

Kendiliğinden Yerleşen Betonlar*

M. Hulusi Özkul¹

Özet

Kendiliğinden yerleşen betonların (KYB) son yıllarda beton teknolojisinde gözlenen en önemli gelişme olduğu söylenebilir. Gerçekten KYB'lar ile vibratör kullanılmadan çok sık donatılı ve karmaşık kesitli elemanların üretimi sağlanmakta, böylece üretim hızı ve kalitesi artmakta, aynı zamanda gürültü açısından çevre ve çalışanlar korunmaktadır. Bu yazıda kendiliğinden yerleşen betonların bileşim özellikleri ve tasarım ilkeleri, taze beton reolojisi, dürabilite özellikleri ve bazı uygulama alanlarına değinilecektir.

1. GİRİŞ

Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB), iyi işlenebilir bir betonun taze haldeki temel özelliklerinden olan kolay yerleşebilmeyi vibratör uygulamadan gerçekleştirmekte, aynı zamanda ikinci özellik olan ayrışma direncini de yüksek oranda sağlamaktadırlar. Seksenli yılların sonlarında Japonya'da geliştirilen KYB'lar [1] doksanlı yıllarda Dünya'ya yayılmaya başlamış, Türkiye'de kullanımı ise 2000'li yıllara rastlamaktadır.

KYB'ların en önemli üstünlükleri sıkıştırma aygıtları gerekmeden sık donatılı ve karmaşık şekilli kalıpları bile kolayca ve boşluk bırakmadan doldurabilmesidir.

Self Compacting Concretes*

Self compacting concretes (SCC) are the most important development experienced in concrete technology in recent years. In fact, it is possible to prepare concrete members with very congested reinforcement and complex cross sections without using vibrators; hence the rate and quality of production increase and also the protection of environment and the workers from the noise becomes possible. In this paper the composition and design basics, fresh concrete rheology, durability properties and some fields of applications of self compacting concretes will be discussed.

Bilindiği gibi geleneksel betonun en önemli aşamalarından birisi vibratör kullanılarak sıkıştırılmasıdır. Bunun için yeterli özelliklere sahip vibratörlerin yanında eğitilmiş elemanlara da ihtiyaç vardır. Yeterli sıklıkta, doğru derinlikte, doğru eğimde ve yeterli sürede uygulanmayan vibratör betonu tam olarak yerleştiremez. Diğer taraftan aşırı süre uygulanan vibratör betonun ayrışmasına yol açabilir. KYB'lar bu sorunları ortadan kaldırmakta, kötü işçilik nedeniyle ortaya çıkabilecek problemleri önlemektedir.

Öte yandan geleneksel betonun döküldükten sonraki yerleştirme işlemi belirli bir süre almakta, dökülen betonun belirli bölgelerde yığılması nedeniyle taşınması gerekebilmektedir. Oysa KYB'lar bir noktadan dökülseler bile tüm elemanı döküm noktasını değiştirmeden doldurabilmektedir. Böylece KYB ile daha az işçilik ve daha kısa sürede daha iyi sonuç alma olanağı doğmaktadır. Bir yapıda döşeme ve düşey elemanların üretiminin geleneksel betonla üretime göre KYB kullanılması durumunda 1/5 oranında daha kısa sürede gerçekleştirileceği belirtilmiştir [2].

Geleneksel beton ile üretim yapmanın diğer bir sorunu gürültüdür. Gerek şantiyede gerek ise prefabriğe üretimde vib-

^(*) Beton 2013 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

⁽¹⁾ İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, hozkul@itu.edu.tr

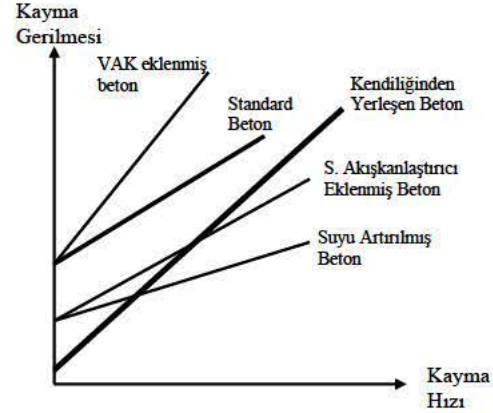
ratörler çalışma sırasında önemli ölçüde gürültüye neden olmaktadır. Bu nedenle şehir merkezlerinde inşaat yapmak zordur; aynı nedenle gece çalışmak da çevreyi rahatsız edebilir. Prefabrik sektöründe de gürültü büyük bir problemdir; çalışanlar kulak tıkaçları takmak durumunda kalmaktadır. KYB hem şantiyede hem de prefabrik üretimde gürültü sorununu büyük oranda önlemiştir. Vibratörlerin diğer bir sakıncası da kan dolaşımını bozması ve “beyaz parmak” hastalığına yol açmasıdır [3].

KYB’ların betonarme elemanlardaki davranışının geleneksel betondan farklı olmadığı anlaşılmaktadır. C 30 sınıfında KYB ile üretilen kirişlerin eğilme altındaki davranışları incelenmiş ve moment taşıma kapasitelerinin ACI 318’de verilen değerlerin %7’ye kadar varan oranlarda üzerine çıktığı belirtilmiştir [4].

KYB’lar genel olarak düşük su/bağlayıcı oranına sahip olmaları nedeni ile hem yüksek dayanıma hem de üstün dürabilite özelliğine sahip olmakta ve bu nedenle yüksek başarılı (performanslı) betonlar sınıfına sokulabilmektedir. Ayırışma dirençlerinin yüksek oluşu ve düzgün yüzey elde edilmesine olanak vermeleri diğer üstünlükleridir. Ayrıca KYB’larda geleneksel betonlarda gözlenen dayanımın elemanın alt ucundan olan yükseklığe bağlı olarak değişimi ve donatı-beton aderansının donatının konumuna bağlı olması (top bar effect) gibi sorunlar görülmemektedir. Bunların dışında birçok KYB uzun süre işlenebilirliklerini koruyabilmekte ve hazır beton sektöründe geleneksel betonlarda görülen çökme kaybı olayı en az 1-1,5 saat için söz konusu olmamaktadır.

2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN TAZE BETONUN DAVRANIŞI

Geleneksel betonda akışkanlık su ile sağlanmaya çalışıldığında sadece kayma eşiği düşmemekte, aynı zamanda viskozite de azalmaktadır (Şekil 1). Viskozitenin düşmesi ise ayırışmaya yol açmaktadır. Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı geleneksel betonda viskoziteyi değiştirmeden kayma eşiğini azaltmaktadır. Silis dumanı kayma eşiğini artırırken (viskoziteyi etkilemeden) hava sürüklemeye kayma eşiğini düşürmektedir. Diğer mineral katkıların etkisi ise kayma eşiğini azaltırken viskoziteyi artırıcı ya da azaltıcı yönde olabilmektedir.



