

Kendiliğinden Yerleşen Beton Üretiminde Polikarboksilat Esaslı Süper Akışkanlaştırıcı Katkıların Kullanımı

Burak Felekoğlu¹

Kamile Tosun Felekoğlu²

Özet

Günümüz beton teknolojisinde akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımı işlenebilirlik açısından sağladığı kolaylıklarla ve ekonomik faydalarıyla bir zorunluluk haline gelmiştir. Kendiliğinden Yerleşen Betonun (KYB) kullanımıyla vibrasyon olmaksızın, işçilik kusurlarının azaltılabilmesi, üretimin hızlanması, çalışma koşullarının iyileşmesi gibi pek çok avantaj, üreticiyi KYB kullanımına yöneltmektedir.

Bu çalışmada 2 farklı süper akışkanlaştırıcı katkının (polikarboksilat esaslı) 3 farklı KYB tasarımındaki taze ve sertleşmiş hal performansları deneysel olarak incelenmiştir. Hazırlanan karışımlar üzerinde taze halde; yayılma çapı, 500 mm'ye yayılma süresi ve L kutusu geçiş yeteneği ölçümleri yapılmıştır. Sonrasında alınan örnekler kullanılarak farklı yaşlarda basınç, yarmada çekme ve eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ultrases geçiş hızları da haftalık aralıklarla 28 güne kadar ölçülmüştür. Taze ve sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen sonuçlar ışığında; kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkıların kendiliğinden yerleşebilirliğe ve mekanik özelliklere etkileri tartışılmıştır.

1. Giriş

Ülkemizde Kendiliğinden Yerleşen Betona (KYB) olan talep son yıllarda artış göstermiştir. Kendiliğinden yerleşebilirliğin

getirdiği daha homojen beton üretimi, işçilik kaynaklı sıkıştırma kusurlarının azalması ve üretim hızı artışı gibi avantajların KYB'nin gelecekte kullanım oranını daha da arttıracığı öngörülmektedir [1]. Özellikle yüksek yapılar da, betonarme onarım ve güçlendirme işlerinde önemli miktarlarda KYB kullanımı söz konusudur [2]. Ancak KYB'nin üretimi ve kalite kontrolü aşamalarında geleneksel betona kıyasla daha fazla bilgi birikimi ve tecrübe gerektirmesi bu betonun yaygınlaşmasını güçleştirmektedir. KYB'nin geleneksel betona kıyasla daha akıcı olması nedeniyle sahada uygulanması aşamasında yüksek kalıp basıncı problemine karşı bazı önlemler alınması gerekmektedir. Yüksek tiksotropiye sahip KYB kullanıldığında kalıp basıncı, düşük tiksotropiye sahip KYB'ye kıyasla daha hızlı azalmaktadır. Bu bir avantaj gibi görünse de, yüksek tiksotropi pompalanma güçlüğü ve önceden dökülen betonla kaynaşma problemlerine de yol açabileceği için KYB'de optimum tiksotropi derecesinin sağlanmasında yarar vardır [3-4].

The use of polycarboxylate-based superplasticizers for self-compacting concrete production

The use of plasticizing chemical admixtures has become a necessity in terms of workability and economic benefits in today's concrete technology. Application of Self Compacting Concrete (SCC) without any vibration brings many advantages such as reduced workmanship, accelerated production and improved working conditions which leads manufacturer to use SCC.

The fresh and hardened state performance of 2 different super plasticizers (polycarboxylate based) in 3 different SCC design has been experimentally investigated in this study. The spread-flow diameter, 500 mm spread-flow time, L-box passing ability measurements were performed at fresh state. The compressive, splitting tensile and flexural strength tests were carried out by using the specimens taken after fresh tests. Also the ultrasonic pulse velocities were measured at weekly intervals until 28 days. The role of superplasticizers on providing self-compactability and effects on mechanical properties are discussed according to the fresh and hardened concrete test results.

