucu kül, taş tozu, öğütülmüş yüksek fırın curufu, silis dumanı kullanılabilir (Khayat ve Guizani, 1997- Felekoğlu vd., 2003). Bu konu ile ilgili yapılan birçok araştırmada, yüksek oranda (% 70'e varan) uçucu kül kullanılarak KYB üretiminin gerçekleştirilebildiği belirtilmiştir. [Eroğlu vd., 2007; Bouzoubaa ve Lachemi, 2001; Şahmaran vd., 2007).

Geleneksel beton karışımından farklı olarak KYB'de kullanılacak malzemelerin seçimi ve beton tasarımında uygun oranlarda kullanılmasına yönelik yeni deney yöntemleri ve dolayısıyla standartlar geliştirilmektedir. KYB deneylerinde genellikle EFNARC tarafından belirlenen değerlendirmeler dikkate alınır. EFNARC; uzman yapı kimyacılarına ve beton sistemlerine ithafen oluşturulmuş bir Avrupa federasyonudur. Avrupa'da birçok Avrupalı şirketin bu federasyona üyeliği bulunmaktadır. EFNARC'ın ana faaliyet alanları; CEN Teknik komitesinde ve Avrupa seviyesinde, zemin kaplamaları, beton koruma ve tamirleri, yumuşak zemin tünelleri, püskürtme betonlar ve KYB'lerdir.

KYB'de özellikle işlenebilirlik konusunda farklı parametreler ölçen değişik deney yöntemleri vardır. KYB her ne kadar işlenebilirlik özelliklerine göre sınıflandırılrsa da belirli mekanik performans kriterlerini sağlaması gerekir. KYB'nin beklenen mekanik performansı vermesi aşağıdaki koşullara bağlıdır:

1. Talep edilen performansa uygun malzeme tip ve oranlarının seçimi (karışım optimizasyonu),
2. Üretim safhasında malzeme tip ve oranlarındaki değişiminin minimizasyonu (homojen malzeme kullanımı, hammadde değişkenliğinden kaynaklanacak problemlerin azaltılması),
3. Ortam koşullarının KYB'ye etkisinin göz önüne alınması, bu koşullara uygun önlemlerin hem karışım tasarımında hem de üretim safhasında dikkate alınması,
4. Üretim safhasında taze beton kalitesinin seçilen deneylerle sürekli kontrolü, istenen özelliği sağlamayan karışıma anında müdahale edilmesi.

Yukarıdaki kriterlere uyulması halinde, KYB'den en yüksek mekanik performansı almak mümkün olacaktır. Bu koşul normal betonlar için de geçerlidir. Ancak KYB'de bu kriterlere hassasiyet daha üst seviyededir ve yapılacak yanlışlıkları düzeltmek normal beton üretimine kıyasla çok daha zordur (Felekoğlu ve Baradan., 2004).

Karışım tasarımı yöntemleri ve kendiliğinden yerleşebilirlik deney yöntemleri araştırmaları, KYB'yi standart beton haline getirmiştir. Bu araştırmaların sonucunda KYB'nin test edilebilmesi için bazı deneysel metodlar ve tasarım yöntemi ortaya çıkmıştır. Bu deney yöntemleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- a) Doldurma Yeteneği: Betonun kendi ağırlığı ile kalıptaki bütün boşluklara akabilme yeteneğidir. Bu özellik çökme-yayılma deney yöntemi ile ölçülebilir.
- b) Ayrışmaya karşı direnç: Karıştırma, taşıma ve döküm işlemleri sırasında betonun homojenliğini koruyarak ince taneli askıda madde (süspansiyon) olarak kalabilme yeteneğidir. L kutusu deney aleti (L-shape test) bu özelliği ölçmek için kullanılabilir.
- c) Geçiş yeteneği: Betonun, kalıpta sık donatılar vb. dar kesitlerin oluşturduğu engeller arasından, agrega tanelerinin tıkanma yapmaksızın geçebilme yeteneğidir. Bu özellik, V hunisi, U ve L kutusu deney aletleri kullanılarak belirlenebilir [Skarendahl ve Peterson, 2000; Sağlam ve Özkul, 2006).