Şekil 1. Beton bileşenlerinin reolojik özelliklere etkisi

KYB kendi ağırlığı altında ve vibrasyon gerektirmeden kalıpları boşluksuz bir şekilde doldurabilmesi için yüksek **akıcılığa** sahip olması gerekir. Betona akıcılık özelliğini süperakışkanlaştırıcı sağlamaktadır. Ancak yüksek akıcılığı sağlarken **ayırışmaya** izin verilmemelidir. Ayırışma, taşıma, döküm ve yerleştirme aşamalarında, ayrıca beton katılaşana kadar iri ince malzeme ayrılması, ya da su kusması (terleme) şeklinde görülmektedir.

Betonun kolayca **şekil değiştirebilmesi** için akma eşiğinin küçük olması gerekir. Bu özelliğin su miktarını artırarak sağlanması durumunda betonun **kararlılığı** bozulmakta, yani ayırışma eğilimi ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle ayırışmanın göstergesi olan viskozite özelliği çok küçülmemelidir. İşte yüksek akıcılık üstün akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları (süperakışkanlaştırıcılar) yardımı ile sağlanırken betonun kararlılığı ince malzeme miktarını yüksek tutmakla ve/veya viskozite artırıcı maddeler kullanarak gerçekleştirilmektedir.

Viskozite ile kayma eşiği arasında bir denge bulunmalıdır. Viskozite çok yüksek olduğu zaman çökme konisi kaldırıldığında betonun hareketi zorlaşmaktadır, bunun önüne geçilebilmesi için kayma eşiğinin çok düşük değerde olması gerekir. Bu durumda betonda ayırışma eğilimini yüksek viskozite önleyecektir ve yüksek yayılmalara ulaşılır. Orta düzeyde viskozitede betonun hareketi sağlanırken orta düzeydeki kayma eşiği de aşılabılır. Bu betonlarda kayma eşiği ve viskozite birlikte ayırışmayı önler. Viskozitenin çok düşük olduğu betonlarda ise ayırışmayı önleme tek başına akma eşiğine kalır ve bu betonlarda yayılma daha düşük olacaktır [5].

KYB'un sadece doldurma özelliğine (**doldurma yeteneği**) sahip olması yetmemekte aynı zamanda yoğun donatılar arasından kolayca geçebilir özellikte (**geçiş yeteneği**) olması ve tüm taşıma ve uygulama aşamalarında homojenliğini koruması (**ayırışma direnci**) da aranmalıdır.

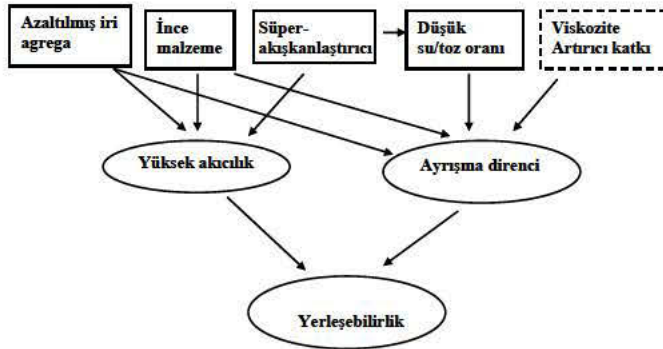
3. TASARIM İLKELERİ

KYB üretiminde, sınırlı iri agrega miktarı ve güçlü bir süperakışkanlaştırıcı yüksek akıcılık özelliğini gerçekleştirirken, azaltılmış (su/ince malzeme) oranı, sınırlı iri agrega miktarı, artırılmış ince malzeme (toz malzeme) ve/veya viskozite artırıcı katkı yüksek ayırışma direncini sağlamaktadır (Şekil 2). En yaygın kullanılan süperakışkanlaştırıcı polimer karboksilat esaslı olmalıdır, ancak sülfonatmelamin formaldehid ve naftalin formaldehid benzeri polimerler de kullanılmaktadır. Süperakışkanlaştırıcı katkı dağıtıcı (dispersiyon) etkisini, çimento tanelerini aynı işaretle elektriksel olarak yüklerken aynı zamanda doldurma (sterik) etkisi ile de ince tanelerin birbirlerini itmesine borçludur.

KYB'ların tasarımlarında temel olarak 3 yöntem izlenmektedir:

- Artırılmış ince malzeme (toz malzeme) yöntemi
- Viskozite artırıcı katkı kullanımı
- Her iki yaklaşımın karışımı

Birinci yöntemde ayırışma direnci ve yayılma, çimento inceliğinde veya daha ince olan malzeme miktarı artırılarak sağlanmaktadır. Bu malzemelerin bir bölümünü çimentonun kendisi oluşturur; buna ek olarak uçucu kül, öğütülmüş kalker [6, 7], cüruf (öğütülmüş), silis dumanı kullanılabilir.



Şekil 2. KYB'da bileşenlerin beton özelliklerine etkileri

İkinci yöntemde ince malzemeyi artırmak yerine viskozite artırıcı katkı (VAK) kullanılmaktadır. Üçüncü yöntemde ise ince malzeme çok fazla artırılmadan ya da ince malzemeye ek olarak VAK ilave edilmektedir. Viskozite artırıcı katkı bir doğal sakız (gum) olabildiği gibi (welan gum), nişasta eteri esaslı, ve

yoğunlaştırılmış silis esaslı da olabilmektedir. Genel olarak VAK'lar aşağıdaki şekilde gruplandırılabilir [8]:

1. Nişasta ve doğal sakız benzeri doğal polimerler.
2. Ayrıştırılmış nişasta ve türevleri, selüloz eter türevleri, sodyum alginat ve benzeri elektrolitler.
3. Polietilen oksit ve polivinilalkol gibi sentetik polimerler.

Bu gruba polisakaritler (welan gum) ve akrilik bazlı polimerler (poliakrilamit ve sodyum akrilat) de eklenebilir [9]. Rolz ve arkadaşları [10], KYBlarda nişasta, atık nişasta ve çöktürülmüş silis (precipitated silica) denemiler ve betonun ayırışma direncini beton ile doldurdıkları silindirik numunelerde iri agrega konsantrasyonunun yükseklikle değişimini ölçerek belirlemişlerdir. Lachemi ve arkadaşları [11], 4 farklı polisakarit esaslı viskozite düzenleyici ile harçlar üzerinde reolojik özellikleri incelemişlerdir.