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir, burak.felegoglu@deu.edu.tr

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir, kamile.tosun@deu.edu.tr

KYB, geleneksel betona göre farklı olan reolojik yapısı nedeniyle sadece dayanım sınıfı ile değil, taze hal özellikleriyle de sınıflandırılmaktadır. KYB'nin sadece çökme-yayılma değeri ile de sınıflandırılması yeterli değildir. Farklı akış hızlarına sahip, değişik yayılma kapasitesinde ve donatılar arasından farklı geçiş yeteneğine sahip KYB'ler üretmek mümkündür. KYB'nin reolojik davranışının sözü edilen bakış açıları ile tespitine yönelik çok sayıda deney yöntemi geliştirilmiş ve bunlardan bazıları standartlaşmıştır. Örneğin; çökme yayılma deneyi- TS EN 12350-8 [5], V hunisi deneyi- TS EN 12350-9 [6], L kutusu deneyi- TS EN 12350-10 [7], elekte ayrışma deneyi- TS EN 12350-11 [8] ve J halkası deneyi- TS EN 12350-12 [9] standartları ile tanımlanmıştır [10]. Bu deneyler temel olarak KYB'nin akış yeteneğini, ayrışma direncini ve donatılar arası geçiş yeteneğini ölçmeye yönelik deneylerdir. KYB'nin taze hal özelliklerine göre sınıflandırılması amacıyla "Beton Üreticileri Birliği Avrupa Federasyonu (EFNARC)" ve "Japon İnşaat Mühendisleri Birliği (JSCE)" tarafından çeşitli şartnameler geliştirilmiştir [11-12]. EFNARC [11], KYB'nin kullanım alanına göre yayılma çapı ile 500 mm çapa yayılma süresi ve/veya V-hunisi akış süresi parametrelerini kullanarak bir gruptandırma yapmıştır (Tablo 1). Bu öneriye göre dökme tarzı yatay yapı elemanlarında daha akıcı, taşıyıcı elemanlarda ve eğimli yapılarda ise daha viskoz KYB kullanımı önerilmektedir. Ayrıca donatılar arası geçiş yeteneği ile ilgili limitler de önerilmiştir. Üretimin sadece saha betonu içermesi durumunda veya kazık temel imalatı durumunda dikkate alınacak limitler tablodan kolaylıkla seçilebilir. Öneriye getirilebilecek en önemli eleştiri, betonarme yapılarda listelenen tüm elemanların bir arada bulunması ve bu nedenle pratikte aynı yapıya farklı KYB dökümünün güçlüğüdür. Ayrıca T500 süresinde alt ve üst sınırların ve V-hunisi akış süresinde de alt sınırın olmayışı ayrışan veya yerleşemeyen betonların da bu sınıflandırma içine girmesine neden olabilir. Böyle bir durumda ayrışma direnci ve geçiş yeteneği ile ilgili limitler belirlenmesi yoluna gidilmiştir [11].

Viskozite	Önerilen uygulama alanı	Ayrışma direnci/ geçiş yeteneği
VS 2 VF 2	rampalar	SF 1 ve 2 için geçiş yeteneği şartı önerin (PA1 veya PA2)
VS 1 ya da 2 VF 1 ya da 2	duvarlar ve kazıklar uzun ve dar kesitler(perde)	SF 3 için ayrışma direnci şartı önerin (SR)
VS 1 VF 1	döşemeler ve plakalar	SF 2 ve 3 için ayrışma direnci şartı önerin (SR)
	SF 1 SF 2 SF 3	
	Çökme-Akış	

Tablo 1. Kullanım alanlarına göre önerilen KYB sınıfları [11, 13].

* Çökme yayılma değeri: SF 1: 550-650mm, SF 2: 660-750mm, SF 3: 760-850mm.

** 500mm çapa yayılma süresi: VS 1: <2s, VS 2: >2s, 2 saniyeden kısa T500 süresi ayrışma riskine yol açabilir. T500 süresi için üst sınır önerilmemiştir. Ancak, yerleşememe problemi karşın üst sınır getirilmesinde yarar vardır.

*** V-hunisi akış süresi: VF 1: <9s, VF 2: 9-25s, 9 saniyeden kısa V-hunisi süresi ayrışma riskine, 25saniyeden uzun V-hunisi süresi tiksotropi kaynaklı yerleşememe problemine yol açabilir.