## 2. MALZEMELER VE DENEY YÖNTEMLERİ

### 2.1. Kullanılan Malzemeler

#### 2.1.1. Çimento

Bu çalışmada TS EN 197-1 standartlarına uygun, Aşkale Çimento Fabrikasında üretilen CEM I 42.5 R türü çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal analizi Çizelge 1'de fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çimentonun kimyasal analizi

| KİMYASAL ANALİZLER %   |        |
|--|--------|
| SiO <sub>2</sub>   | 18,73  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                 | 4,56   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                 | 3,07   |
| CaO  | 63,91  |
| MgO  | 2,08   |
| SO <sub>3</sub>  | 2,90   |
| Kızdırma Kaybı   | 3,36   |
| K <sub>2</sub> O   | 0,62   |
| Na <sub>2</sub> O  | 0,29   |
| (Na <sub>2</sub> O); Na <sub>2</sub> O+0,658* K <sub>2</sub> O | 0,70   |
| Cl   | 0,0185 |
| Ölçülemeyen  | 0,46   |
| Toplam   | 100    |
| CaO (Free CaO)   | 0,56   |
| Çözünmeyen Kalıntı   | 0,85   |

Çizelge 2. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

| FİZİKSEL VE MEKANİK TESTLER        |            |
|------------------------------------|------------|
| İncelik 45µm elek üstü %           | 8,98       |
| Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) | 3,14       |
| Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)   | 3807       |
| Piriz Başı (Saat-Dakika)           | 2 sa-21 dk |
| Piriz Sonu (Saat-Dakika)           | 2 sa-55 dk |
| Hacim Genleşmesi (mm)              | 1          |
| Basınç Dayanımı 2 Gün (MPa)        | 27,7       |
| Basınç Dayanımı 28 Gün (MPa)       | 57,2       |
| Su İhtiyacı (%)                    | 28,6       |

### 2.1.2. İnce Taneli Malzemeler

İnce taneli malzemeler betonda puzolanik etki ve filler etkisi sağlamak için kullanılırlar. Tek başına bağlayıcılık özeliği olmayan ancak ince öğütülüp normal sıcaklıktaki nemli ortamda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özeliği gösteren malzeme “puzolanik malzeme” olarak tanımlanır. Bu çalışmada ince taneli malzeme olarak uçucu kül ve silis dumanı kullanılmıştır.

#### 2.1.2.1. Uçucu Kül

Birçok termik santralde, elektrik üretimi için gerekli enerjiyi sağlayabilmek amacıyla, yakıt olarak pulvarize kömür kullanılmaktadır. Pulvarize kömürün yanmasıyla ortaya çıkan küllerin bir kısmı ocak tabanında birikirken yaklaşık % 75-80'i gazlarla birlikte bacadan dışarıya sürüklenmektedir. Bu küllere “uçucu kül” ya da “pulvarize yakıt külü” denilmektedir (Erdoğan, 2004). Tane boyutları 0,5–150 µm olan, kısmen veya tamamen küresel şekilli küllerin bacadan çıkarak çevreye yayılmasını önlemek gerekmektedir. TS EN 197–1 “Çimento-Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk” standardında belirtilen tipteki uçucu küller, elektrostatik veya mekanik olarak çöktürme ile elde edilmektedirler. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

**a- F sınıfı uçucu küller**, bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  yüzdesi % 70'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda bu küllerde reaktif kireç (CaO) yüzdesi % 10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.

**b- C sınıfı uçucu küller** ise, linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  miktarı % 50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde CaO % 10'dan fazla olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bir miktar bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde Bursa Orhaneli Termik Santralinde üretilen TS EN 197-1, ASTM C 618, TS 639 ve TS EN 450 standartlarındaki koşullara uygun olan F tipi uçucu kül kullanılmıştır [Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri TÇMB/ARGE/YO3.03 Nisan 2007 3.Baskı]. Kullanılan uçucu külün kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3' de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Orhaneli uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları

| KİMYASAL ANALİZ                |            |
|--------------------------------|------------|
| MADDE                          | MİKTAR (%) |
| SiO <sub>2</sub>               | 48,93      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 24,63      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7,59       |
| S+A+F                          | 81,15      |
| CaO                            | 9,06       |
| MgO                            | 2,28       |
| SO <sub>3</sub>                | 2,48       |
| K <sub>2</sub> O               | 2,51       |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,35       |
| Kızdırma Kaybı                 | 1,69       |
| Cl                             | 0,005      |

### 2.1.2.2. Silis Dumanı

Silis dumanı, silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretimi sırasında elde edilen, ana bileşeni 1 µm'den küçük, küresel, amorf, camsı silis (SiO<sub>2</sub>) partiküllerinden oluşan, yüksek düzeyde puzolanik aktiviteye sahip bir yan üründür. Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutularak yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve % 85-% 98 oranında silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye “yoğunlaştırılmış silis dumanı” veya kısaca “silis dumanı” adı verilmektedir. Silis dumanı aşırı ince parçalara ve yüksek reaktiviteye sahip olduğu için, çok yüksek dayanıma sahip (≥100 MPa) ya da erken yaşta yüksek dayanıma sahip beton üretmek için süper akışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılmaktadır (Güneşli, 2008).