KYB'da agrega karışımı olarak taneler arası boşluk minimum düzeyde kalacak oranlar seçilmekte, böylece hamurun agrega taneleri arasındaki boşlukları kolayca doldurarak tanelerin etrafını da belirli bir kalınlıkta sarması sağlanmaktadır. Bu amaçla agrega doldurma faktörü (ADF) tanımlanmış ve en büyük ADF'yi veren karışımlar araştırılmıştır [12]. En büyük agrega çapı olarak genellikle 20 mm'nin altında kalınmaktadır. Okamura ve arkadaşlarının [13] geliştirilen yöntemde 5-20 mm boyutlarında iri ve 5 mm den küçük ince agrega kullanılmaktadır. İri agrega olarak, kuru halde sıkıştırılmış betona giren malzemelerin toplamının %50 si alınmaktadır.

Japonya'da önerilen yaklaşımda betonarme elemanlardaki donatıların sıklığına göre KYB'nun alt sınıfları seçilmektedir [14]. Bu alt gruplar şu şekilde ayrılmıştır.

1. Derece: Karışık şekilli kalıplar ve minimum 35-60 mm donatı aralıklarındaki elemanlarda kullanılabilir.
2. Derece: Minimum 60-200 mm donatı aralıklarındaki elemanlarda kullanılabilir.
3. Derece: Geniş kesitli ve 200 mm'den daha büyük donatı aralıklarındaki elemanlarda kullanılabilir.

Betonun bileşim şekline bağlı olarak her bir alt grupta önerilen iri agrega hacim oranları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. KYB'larda önerilen alt sınıflara göre iri agrega hacim aralıkları [14]

KYB Sınıfı	Betonda iri agrega hacmi (m ³ /m ³)		
	Toz tipi	VAK tipi	Karışık tip
1. Derece	0,28-0,30	0,28-0,31	0,28-0,30
2. Derece	0,30-0,33	0,30-0,33	0,30-0,33
3. Derece	0,32-0,35	0,30-0,36	0,30-0,35

İnce malzeme (genellikle çimento dahil 100 mikrondan ince malzemeler) hem ayırışma direncini sağlamakta hem de ya-

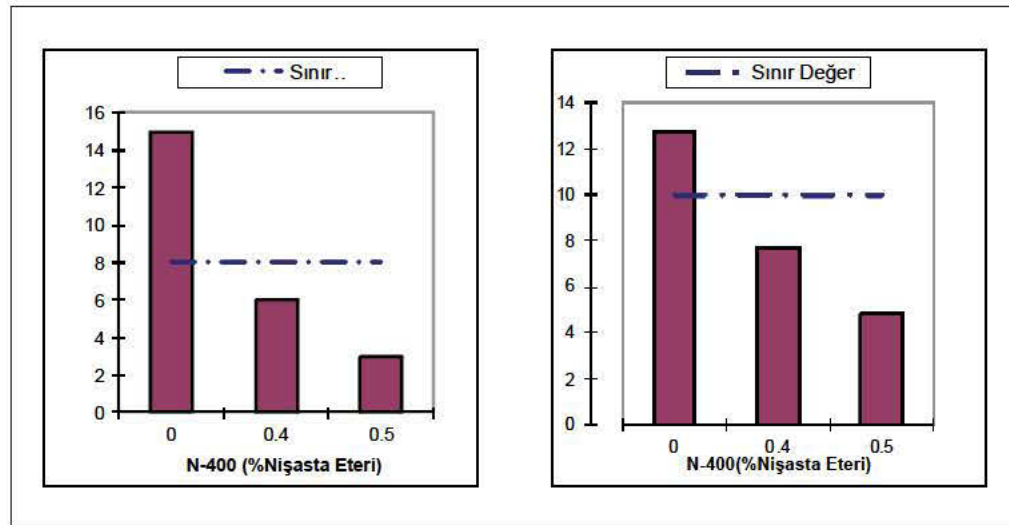
yılmaya yardımcı olmaktadır. İ.T.Ü.'de yapılan çalışmalarda çökme-yayılma deneyinde 70m5 cm elde edilecek şekilde deneyler yapılarak toplam ince malzeme miktarı araştırılmıştır. 500 kg/m³'ün altındaki ince malzeme oranlarında ayrışma

eğilimi olduğu, optimum değer 550 kg/m³ de gerçekleştiği bulunan çalışmada (Tablo 2) çimentonun bir bölümünün uçucu kül ya da kalker taş tozu ile yer değiştirebileceği sonucuna varılmıştır [7, 15].

Tablo 2. KYB Deney Sonuçları [7, 15]

Çimento+taş tozu (kg/m ³)	Su/çimento	Katkı oranı (%)	Süre (dakika)	Yayılma (cm)	Gözlem
450+0	0,37	1,5	Ani	55	Ayrışım
500+0	0,38	1,5	Ani 30 60 90 120	56 56 57 58 45	Hafif Ayrışma
550+0	0,36	1,5	Ani 30 60 90 120	65 65 63 66 65	Ayrışma Yok
450+150	0,33	2,5	Ani 30 60 90 120	73 74 70 65 49	Ayrışma Yok

Ayrışma direncinin VAK ile sağlandığı ikinci yöntem olarak nişasta eteri kullanılmış 400 kg çimento dozajlı KYB karışımları verilebilir [16-18]. Bu betonlarda serbest ve kısıtlı yayılma miktarları 600 mm'nin üzerinde kalmış ve eleme ve penetrasyon oranları denenen tüm oranlarda sınır değerlerinin altında kalmış (ayrışmaya dirençli), ayrıca tüm betonlarda terleme miktarları sıfırlanmıştır.