**** L kutusunda ölçülen geçiş yeteneği oranı: PA1: 2 çubuklu L-kutusunda >0.80, PA2: 3 çubuklu L-kutusunda >0.80. PA1: kalıp ve/veya donatılar arasındaki minimum açıklığın 80-100 mm olduğu taşıyıcı olmayan beton işlerinde, PA2: kalıp ve/veya donatılar arasındaki minimum açıklığın 60-80 mm olduğu betonarme yapılarda önerilir. Daha sık donatılı ve dar kalıp genişliklerinde L-kutusu donatı yoğunluğu artırılmalıdır.

***** Ayrışma direnci: SR<20%: donatı sıklığı az olan yapılarda ve taze betonun 5 metre mesafeden az akacağı düşey uygulamalarda kalıp genişliği 80 mm'den fazla ise, SR<15%: taze betonun 5 metre mesafeden az akacağı düşey uygulamalarda kalıp genişliği 80 mm'den az ise, SR değeri <10%: Kalıp genişliği 80 mm'den az ve akış mesafesi 5 metreden fazla olan sık donatılı uygulamalarda ayrışma riskini azaltmak için önerilir.

Diğer yandan JSCE [12] şartnamesi özellikle donatı sıklığı ve yoğunluğunu dikkate alarak Tablo 2'deki KYB deney limitlerini önermektedir [14]. Göreceli olarak daha eski olan JSCE [12] şartnamesi yayılma çapını 500-700 mm arasında tutmakta ve V-hunisi akış süresi veya 500 mm'ye yayılma süresi için daha uzun süreler izin vermektedir. Sınıflar arasında iç içe geçmeler söz konusu olabilmektedir. EFNARC [11] ise, daha kısa V-hunisi süreleri (0-25 s) ile daha geniş bir yayılma çapı aralığı (550-850 mm) önermiştir. JSCE [12] şartnamesinde önerilen T500 sürelerinin çok uzun olduğu ve yüksek viskoziteli KYB'de yerleşme problemlerine yol açabileceği düşünülmektedir.

Tablo 2. JSCE [12] şartnamesine göre KYB sınıfları

KYB sınıfı	1	2	3
Donatı ile ilgili koşullar			
Donatılar arası açıklık (mm)	35-60	60-200	≥200
Donatı miktarı (kg/m ³)	≥350	100-350	≤100
Taze hal limitleri			
Yayılma çapı (mm)	600-700	600-700	500-650
T500 süresi (s)	5-20	3-15	3-15
V-hunisi akış süresi (s)	9-20	7-13	4-11
U-kutusu doldurma yüksekliği (mm)	≥300	≥300	≥300
İri agrega limitleri			
İri agrega hacminin toplam hacme oranı (m ³ /m ³)	0.28-0.30	0.30-0.33	0.32-0.35

Önceki paragraflarda tartışıldığı üzere KYB şartnameleri henüz gelişme aşamasındadır ve uygulama türüne göre değişen limitler söz konusudur. Diğer yandan KYB tasarımında kullanılan malzeme ve karışım oranları açısından da geleneksel betona göre önemli farklılıklar bulunmaktadır. Ülkeler bazın-

da, değişik uygulama alanlarına yönelik deneyimler, başarılı KYB karışım oranları için bir takım öneriler oluşmasına imkân vermiştir [10]. Gerek azaltılmış agrega hacmi ve arttırılmış hamur fazı hacmi, gerekse düşük su/çimento oranlarının kullanımı gibi değişiklikler, etkili bir süper akışkanlaştırıcıya ihtiyacı gündeme getirmektedir. Geleneksel beton üretiminde sıkça kullanılan linyosülfonat, naftalin formaldehit sülfonat veya melamin formaldehit sülfonat esaslı normal akışkanlaştırıcılar ve süper akışkanlaştırıcılar, KYB üretiminde çoğunlukla yetersiz kalmaktadır. Elektrostatik dispersiyonun yanı sıra sterik dispersiyon özelliğine sahip polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıları diğer katkılara kıyasla daha etkilidir [15]. Bu nedenle polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıları KYB üretiminin vazgeçilmez bir öğesi olmuştur [16]. 1980'lerden sonra beton teknolojisinde kullanılmaya başlanan polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcılar, molekül yapılarının sağladığı esneklik sayesinde farklı kimyasal modifikasyonlarla çeşitlendirilmiştir [17]. Bu katkıların en önemli özelliği sonsuz modifikasyon olanağının bulunmasıdır [18]. Molekül yapılarına müdahale edilerek taze betona karıştırılmalarından hemen sonraki dispersiyon performansları ve kıvam koruma potansiyelleri kontrol edilebilmektedir [19]. Son yıllarda özellikle farklı türdeki çimentolarla uyumlu polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıları geliştirilmiştir [20-21].

Polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcıların molekül yapısı temel olarak karbon ana zincire bağlı dallanmış yan zincirlerden oluşmaktadır. Ana zincirin çimento tanesi üzerine adsorpsiyonundan karboksil grubu yan zincirler sorumlu iken, polioksietilen yan zincirler sterik itki mekanizmasından yani çimento tanelerinin dispersiyonundan sorumludur [22]. Polikarboksilatların kimyasal yapılarının katkı performanslarına etkileri açısından en önemli faktörler: dallanmış yan zincirin uzunluğu, polimerizasyon derecesi ve dallanmış yan zincirlerin veya karboksilik grupların yoğunluğudur. Katkının tasarımıyla ilgili olarak KYB üretiminde farklı hedeflere ulaşmak mümkündür [23].

Bu çalışmada 2 farklı türde polikarboksilat bazlı katkı kullanılarak 3 farklı su/çimento oranında KYB'ler üretilmiştir. KYB'lerin ilk anda ve üretimden 1 saat sonraki reolojik özellikleri çeşitli KYB standartları ile test edilmiş ve mekanik özelliklerinin saptanması için örnekler alınmıştır. KYB'lerin basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları çeşitli yaşlarda belirlenmiş, ayrıca ultrases geçiş hızları da haftalık aralıklarla 28 güne kadar ölçülmüştür. Böylece farklı türde polikarboksilat bazlı katkıların KYB performansına etkileri kıyaslanmıştır.

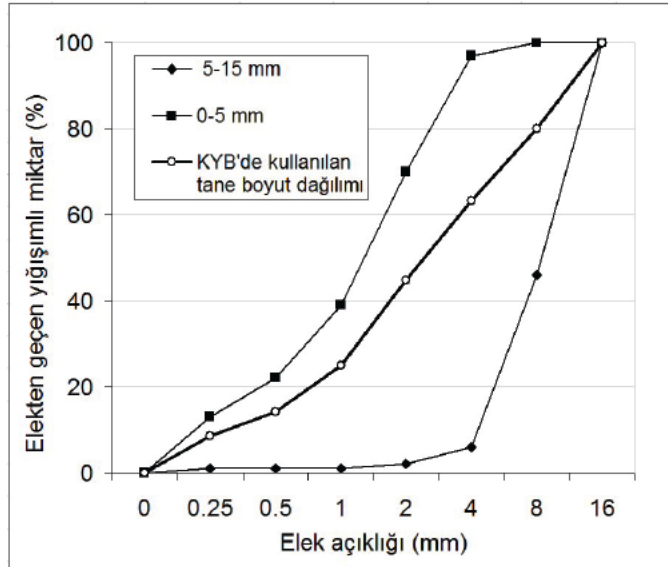
2. Deneyisel çalışmalar

2.1. Kullanılan malzemeler ve karışım oranları

Yapılan tüm deneylerde CEMI 42.5R tipi Portland çimentosu ve KYB'de viskozite arttırmak amacıyla öğütülmüş kalker tozu kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 3'de verilmiştir. İnert bir malzeme olan kalker tozunun özgül ağırlığı 2.58, 63 mikron elekten geçen oranı %96 ve Blaine değeri 443 m²/kg'dır. En büyük tane boyutu 15 mm olacak şekilde kireçtaşı kökenli iki farklı gradasyonda agrega (5-15 ve 0-5) kullanılmıştır. Tüm KYB'lerde iri agrega/ince agrega oranı 0.6 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Karışımın tane boyut dağılımı Şekil 1'de verilmiştir. İri agrega oranı önemli derecede azaltılmış, böylece sık donatılı kalıplardan geçiş yeteneği arttırılmıştır. 5-15 mm ve 0-5 mm agregaların kuru yüzey doygun (KYD) özgül ağırlık ve su emme değerleri sırasıyla 2.71 ile %0.39 ve 2.59 ile %1.21'dir.