Bu çalışmada, Antalya Electrometalorji işletmesinde Silico Ferrokrom üretimi yapan tesisten elde edilen silis dumanı kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal analizi Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 4. Silis Dumanının kimyasal analizi

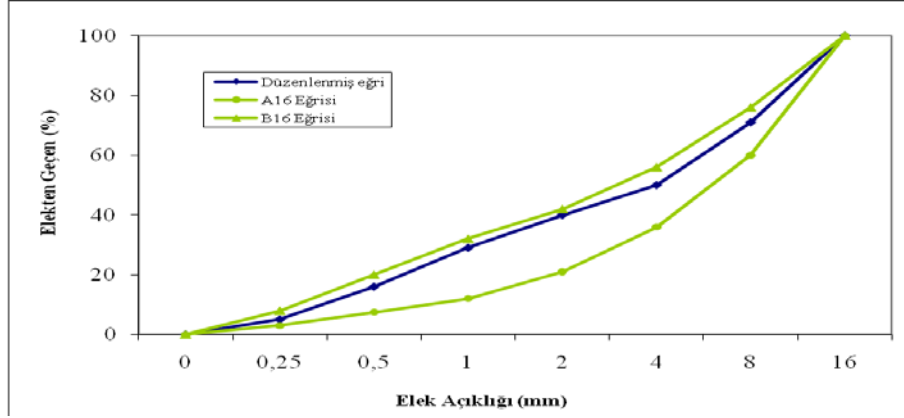
| KİMYASAL ANALİZ                |            |
|--------------------------------|------------|
| MADDE                          | MİKTAR (%) |
| SiO <sub>2</sub>               | 93,4       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,30       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,35       |
| CaO                            | 0,38       |
| MgO                            | 0,85       |
| C                              | -          |
| S                              | -          |
| Kızdırma Kaybı                 | 4,45       |

### 2.1.3. Agregası

Beton üretiminde Erzurum ili sınırları içerisindeki Horasan mevkiinden temin edilen doğal kum ve çakıl kullanılmıştır. Kullanılan agrega dere malzemesi olup max. agrega tane çapı 16 mm’dir. Yıkanmış olarak temin edilen malzeme üzerinde yapılan agrega deneyleri sonuçları Çizelge 5’de verilmiştir. KYB üretimi için % 40 iri, % 60 ince malzeme kullanılmış ve hazırlanan karışımın granülometri eğrisi Şekil 1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5. Agregaların fiziksel özellikleri

|   | İnce Agregası | İri Agregası |
|---|---------------|--------------|
| Özgül ağırlık                               | 2,49          | 2,63         |
| Su emme oranı (%)                           | 3,34          | 1,81         |
| Gevşek birim ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )  | 1,42          | 1,47         |
| Sıkışık birim ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> ) | 1,69          | 1,58         |



Şekil 1. Granülometri eğrisi

#### 2.1.4. Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı

KYB üretiminde BASF firmasınınca üretilen TS EN 934-2 ve ASTM C 494 standartlarına uygun polikarboksilik eter esaslı klor içermeyen yüksek oranda su azaltıcı özelliğine sahip yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi Glenium C303 kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal katkının (+20 °C % 50 bağıl nem koşullarında elde edilen) teknik özellikleri Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Glenium C303'ün teknik özellikleri

|                              |                             |
|------------------------------|-----------------------------|
| Malzemenin Yapısı            | Polikarboksilik Eter Esaslı |
| Renk                         | Açık Yeşil                  |
| Yoğunluk                     | 1,023-1,063 kg/litre        |
| Klor içeriği % (EN 480-10)   | < 0,1                       |
| Alkali İçeriği % (EN 480-12) | < 3                         |

#### 2.2. Karışım Bileşenlerinin Belirlenmesi

Çimento yerine ağırlıkça % 5, % 10, % 15 oranlarında silis dumanı ve % 25, % 40, % 55 oranlarında uçucu kül kullanılarak KYB numuneleri üretilmiştir. Deneysel çalışmada toplam bağlayıcı miktarı ve su/bağlayıcı oranı sırasıyla 500 kg ve 0,35 olup, bu değerler tüm gruplarda sabit tutulmuştur. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı başlangıçta tüm seriler için % 1,5 oranında sabit olarak düşünülmüş, ancak kontrol ve silis dumanı katkılı gruplarda üretilen karışımların KYB için yeterli akıcılığı sağlamadığı belirlenmiştir. Bu nedenle akışkanlaştırıcı katkı oranları; deneme karışımları yardımıyla, kontrol ve % 5 silis dumanı katkılı gruplar için % 1,6, % 10 silis dumanı katkılı grup için % 1,8 ve % 15 silis dumanı katkılı grup için % 2,0 olarak yeniden düzenlenmiştir. Böylece yeterli akıcılık, tüm gruplarda aynı su/bağlayıcı oranı ile sağlanmıştır. Tüm beton grupları için gerekli malzeme miktarları Çizelge 7'de topluca gösterilmiştir.