Şekil 3. 400 kg dozajlı Nişasta Eteri içeren karışımların ayrışma dirençleri [16-18]

4. TAZE BETON DENEYLERİ

Kendiliğinden yerleşen betonlardan beklenen yayılma, kalıpları doldurma ve donatılar arasından geçebilme yetenekleri değişik deneylerle belirlenebilir. En yaygın kullanılan çökme-yayılma deneyi yayılma ve doldurma yeteneği hakkında bilgi verir. Bu deney sırasında ölçülen T_{500} değeri ise hem yayılma hızını hem de viskozite düzeyini gösterir. Aynı amaçla V-hunisi deneyi de yapılabilir. U kutusu ya da çift kutu deneyleri donatılar arasından geçiş ve kalıpları doldurma yeteneklerini tanımlar. L kutusu ve J-ring (ve yazarlar tarafından geliştirilen kısıtlanmış yayılma deneyi) deneyleri geçiş yeteneğini ölçerler. Tasarımcının, üreteceği KYB'un özelliklerini kullanım yerine göre tanımlaması gerekir. Tablo 3'de değişik kullanım yerleri için KYB'ların özellikleri çökme-yayılma ve V-hunisi değerleri olarak verilmiştir [19]. Özellikleri seçilen beton yukarıda açıklanan agrega en büyük tane boyutu, agrega bileşimi, toplam ince madde miktarı ve/veya VAK miktarı, iri agrega hacmi ile ilgili noktalar göz önüne alınarak tasarlanır. Su/çimento oranı ve süperakışkanlaştırıcı katkı oranı istenilen özellikler sağlanacak şekilde denenerak bulunur. Aynı zamanda ayrışmayı denetlemek için ayrışma direnci deneyleri de yapılır.

V-Hunisi Süresi (s)			
9-25	Eğimli		Yüksek-Narin
5-9		Perdeler	
3-5		Döşemeler	
	5	6	7
	470-570	540-660	630-800
	Kıvam Sınıfı Çökme-Yayılma (mm)		

Tablo 3. Değişik uygulamalar için kıvam parametreleri [19]

4.1. Çökme Yayılma Deneyi

Deney yöntemi "EN 12350-8: Slump-flow test for self-compacting concrete (flow diameter test)" standardında açıklanmıştır. Klasik çökme deneyi kullanılabileceği gibi bazen ters konumda, yani geniş ağız üstte kalacak şekilde de uygulanabilir. Alta konulan çelik plak üzerine çizilen 50 cm çaplı bir dairenin merkezine yerleştirilen koni beton ile doldurulduktan sonra yukarıya doğru çekilerek çıkartılır ve aşağıdaki ölçümler yapılabilir (Şekil 4.).

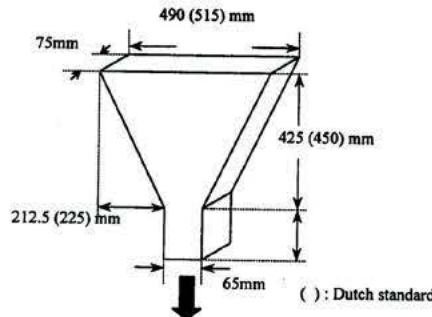
- 50 cm çaplı daireye ulaşıncaya kadar geçen süre ölçülür. Bu değer betonun başlangıçtaki akış hızını verir ve belirli değerlerden küçük olması istenir.
- Toplam yayılma süresi.
- Yayılma sona erdikten sonra oluşan dairenin birbirine dik iki çapı ölçülerek çökme-yayılma değeri bulunur.



Şekil 4. KYB'da çökme-yayılma deneyi.

4.2. V-Huni Akış Deneyi

Bu deney betonun dar bir aralıktan geçiş yeteneğini ve viskozitesini ölçmeye yöneliktir. Huni taze beton ile doldurulduktan sonra alt uçtaki kapak açılarak akış başlatılır. Üstten bakıldığında alttan ışık geçmeye başladığı ana kadar geçen süre ölçülür (Şekil 5.).

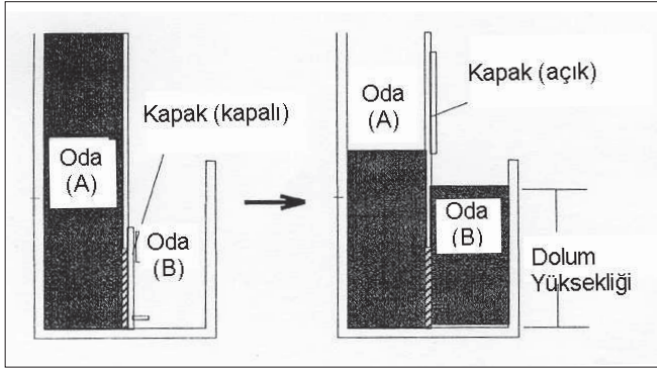


Şekil 5. V-Huni akış deneyi

4.3 Çift Kutu Deneyi

U borusu şeklinde iki kutu yan-yanaya yerleştirilmiş ve aralarında alttan 19 cm lik bölüm açık olacak şekilde ayarlanmıştır (Şekil 6). Bu açıklığa 10 mm çaplı 5 adet çelik çubuk aralarında 35 mm aralık kalacak şekilde düşey konumda yerleştirilir. Beton doldurulmadan önce bu açıklık hareket edebilen bir kapak ile kapatılır. Kutulardan birisi belirli bir yüksekliğe

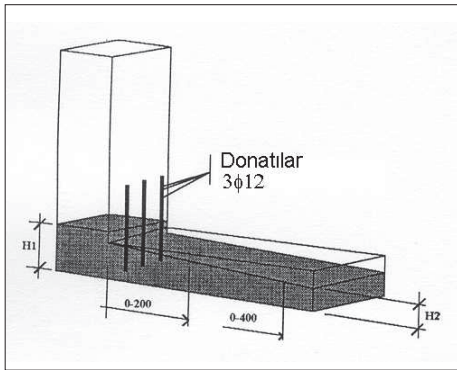
kadar doldurulduktan sonra kapak düşey olarak kaldırılır ve betonun diğer kutuya akması sağlanır. Beton kendi ağırlığı altında bu kutuyu belirli bir yüksekliğe kadar doldurur. Burada hem engellerden (çubuklar) geçme yeteneği hem de doldurma yeteneği ölçülmektedir. Deney sırasında iki ölçüm yapılır; hem doldurma işlemi bitene kadar geçen süre ölçülür, hem de ikinci kabinde betonun yükselme değeri kaydedilir. Bu deneyin U kutusu şeklinde olan ağırla yapılan türü de vardır.