Numuneler üzerinde çökme-yayıma, U kutusu, L kutusu, V hunisi deneyleri yapılarak taze betonların yerleşebilme ve geçiş özellikleri belirlenmiştir. Üretilen betonlar suda kür edildikten sonra sertleşmiş beton numuneleri üzerinde 3 günlük, 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir.

Çizelge 7. KYB gurupları için malzeme miktarları (1 m<sup>3</sup> beton için)

| Malz Gurup | Çimento (kg) | SD (kg) | UK (kg) | Toplam Bağl. (kg) | İnce Agr. (kg) | İri Agr. (kg) | Su (kg) | Akış. Katkı (kg) |
|------------|--------------|---------|---------|-------------------|----------------|---------------|---------|------------------|
| KNT        | 500          | ----    | ----    | 500               | 967            | 694           | 175     | 8                |
| %5 SD      | 475          | 25      | ----    | 500               | 958            | 687           | 175     | 8                |
| %10 SD     | 450          | 50      | ----    | 500               | 954            | 685           | 175     | 9                |
| %15 SD     | 425          | 75      | ----    | 500               | 948            | 681           | 175     | 10               |
| %25 UK     | 375          | ----    | 125     | 500               | 938            | 673           | 175     | 7,5              |
| %40 UK     | 300          | ----    | 200     | 500               | 923            | 663           | 175     | 7,5              |
| %55 UK     | 225          | ----    | 275     | 500               | 908            | 652           | 175     | 7,5              |

SD: Silis Dumanı; UK: Uçucu Kül

### 3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

#### 3.1. Taze Beton Özelliklerinin İncelenmesi

##### 3.1.1. Yayılma Deneyi ve T50 Süresi

Bu deney taze KYB'nin deformasyon hızının gözlenmesini ve numunenin kendi ağırlığı ile yayılarak oluşturacağı çapın ölçülmesini kapsar.

Deney aparatı olarak çökme (slump) hunisi ve 80x80 cm boyutlarında bir tabla kullanılır. Betonun kendiliğinden yerleşme özelliğini ölçmek için kullanılan en yaygın yöntemdir. Yayılma tablası üzerine konulan slump hunisi içerisine beton şişleme yapılmadan doldurulduktan sonra, slump hunisi yukarıya çekilerek betonun herhangi bir sarsma yapmadan kendi ağırlığı ile yayılması beklenir. Taze betonun potansiyel enerjisi bu deneyde daha yüksek olduğundan normal yayılma deneyine kıyasla daha geniş bir yayılma çapı beklenebilir.

Yayılma deneyinde, betonun çökerek yayılma hareketini devam ettirmesi, eşik kayma gerilmesi değerini aşmasına bağlıdır. Betonun eşik kayma gerilmesi ne kadar düşükse, beton kendi ağırlığı ile o kadar çok çöküp yayılacaktır ve eşik kayma gerilmesiyle kendi ağırlığının oluşturduğu ve yayılma süresince giderek düşen gerilme eşitlenince yayılma duracaktır. Bu nedenle nihai yayılma deneyi eşik kayma gerilmesiyle ilişkilendirilebilir. Kendiliğinden yerleşebilirliği belirlemede yayılma çapının yanında 50 cm'ye yayılma süresini tespit etmek de yararlıdır. Bu değer taze betonun akış hızını belirler ve plastik viskozite ile ilişkilendirilmiştir. Daha düşük akış süresi daha düşük viskoziteyi gösterir. 50 cm çapa yayılma süresi T50 olarak adlandırılır (Kurt, 2009).

Bu çalışmada, yayılma deneyi ve 50 cm çapa ulaşma süresi EFNARC (2002), tarafından hazırlanan standarda uygun olarak yapılmıştır (Şekil 2). Yayılma tamamlanınca birbirine dik iki çap ölçülerek deney tamamlanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 8'de verilmiştir.



Şekil 2. Yayılma deneyi ve T50 süresi



Çizelge 8. Yayılma deneyi ve 50 cm çapa ulaşma süresi sonuçları

| Numune Grubu | Yay. miktarı (cm) | T50 Süresi (sn) |
|--------------|-------------------|-----------------|
| Kontrol      | 63                | 2,4             |
| % 5 SD       | 65                | 2,4             |
| % 10 SD      | 67                | 2,3             |
| % 15 SD      | 66                | 2,4             |
| % 25 UK      | 66                | 2,8             |
| % 40 UK      | 68                | 2,6             |
| % 55 UK      | 70                | 2,3             |

SD: Silis Dumanı; UK: Uçucu Kül

### 3.1.2. V Hunisi Deneyi

Bu deney, taze KYB'nin kendi ağırlığı ile özel tasarlanmış bir huninin dar olan ağzından boşalma süresinin ölçülmesini içerir. Betonun, boşluklardan geçebilme yeteneğini ölçmek için yapılan kendiliğinden yerleşebilirlik deneyidir. Deney, KYB'nin viskozitesi ve geçiş yeteneği hakkında fikir verir. Huniye KYB doldurulduktan sonra en altta bulunan sürgülü kapak açılır ve huni içindeki tüm betonun alttaki kovayı doldurma süresi kaydedilir.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneyde, EFNARC (2002) standardına uyumlu 10 litre kapasiteli V şekilli huni kullanılmıştır (Şekil 3). Huni tamamen KYB ile doldurulduktan sonra, alttaki kapak açılmış, betonun boşalması için geçen süre ölçülerek V hunisi süresi tespit edilmiştir. V-hunisi akış süresi deneyi yapıldıktan hemen sonra huni yıkanmadan yeniden taze betonla doldurulmuş ve 5 dakika bekletilerek deney tekrarlanmıştır. İki deney sonucu arasında 3 sn. den fazla süre olursa bu durum ayrışma olduğunu gösterir. Deney sonuçları Çizelge 9'da verilmiştir.



Şekil 3. V Hunisi deneyi

Çizelge 9. V Hunisi deneyi sonuçları

| Numune Grubu | t (sn) | t <sub>5dakika gecikmeli</sub> (sn) |
|--------------|--------|-------------------------------------|
| Kontrol      | 6,08   | 6,13                                |
| % 5 SD.      | 6,25   | 6,75                                |
| % 10 SD      | 6,55   | 7,48                                |
| % 15 SD      | 6,80   | 7,30                                |
| % 25 UK      | 6,95   | 7,70                                |
| % 40 UK      | 6,20   | 6,82                                |
| % 55 UK      | 7,00   | 7,61                                |

SD: Silis Dumanı; UK: Uçucu Kül

### 3.1.3. L Kutusu Deneyi

Bu deney, taze KYB'nin doldurma yeteneğinin, geçiş yeteneğinin ve ayrışma karşı direncin L şeklindeki bir kutu içerisinde gözlenmesini kapsar. Kutunun alt ortasında sürgülü bir kapak ve aynı zamanda engel oluşturacak demir çubuklar bulunmaktadır (Şekil 4). L kutusunda geçiş bölgesindeki donatılar arası mesafe en büyük agrega çapının 3 katından az olmamalıdır. Kutu taze beton ile doldurulduktan sonra sürgülü kapak yukarıya doğru çekilmiş ve betonun donatılar arasından geçerek diğer bölüme 20cm ve 40 cm ilerleme süreleri ölçülmüştür. Aynı zamanda kutunun her iki tarafındaki seviye farkı tespit edilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 10'da verilmiştir.



Şekil 4. L kutusu deneyi

Çizelge 3.3. L kutusu deneyi sonuçları

| Numune Grubu | $t_{20}$ (sn) | $t_{40}$ (sn) | $h_1$ (cm) | $h_2$ (cm) | $h_1 / h_2$ |
|--------------|---------------|---------------|------------|------------|-------------|
| Kontrol      | 1,55          | 2,80          | 8,0        | 6,7        | 0,84        |
| % 5 SD       | 1,95          | 3,70          | 9,3        | 8,1        | 0,87        |
| % 10 SD      | 1,40          | 2,30          | 8,7        | 7,6        | 0,87        |
| % 15 SD      | 1,30          | 1,90          | 8,1        | 7,0        | 0,86        |
| % 25 UK      | 1,38          | 2,70          | 8,8        | 7,5        | 0,85        |
| % 40 UK      | 1,35          | 2,55          | 8,5        | 7,5        | 0,88        |
| % 55 UK      | 1,30          | 2,50          | 7,5        | 6,8        | 0,91        |

SD: Silis Dumanı; UK: Uçucu Kül

### 3.1.4. U Kutusu Deneyi

Bu deney, taze KYB'nin kendiliğinden yerleşme yeteneğinin belirlenmesi için yapılır ve numunenin özel bir kutu içerisinde, kendi ağırlığı ile yükselmesinin gözlenmesini kapsar. Deneyde, U şeklinde, alt ortasında sürgülü bir kapak olan ve aynı zamanda engel oluşturacak demir çubuklar bulunan bir kutu kullanılmıştır (Şekil 5). KYB doldurulduktan sonra sürgülü kapak çekilmiş, betonun diğer kısma doğru dolarak yükselmesi sağlanmış ve kutunun iki kolu arasındaki yükseklik farkı ölçülmüştür. Kollar arasındaki fark ne kadar azsa, betonun geçiş yeteneği o kadar fazladır. Farkın 3 cm'den az olması iyi geçiş yeteneğini gösterir. Deney sonuçları Çizelge 11'de verilmiştir.