Şekil 6. Çift kutu deneyi

4.4 L - Şeklinde kutu deneyi

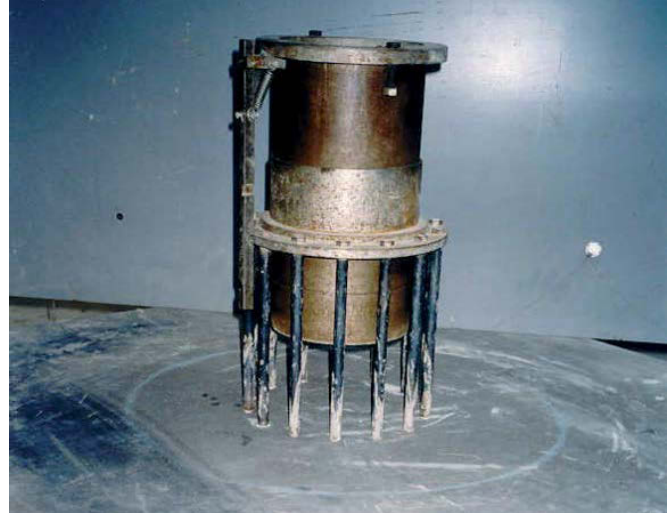
Bu alet kare kesitli kutu şeklinde bir bölüm ile bunun önünde yer alan bir yatay platformdan oluşmaktadır (Şekil. 7). Kutunun alt kısmında bulunan açıklığa 12 mm çaplı ve 34 mm aralıkta 3 adet çelik çubuk (donatı) yerleştirilmiştir. Başlangıçta açıklık kapatılmıştır. Kutu taze beton ile doldurulduktan sonra kapak yukarıya çekilir ve beton donatılar arasından geçerek platform üzerinde akmaya başlar. 200 mm ve 400 mm lik uzaklıklara ulaşma süreleri ayrı-ayrı ölçülür. Ayrıca betonun kutu içinde kalan bölümünün ve en uçtaki (platformda) bölümünün yükseklikleri ölçülür. Bu deney betonun doldurma yeteneği, engel geçiş yeteneği ve ayrışma direnci gibi özelliklerini ölçmeye yarar.



Şekil 7.
L-kutu deneyi

4.5 Kısıtlanmış çökme-yayılma deneyi

Yazar ve diğerlerince [7, 16, 20] geliştirilen deney aletinde içte, alt ve üstü açık 15 cm çapında ve 30 cm yükseklikte bir silindir bulunur ve bunun hemen etrafına 12 mm çapında ve 35 mm aralıkla 14 adet çelik çubuk düşey olarak yerleştirilmiştir (Şekil 8.). İçteki silindir beton ile doldurulduktan sonra düşey doğrultuda yukarıya doğru kaldırılmakta ve betonun çubuklar arasından geçerek yayılması sağlanmaktadır. Aletin oturtulduğu çelik plaka üzerine daha önceden çizilen 50 cm çaplı daire yardımı ile betonun başlangıçtaki hızı, toplam yayılma süresi ve toplam yayılma miktarı ölçülebilmektedir. Ayrıca çubuklar arasında kalan betondaki iri agrega konsantrasyonu ayrışmanın bir ölçüsü olarak değerlendirilebilir. Bazı betonlar geleneksel çökme-yayılma konusunda belli bir yayılma verirken söz konusu alette çubuklar (donatılar) arasından geçmesi gerektiği için yayılma miktarı daha düşük kalabilmektedir [21]. Söz konusu deney J-halka deneyine benzemektedir.



Şekil 8. Geliştirilmiş çökme-yayılma deneyi [8,18,21].

4.6 Ayrışma Direnci Deneyleri

4.6.1 Perde doldurma deneyi

Aynı zamanda doldurma ve ayrışma hakkında bilgi veren bir yöntemdir. Yazar ve arkadaşlarının geliştirilen kalıp [8,18] (Şekil 9) 150x20x100 cm boyutlarında olup içine kalıp kısa kenarına paralel olacak şekilde 20 mm çaplı, aralarındaki uzaklık 16 cm olan 40 adet plastik boru yerleştirilmekte ve kalıp bir ucundan pompa ile doldurulmaktadır. Bu uç beton ile dolduğunda, en uzak uçtaki beton düzeyi doldurma yeteneği hakkında bilgi verirken (Şekil 8), sertleşmiş betondan değişik seviyelerde ve doldurma noktasına farklı uzaklıklardaki noktalardan alınan karotların basınç dayanımları betonun ayrışması ya da homojenliği hakkında bilgi vermektedir.

4.6.2 Kolon yöntemi

Kolon yönteminde kesitleri 100x100 mm veya 100x150 mm olan ve yüksekliği 400 mm olan kalıplar ya da 100x150x500 mm boyutlu kalıplar kullanılabilir. Beton kalıplara yerleştirildikten sonra kalıbın üst ve alt bölgelerinden taze betondan numuneler alınır. Bu betonlarda iri agrega konsantrasyonu incelenir. Kolonlardaki beton sertleştikten sonra da yöntem uygulanabilir. Bu durumda kolonun tepe noktasının 8 mm altında rastlanan ilk iki iri agreganın (çapı 8 mm'den büyük) tepe noktasına uzaklığı ölçülür; 10 mm'den küçük ise ayrışma direnci yeterli demektir [22].



Şekil 9. Ayrışma ve doldurma yeteneği ölçme (Kalıp sadece bir noktadan doldurulmaktadır) [8,18].

4.6.3 Eleme yöntemi

Taze betondan alınan 10 l'lik numune 5mm göz çaplı bir eleğin içine dökülerek 15 dakika sonunda elekten geçen miktar ölçülür (Şekil 10) (EN 12350-11: Sieve segregation test for self compacting concrete).

4.6.4 Daldırma yöntemi

Daldırma (penetration) yönteminde toplam ağırlığı 54 g olan bir silindirin taze beton içine serbest ağırlığı altında girme derinliği ölçülür (Şekil 11).



Şekil 10. Eleme Deneyi



Şekil 11. Daldırma (Penetrasyon) Deneyi

4.7 Beton Kalıp Basıncı

Dökümden sonra taze haldeki KYB'ların kalıba uyguladıkları basınca yönelik birbiri ile çelişebilen sonuçlar açıklanmıştır. KYB'lar çok akıcı oldukları için betonun kalıbına yaptığı basınç hidrostatik basınca yakın olduğu şeklinde değerlendirilmeler vardır. KYB'lar taze halde iken Bingham sıvısı gibi davrandıkları için dökümden sonraki hareketsiz süreçte basıncın düşmesi beklenir, ancak herhangi bir ani sarsıntı kayma eşiğinin aşılmasıyla sıvı gibi hareket etmesine ve basıncın hidrostatik basınç düzeyine çıkmasına yol açabilir [23]. Billberg [24] kalıp basıncı üzerine beton dökme hızının etkili olduğunu kaydetmiştir. Ayrıca kalıpların alttan pompa yardımı ile doldurulması durumunda oluşan basıncın, yukarıdan normal şekilde doldurmaya göre 2 kat arttığı görülmüştür [25].