Şekil 5. U kutusu deneyi

Çizelge 11. U kutusu deneyi sonuçları

| Numune Grubu | $\Delta h$ (cm) |
|--------------|-----------------|
| Kontrol      | 2,7             |
| % 5 SD       | 1,5             |
| % 10 SD      | 1,0             |
| % 15 SD      | 1,0             |
| % 25 UK      | 0,5             |
| % 40 UK      | 0,5             |
| % 55 UK      | 0,4             |

SD: Silis Dumanı; UK: Uçucu Kül

### 3.2. Sertleşmiş Beton Özelliklerinin İncelenmesi

KYB üretildikten ve taze beton deneyleri yapıldıktan sonra 15\*15\*15 cm boyutlarındaki küp kalıplara yerleştirilmiştir. Numuneler 3 gün, 7 gün ve 28 gün kür edilmiş ve bu yaşlardaki basınç dayanımları belirlenmiştir. Deney sonuçları Çizelge 12’de topluca verilmiştir. silis dumanı ve uçucu külün KYB’lerin basınç dayanımına etkileri aşağıda irdelenmiştir.

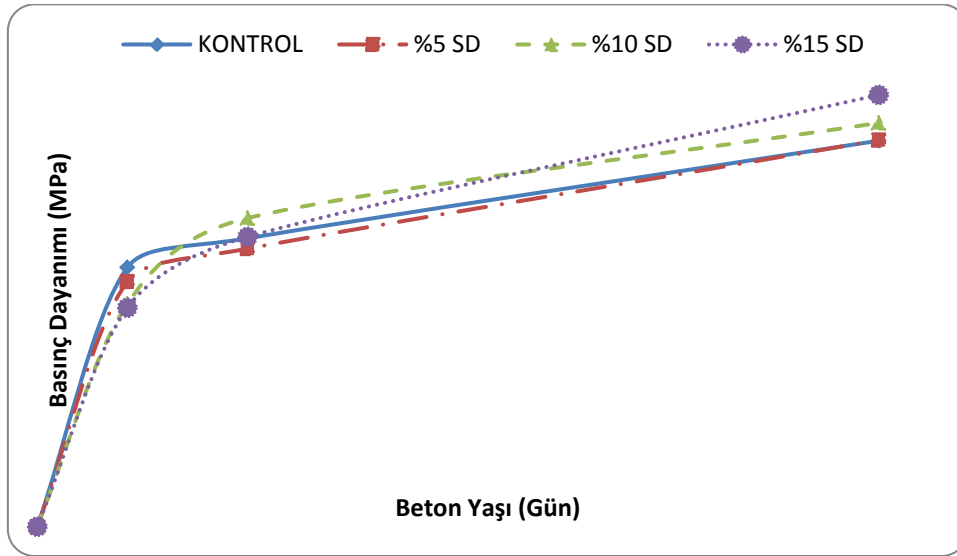
Çizelge 12. Basınç dayanımı sonuçları

| Numune Grubu | Basınç Dayanımları (MPa) |       |        |
|--------------|--------------------------|-------|--------|
|              | 3 gün                    | 7 gün | 28 gün |
| Kontrol      | 52,6                     | 58,5  | 78,3   |
| % 5 SD       | 49,7                     | 56,4  | 78,4   |
| % 10 SD      | 45,2                     | 62,6  | 81,9   |
| % 15 SD      | 44,4                     | 58,8  | 87,6   |
| % 25 UK      | 33,7                     | 46,9  | 61,5   |
| % 40 UK      | 24,0                     | 36,9  | 55,1   |
| % 55 UK      | 13,6                     | 25,2  | 42,0   |

SD: Silis Dumanı; UK: Uçucu Kül

### 3.2.1. Silis Dumanının Basınç Dayanımına Etkisi

Beton karışımlarında % 5, % 10 ve % 15 oranlarında silis dumanı kullanılarak üretilen KYB'lerin 3 gün, 7 gün ve 28 günlük dayanımları Şekil 6'da gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, silis dumanı ilavesinin 28 günlük dayanımlarda belirgin artışa sebep olduğu görülmektedir. Bununla birlikte erken yaşlarda silis dumanı ilavesi dayanımda önemli ölçüde etki göstermemiştir. 3 günlük dayanımlarda kontrol grubu numuneleri 52,6 MPa değeriyle en yüksek dayanıma sahip beton olarak belirlenirken, silis dumanı oranı artmasıyla basınç dayanımı değerlerinde azalmalar görülmüştür. 3 günlük numunelerde en düşük değer 44,4 MPa ile % 15 silis dumanı kullanılan numunelerde tespit edilmiştir. 7 günlük dayanımlar incelendiğinde % 10 silis dumanı katkılı grup 62,6 MPa değeriyle en yüksek dayanıma sahip olurken kontrol grubunun basınç dayanımı 58,5 MPa olmuştur. 28 günlük numuneler için % 15 silis dumanı katkılı betonlar, kontrol grubuna göre yaklaşık % 12 daha fazla dayanım kazanarak 87,6 MPa değerine ulaşmıştır. Bu oran % 10 silis dumanı katkılı betonlar için % 4,5 olurken % 5 silis dumanı katkılı betonlarda çok belirgin bir artış görülmemiştir. Bu betonların basınç dayanımları kontrol grubuyla hemen hemen aynı değerde kalmıştır. silis dumanı ikameli KYB karışım numunelerine ait basınç dayanımı değerlerinin yüksek oluşunun sebebi olarak, puzolanik etkileşim sonucu serbest  $\text{Ca(OH)}_2$ 'in dayanımı arttıran C-S-H jeline dönüşümünün olumlu etkisi düşünülebilir.

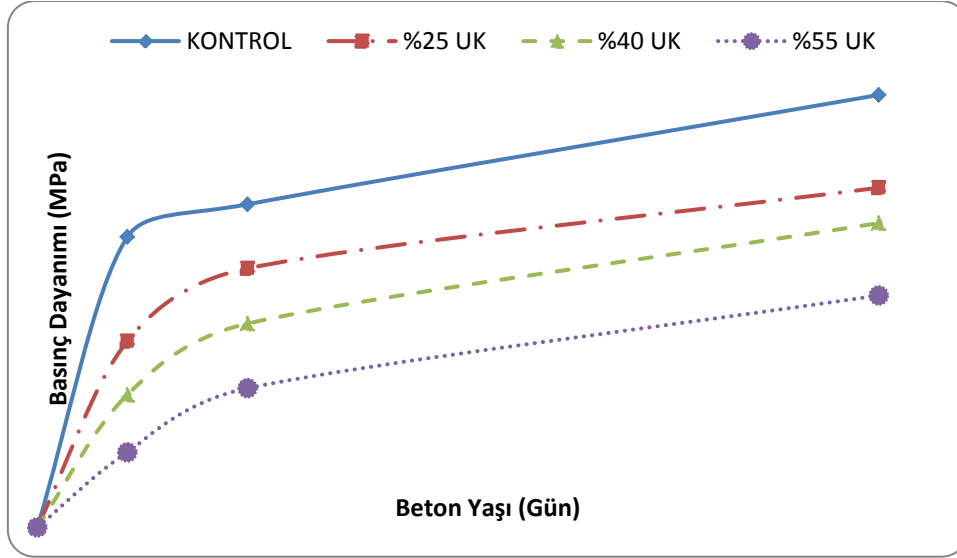


Şekil 5. Silis dumanı katkılı betonların basınç dayanımları

### 3.2.2. Uçucu Külün Basınç Dayanımına Etkisi

Beton karışımlarında % 25, % 40 ve % 55 oranlarında uçucu kül kullanılarak üretilen KYB'lerin 3 gün, 7 gün ve 28 günlük dayanımları Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, uçucu kül ilavesinin her yaşta dayanımda azalmalara yol açtığı görülmektedir. Uçucu kül miktarı arttıkça dayanımlardaki düşüş oranları da artmıştır. Her yaş için en yüksek dayanımlar kontrol grubunda belirlenirken, uçucu kül ilavesinin en fazla olduğu % 55 grubu en düşük dayanımları vermiştir. 3 günlük dayanımlarda % 25, % 40 ve % 55 uçucu kül katkılı betonların dayanımları kontrol grubuna göre sırasıyla yaklaşık % 36, % 46 ve % 74 oranlarında azalmıştır. Bu azalma oranları 7 günlük numuneler için sırasıyla yaklaşık % 20, % 37 ve % 57 olarak belirlenirken 28 günlük dayanımlarda da benzer olarak sırasıyla yaklaşık % 21, % 30 ve % 46 oranlarında azalmalar tespit edilmiştir. Zamana bağlı olarak uçucu kül

katkılı betonlarda dayanımlardaki düşüş miktarları azalmıştır. Bu duruma puzolanik etkinin sebep olduğu düşünülmektedir. uçucu kül erken yaşlarda puzolanik etkisini ortaya koymadığı için dayanımlarda azalmalara sebep olmuştur. Ancak 28 günden sonraki yaşlarda deneyler yapılmadığı için uçucu külün puzolanik etkisi ve dayanımları geç yaşlarda ne oranda etkileyeceği tespit edilememiştir.