Leeman ve Hoffmann [26] KYB'ların kalıp basıncını laboratuvar ve saha koşullarında ölçmüşlerdir. Laboratuvar da 270 cm ve sahada 470 cm yükseklikte olan kolonlarda deneyler yapılmıştır. Çökme-yayılmaları 57-66 cm ve V-henisinde akış süreleri 2-6 s arasında kalan KYB'ların kalıp basınçlarının hidrostatik basıncın %87-90'ı arasında değiştiği görülmüştür. En yüksek basınç en yüksek yayılmaya sahip olan betonda belirlenmiştir. Aynı kalıplar kullanılarak geleneksel bir beton da denenmiş ve kolonun doldurulmasından hemen sonra kalıp basıncı hidrostatik basıncın %55'i olarak ölçülmüştür. Betona vibratör uygulandığında basınç, hidrostatik basınç değerine çıkmıştır. Ancak geniş elemanlarda vibratörün uygulandığı noktanın uzağındaki bölgelerde basıncın bu düzeye çıkamayacağı söylenebilir. Basınç zamanla düşmüştür; KYB'da ilk 20 dakikanın sonunda basıncın %7-20 oranında düştüğü belirlenmiştir.

5. KYB'LARIN DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİ

Normal Portland çimentosu ve farklı oranlarda puzolan içeren çimentolar ile yapılan 550 kg/m³ dozajlı betonların yayılma değerleri Tablo 4'de verilmiştir [27]. Bu betonlardan CEM IV/B 32.5 ve CEM IV/A 32.5 çimentoları ile üretilenler kendiliğinden yerleşme özelliği gösterememiştir. Bu betonlar 3 yıllık iken yapılan karbonatlaşma ve kılcalık deney sonuçları Şekil 12 ve 13'de verilmiştir.

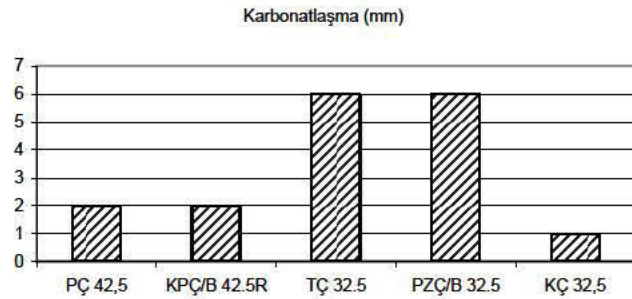
Tablo 4. Beton bileşimleri [27]

Çimento Tipi	S/Ç	Katki dozajı	Yayılma(cm)	
			serbest	donatılı
PÇ 42,5 (CEM I 42,5)*	0,31	%2,5	70	70
KPÇ/B 42,5R (CEM II/B-M 42,5)	0,30	%2,5	64	72
KÇ 32,5 (CEM II/A-P 32,5)	0,31	%2,5	70	73
PZÇ/ B 32,5 (CEM IV/B 32,5)	0,35	%2,5	32	34
TÇ 32,5 (CEM IV/A 32,5)	0,41	%2,5	40	46

*TS EN 197-1'e göre yeniden tanımlanmıştır

5.1 Karbonatlaşma

Yaklaşık üç yaşındaki numunelerin fenolfitalein çözeltisi ile karbonatlaşma derinlikleri belirlenmiş ve Şekil 12'te verilmiştir. Buna göre KPÇ'li KYB en düşük karbonatlaşmayı vermiş, onu PÇ ve KÇ'li KYB'ler izlemiştir. TÇ ve PZÇ'li KYB özelliği göstermeyen betonlarda karbonatlaşma daha büyük elde edilmiştir. Son iki betonda su/çimento oranının diğerlerinden daha yüksek olması bu sonucu doğurmuş olabilir.

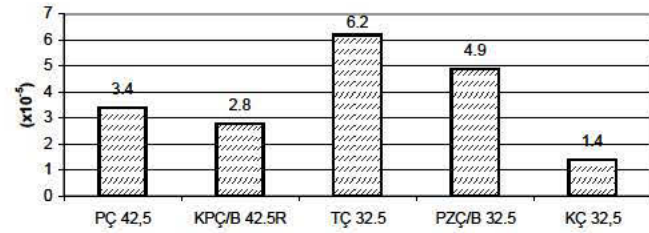
**Şekil 12.** Üç yıl sonundaki karbonatlaşma derinlikleri [27]

5.2 Kılcallık

Birim alandan ölçülen su emme değerleri yığışımli olarak ölçülmüş ve su emmenin karesinin zaman ile değişimi çizilmiştir. İlişki doğrusal elde edilmiş ve aşağıdaki (1) nolu bağıntıda verilen k kılcallık katsayısı doğrunun eğiminden hesaplanmıştır.

$$q^2 = k \times t \quad (1)$$

Bu şekilde hesaplanan kılcallık katsayıları Şekil 13'de karşılaştırılmıştır. KÇ'li KYB'nin kılcallık katsayısı diğer iki KYB'den daha düşük çıkmıştır. Bu durum karbonatlaşma derinliği açısından da benzer şekilde bulunmuştu. Beklendiği gibi TÇ ve PZÇ'li KYB özelliğinde olmayan betonların kılcallık katsayıları diğer betonlarınkinden daha büyük elde edilmiştir. Bu durum da TÇ ve PZÇ'li betonlarda su/çimento oranının yüksekliğine bağlanabilir.

Kılcallık (cm²/dak.)**Şekil 13.** Üç yıl sonundaki kılcallık katsayıları [27]

6. ÖZEL KYB'LAR

6.1 Kütle Beton

Collepari ve diğerleri [28] KYB'ları kütle betonu olarak kullanmışlardır. Klinker oranı %49 olan cüruflu çimentoya uçucu kül karıştırılarak toplam ince malzeme 425 kg/m³'e çıkarılmıştır (Tablo 5). Ayrıca iki karışımda kollodial silika kullanılmıştır. Kollodial silika ayrışma eğilimini yok etmiştir. Bu kütle betonunun çekirdek kısmı ile dış yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının 20°C'nin altında kalması sağlanmıştır.

Tablo 5. Kütle betonu bileşimleri [28]

	Karışım 1	Karışım 1	Karışım 1
Cüruflu çimento (kg/m ³)	307	300	304
Uçucu kül (kg/m ³)	128	125	12
Kum (kg/m ³)	965	944	964
Çakıl (kg/m ³)	824	806	822
Su (kg/m ³)	178	174	176
Akrilik S. Akışkan. (%)	0,96	1,14	1,31
Koloidal silika (%)	0	1	2
Çökme-yayılma (mm) (30' sonra)	750	660	740
Terleme (%)	0.11	0,09	0,07
Gözlem	Hafif ayrışma	Orta	İyi

6.2 Mimari Beton

İtalya'da bir kilise inşaatında mermer etkisi vermek amacı ile beyaz çimento ve iri, ince ve çok ince kırma mermerden oluşan agrega ile hazırlanan KYB kullanılmıştır [28]. Donatı miktarının yüksek olduğu yapıda çökme-yayılma değerinin 1 saat sonunda 600 mm'nin üzerinde kalması istenmiştir. Tablo 6'da karışımı verilen KYB'un çökme yayılması 1 saatin sonunda bile 650 mm'de kalmıştır.

Tablo 6. Mimari beton bileşimi ve yayılma miktarları [28]

	Karışım
Beyaz Çimento CEM/II B-L 32.5R (kg/m ³)	400
Öğütülmüş kalker (kg/m ³)	100
İri kırma mermer agrega (2-16 mm) (kg/m ³)	875
İnce kırma mermer agrega (0-4 mm) (kg/m ³)	440
Çok ince kırma mermer agrega (0-2 mm) (kg/m ³)	430
Su (kg/m ³)	178
Akrilik S. Akışkan. (%)	9,6
Viskozite artırıcı katkı	0,12
Su	180
Çökme-yayılma (mm) Başlangıç	700
30' sonra	680
60' sonra	650

6.3 Lifli Beton

Tablo 7'de verilen karışımlar ve Tablo 8'de verilen lifler değişik oranlarda kullanılarak en az 600 mm yayılma veren, yayılma şekli düzgün bir daire olan ve ayrışma göstermeyen karışımlarda elde edilen maksimum lif oranları araştırılmıştır [29]. Maksimum lif oranı, lif özelliklerine ve beton bileşimine bağlı olarak değişmiştir. Çimento hamur oranı %39 ve kum oranı %68 olan Karışım 4 diğer karışımlara göre daha yüksek miktarda lif ile karışabilmiştir. Lifin narınlığı ve uzunluğu diğer etkenlerdir; narınlık ve uzunluk arttıkça KYB'na karıştırılabilen lif miktarı azalmıştır. Ayrıca, "lif faktörü" olarak tanımlanan [$v_f \cdot L/D$] (burada v_f lif hacim oranını ve L/D narınlığı göstermektedir) ile çökme yayılmasının değişimi incelenmiş ve bu faktör arttıkça yayılmanın azaldığı belirtilmiştir. 600 mm yayılma sınırı olarak alındığında, agrega içindeki kum oranı 0,68 ve betondaki hamur oranı 0,39 olan karışım (Karışım 4) 0,87 lif faktörüne kadar lif ile karışabilirken kum ve hamur oranları en düşük (0,57/0,36,5) olan betonda lif faktörü en çok 0,56'ya çıkabilmiştir.

Tablo 7. Beton karışımları ve taze beton özellikleri [29]

	Karışım 1	Karışım 2	Karışım 3	Karışım 4
Hamur hacim oranı (%)	36,5	39,0	36,5	39,0
Kum/Toplam agrega (%)	57	57	68	68
Çökme-yayılma (mm)	703	693	730	725
V-hunisi akış (s)	10,5	9,0	10,2	8,0
T ₅₀ (s)	1,9	2,1	2,1	2,6

Tablo 8. Lif özellikleri [29]

Lif tipi	Lif uzunluğu (mm)	Lif narınlığı	Çekme dayanımı [MPa]
45/30	30	45	1000
65/40	40	65	1000
80/30	30	80	2000
80/60	60	80	2000

6.4 Prefabriye Beton

Prefabriye elemanlar üreten bir fabrikada doğrudan üretimde KYB kullanılmıştır [30]. Tablo 9'da bileşimi verilen KYB'un su/çimento oranı ve süperakışkanlaştırıcı oranı değiştirilerek denemeler yapılmış, daha sonra elemanlara ve betonlardan alınan numunelere buhar kuru uygulanarak basınç dayanımları belirlenmiştir. Düzgün beton yüzeyleri elde edilmiştir (Şekil 14).



Şekil 14. Prefabriye üretimde kullanılan kalıp ve eleman yüzey görünümü [30]

Tablo 9. Prefabrik üretimde denenen beton karışımları [30]

	KARIŞIM 1	KARIŞIM 2	KARIŞIM 3	KARIŞIM 4
Çimento (kg)	350			
Uçucu kül (kg)	200			
Doğal kum (kg)	473			
Kırma kum (kg)	484			
İri kırma taş (kg)	667			
Su/çimento oranı	0,40	0,40	0,42	0,44
S. Akışkan. (%)	1,6	1,6	1,4	1,2
Taze betonun durumu	Çok yapışkan	Yapışkan	Yapışkan	Uygun
Çökme-yayıma ($t_{50}/t_{stop}/D_{total}$)	6"/38"/80cm	6"/31"/80cm	8"/37"/74cm	5"/23"/74cm
Basınç Dayanımları (N/mm ²)				
16 saat (Isıl işlem)	46,6	41,1	43,4	39,0
4 günlük	49,8	47,7	46,2	45,6
7 günlük	52,6	54,2	53,3	51,9
28 günlük	67,1	71,4	65,2	57,6

7. SONUÇ

Kendiliğinden yerleşen betonlar taze halde iken içine donatı yerleştirilmiş kalıplara kolayca yerleşebilmekte ve üstün ayrışma direnci göstermektedir. Vibratör gerektirmemesi gürültünün doğuracağı sorunların önüne geçerken aynı zamanda çalışanların sağlığını korumaktadır. Öte yandan bir noktadan dökülerek yerleştirilebilme kolaylığı beton döküm hızını artırmaktadır.

Kendiliğinden yerleşen betonlar sertleşmiş halde su/çimento (veya su/bağlayıcı) oranları düşük olduğundan dayanımları genellikle yüksek olmakta, aynı nedenle ve karışımlarında genellikle bulunan puzolanlar yüzünden geçirimsizlikleri artmakta dolayısı ile dayanıklılıkları yükselmektedir. Hem yüksek dayanım, hem de yüksek dayanıklılıkları nedeniyle KYB'lar yüksek başarılı (performanslı) betonlar olarak tanımlanabilir.