Şekil 6. uçucu kül katkıli betonların basınç dayanımları

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen belli başlı sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. İnce taneli malzeme olarak silis dumanı ve uçucu kül kullanımı, V hunisi deney sonuçlarına göre betonun viskozitesini genellikle artırmıştır.
2. silis dumanı kullanımı 28 günlük dayanımlarda artışa sebep olmuştur. En yüksek dayanım, kontrol grubuna göre % 12 artış gösteren % 15 silis dumanı katkıli KYB numunelerinden elde edilmiştir. Bununla birlikte erken yaşlarda silis dumanı katkıli betonların dayanımları kontrol grubundan düşük değerlerde kalmıştır. Bu duruma puzolanik reaksiyonunun tamamlanmamış olmasının sebep olduğu düşünülmektedir.
3. uçucu kül kullanımı her yaşta beton dayanımlarda azalmalara yol açmıştır. 28 günden sonraki yaşlarda dayanım belirlenmediği için uçucu külün puzolanik özelliği ve nihai dayanıma etkisi belirlenememiştir. Bu sebeple uçucu kül katkıli KYB'lerin ilerki yaşlarda dayanımlarının araştırılması tavsiye edilmektedir.
4. Tüm gruplar dikkate alındığında, 28 günlük dayanım değerlerinin 42-88 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu değerlerin, uygulamada kullanılan beton sınıfları dikkate alındığında, oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Böylece yerleştirme sorununu ortadan kaldıran, işçilik ve enerji maliyetlerini azaltan, düzgün yüzeyler elde edilmesine olanak sağlayan ve yüksek dayanıma sahip KYB'lerin kullanımının yaygınlaşmasının uygulamada karşılaşılan pek çok sorunu ortadan kaldıracağı düşünülmektedir.

#### KAYNAKLAR

- Bouzoubaa N., Lachemi M. (2001): "Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash Preliminary Results", Cement Concrete Research, Cilt. 31, No. 3, s.413-420.

- Erdoğan T. Y. (2004): “Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri”, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- Eroğlu L., Şahmaran M., Yaman İ. Ö., Tokyay M. (2007): “Karışım Parametrelerinin Kendiliğinden Yerleşen Betonun Taze Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Belirlenmesi”, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, s.249-259.
- Felekoğlu B., Yardımcı M. Y., Baradan B. (2003): “A Comparative Study on the Use of Powder and Chemical Types of Viscosity Enhancers in Self Compacting Concrete”, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Self Compacting Concrete, Iceland, s.446-456.
- Felekoğlu B., Baradan B. (2004): “Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özellikleri”, Beton 2004 Kongresi Bildirileri, s. 234-243.
- Felekoğlu B. (2003). “Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, Temmuz, s.251.
- Güneşli U. (2008): “Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması”. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Gürdal H., Yüceer Z. (2004): “Türkiye ve Dünyada Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulamaları”, Beton 2004 Kongresi Bildirileri, s.244-254.
- Houst Y. F., Maeder U., Flatt R. J., Widmer J., Bowen P., Hoffmann H., Sulser U., Buerge T.A. (1999): “New Superplasticizers: from Research to Application, Creating With Concrete”, International Conf. on Modern Concrete Materials: Binders, additives and admixtures, Scotland, s.445-456.
- Khayat K. H., Guizani Z. (1997): “Use of Viscosity-Modifying Admixture to Enhance Stability of Fluid Concrete”, ACI Materials Journal, s.332-340.
- Khayat K. H. (1999): “Workability, Testing and Performance of Self-Consolidating Concrete”, ACI Materials Journal, Cilt 96, No. 3, s.346-353.
- Kurt M. (2009): “Kendiliğinden Yerleşen Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Okamura H., Ouchi M. (2003): “Self-Compacting Concrete”, Journal of Advanced Concrete Technology”, Cilt1, No.1, s.5-15.
- Sağlam A. R., Özkul M. H. (2006): “Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik Özelliklerine Bileşim Parametrelerinin Etkisi”, İTÜ İnşaat Fakültesi, İnş. Müh. Bölümü, İstanbul.
- Skarendahl A., Peterson O. (2000): “Self-Compacting Concrete, State-of-the Art Report of RILEM Technical Committee”, 174-SCC.
- Şahmaran M., Yaman İ. Ö., Tokyay M. (2007): “Development of High Volume Low-Lime and High-Lime Fly Ash Self Consolidating Concrete”, Magazine of Concrete Research, Cilt. 59, Sayı 2, s. 97-106.