Kaynaklar

- Okamura, H. and Ouchi, M., *J Adv. Conc. Tech.*, vol. 1, pp. 5-15, 2003.
- Semioli, W.J., "Self-Placing Concrete", *Concrete International*, V.23, No.12, 69-72, December 2001.
- Walraven, J., Structural aspects of self compacting concrete, *3rd Int. Symp. on Self-Compacting Concrete*, Ed. by O. Wallevic and I. Nielsson, pp. 15-22, Iceland, August 2003, Reykjavic.
- Sherifi, Y., Structural Performance of Self-consolidating concrete used in reinforced concrete beam, *KSCE, J. Civil Engnr.*, 16(4), 618-626, 2012.
- Nielsson, I., Wallevic, O. H., Rheological evaluation of some empirical test methods-Preliminary results-, *3rd Int. Symp. on Self-Compacting Concrete*, Ed. by O. Wallevic and I. Nielsson, pp. 59-68, Reykjavic, Iceland, August 2003.

6. Ghezal, A. And Khayat, H., "Optimizing Self-Consolidating Concrete With Limestone Filler by Using Statistical Factorial Design Methods, **ACI Materials J.** Vol. 99, No.3, 264-272, May-June 2002.
7. Özkul, M.H., Doğan, Ü. A., Çavdar, Z., Sağlam, A. R., Parlak, N., "Properties of Fresh and Hardened Concretes Prepared by New Generation Superplasticizers" Creating with Concrete, **Proc. Int. Conference**, Dundee, U.K. pp.467-74, 1999.
8. Kawai, T., "Non-Dispersible Underwater Concrete Using Polymers", Marine Concrete, Int. Cong. On Polymers in Concrete, Brighton, England, 6, Sept. 1987.
9. Khayat, K.H. and Yahio, A., "Effect of Welan Gum-High-Range Water Reducer Combinations on Rheology of Cement Grout", **ACI Materials J.**, Vol.94, No.5, 365-372, Sept. Oct. 1997.
10. Rols, S., Ambroise, J. And Pera, J., "Effect of Different Viscosity Agents on the Properties of Self-Leveling Grout", **Cem. Con. Res.**, 29, 261-266, 1999.
11. Lachemi, M., Hossain, K.M.A, Lambros, V., Nkinamubanzi, P.C., Bouzoubaâ, N., "Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the reological properties of cement paste" **Cem. Conc. Res.**, 34, pp. 185-193, 2003.
12. Prakash Nanthagopalan, P, Santhanam, M., An empirical approach for the optimisation of aggregate combinations for self-compacting concrete, **Materials and Structures**, 45, pp. 1167-1179, 2012.
13. Okamura, H., Ouchi, M., "Self-Compacting High Performance Concrete", **Progress in Structural Engineering and Materials**, 1(4), 1998, 378-83.
14. Nagataki, S., Kawai, T., Fujiwara, H., State of the Art Report on SCC in Japan, **6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 4th North American Conference on the Design and Use of SCC**, Ed. By Khyat, K. H., Feys, D., Vol. 2, pp. 3-24, 2010.
15. Doğan, Ü. A., **Yeni Kuşak Süperakışkanlaştırıcıların Harç ve Beton Özelliklerine Etkisi**, Y.Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000.
16. Işık, E., Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Viskozite Artırıcı Katkı Kullanımı, Y. Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
17. Işık, E., Özkul, M.H., Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Viskozite Artırıcı Katkı Kullanımı, **6. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Performanslı Betonlar**, İMO İstanbul Şubesi, 421-436, 16-18 Kasım 2005.
18. Özkul, M. H., Ü. A. Doğan, E. Işık, A. R. Sağlam, N. Parlak, Kendiliğinden Yerleşen Beton: Temel İlkeler ve Özellikler, **T.H.B.B. Dergisi**, Yıl 13, Sayı 74, Sayfa:54-61, 2006.
19. Walraven, J., Self compacting concrete: challenge for designer and researcher. In BE Barragan, a Pacios Alvarez, & P Serna Ros (Eds.), **Hormigon autocompactante (HAC)** (pp. 15-29). Barcelona, Spain: UPC. (TUD), 2008.
20. Ozkul, M.H., Doğan, Ü. A., Çavdar, Z., Sağlam, A. R., Parlak, N., "Effects of Self Compacting Concrete Admixtures on Fresh and Hardened Concrete Properties", **2nd Int. Symp. on Cement and Concrete Technology in the 2000's**, Vol.1, pp.493-502, Sept.6-10, 2000.
21. Demirtaş, M., **Yüksek Akışkanlığa Sahip Betonlarda (Kendiliğinden Yerleşen Betonlar) Bileşimin Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi**, Y.Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001.
22. Cussigh, F., Sonebi, M., De Schutter, G., Project testing of SS-segregation test methods, **3rd Int. Symp. on Self-Compacting Concrete**, Ed. by O. Wallevic and L. Nielsson, pp. 311-22, Reykjavic, Iceland, August 2003.
23. Walraven, J., Self compacting concrete: properties, development and code recommendations, **6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 4th North American Conference on the Design and Use of SCC**, Ed. By Khyat, K. H., Feys, D., Vol. 2, pp. pp. 25-43, 2010.
24. Billberg, P., Form pressure generated by self-compacting concrete, **3rd Int. Symp. on Self-Compacting Concrete**, Ed. by O. Wallavic and L. Nielsson, pp. 271-280, Reykjavic, Iceland, August 2003.
25. Brameshuber, W, Uebachs, S., Investigations on the formwork pressure using self-compacting concrete, **3rd Int. Symp. on Self-Compacting Concrete**, Ed. by O. Wallavic and L. Nielsson, pp. 281-287, Reykjavic, Iceland, August 2003.
26. Leeman, A., Hoffmann, C., Pressure of self-compacting concrete on the formwork, **3rd Int. Symp. on Self-Compacting Concrete**, Ed. by O. Wallavic and L. Nielsson, pp. 288-295, Reykjavic, Iceland, August 2003.
27. Özkul, M. H., Doğan, Ü. A., Kendiliğinden Yerleşen Betonların Geçirimlilik Özellikleri, **5. Ulusal Beton Kongresi**, 111-122, 2003.
28. Collepardi, M., Collepardi, S., Troli, R., Pratical Applications of SCC in European Works, **Proceedings of Special Session in Honor of Prof. Jean Pera, Sustainable Construction Materials and Technologies**, Coventry (U.K.), 11-13 June, pp. 51-58, 2007.
29. Grünwald, S., Walraven, J. C., Rheological measurements on self-compacting fibre reinforced concrete, **3rd Int. Symp. on Self-Compacting Concrete**, Ed. by O. Wallavic and L. Nielsson, pp. 49-58, Reykjavic, Iceland, August 2003.
30. Özkul, M.H., Sağlam, A.R., Parlak, N., Doğan, A., Mutlu, M., and Manzak, O., "The Usage of Self-Compacting Concrete in the Precast Industry", **17th Int. Congress of the Precast Concrete Industry**, BIBM, İstanbul, 2002.