Tablo 3. CEMI 42.5R tipi çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal Analiz (%)		Basınç Dayanımı		
CaO	63.7	2 günlük	25.4	MPa
SiO ₂	19.68	7 günlük	41.1	MPa
Al ₂ O ₃	5.75	28 günlük	50.6	MPa
Fe ₂ O ₃	3.00	Diğer Fiziksel Özellikler		
MgO	0.90	Kıvam Suyu	28.8	%
Na ₂ O	0.20	Priz Başlangıç Süresi	135	dk.
K ₂ O	0.83	Priz Bitiş Süresi	245	dk.
SO ₃	2.78	Hacim Sabitliği	2.5	mm
Cl	0.01	Blaine	340	m ² /kg
Kızdırma kaybı	2.84	Özgül Ağırlık	3.14	
Serbest CaO	1.55			
Çözünmeyen kalıntı	0.70			



Şekil 1. KYB üretiminde kullanılan agrega tane boyut dağılımı

KYB üretiminde kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkıları A ve H harfleriyle kodlanmıştır. Katkıların üreticiler tarafından beyan edilen fiziksel özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. Katkıların kimyasal yapıları ticari sır kapsamında olup, beyan edilmemiştir.

Tablo 4. KYB üretiminde kullanılan süper akışkanlaştırıcıların fiziksel özellikleri

	A	H	İlgili standart
Polimer yapısı	Modifiye polikarboksilat	Modifiye polikarboksilat	---
Renk	Sarımsı-açık kahve	Koyu kahve	---
Yoğunluk (20°C)	1.065±0.02 g/cm ³	1.110±0.03 g/cm ³	TS 781 ISO 758 [24]
pH (20°C)	4.0±1.5	6.5±1.5	TS 6365 EN 1262 [25]

KYB tasarımlarında toz tipi metodu kullanılmıştır. KYB'nin hamur fazının viskozitesini arttırmak için 157-177 kg/m³ arasında taş tozu kullanılmıştır. S/Ç oranı döküm sırasına göre 0.49, 0.43 ve 0.62 olan üç seri hazırlanmıştır (Tablo 5). Daha önce de belirtildiği gibi tüm serilerde iri agrega/ince agrega oranı sabittir (0.60). Karışımlarda öncelikli kendiliğinden yerleşebilirlik kriteri; 700 mm ve üzeri başlangıç yayılma çapının sağlanmasıdır. Sözü edilen akıcılığı sağlamak için A ve H süper akışkanlaştırıcı katkıları aynı miktarda kullanılmıştır. Yayılma çapı kriterinin sağlanamadığı durumda katkı dozajı artırılarak, yayılma çapı 700 mm'nin üzerine çıkarılmıştır. Sa-

dece S/Ç oranı 0.43 olan karışımda H katkısı yüksek dozajda kullanılmıştır. Çünkü, H katkısının A katkısı ile elde edilen yayılma çapına yakın yayılma çapı değerini sağladığı kullanım dozajında, hızlı işlenebilirlik kaybına yol açtığı gözlenmiştir. Her seride kullanılan katkı dozajları toplam toz malzemenin (çimento+taş tozu) %'si cinsinden Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Farklı S/Ç oranları ile hazırlanan KYB bileşenleri

	I.seri		II.seri		III.seri	
	IA	IH	IIA	IIH	IIIA	IIIH
Malzeme Cinsi (kg/m³)	S/Ç=0.49		S/Ç=0.43		S/Ç=0.62	
Çimento	363		356		358	
Taş tozu	164		177		157	
Su	177		152		221	
5-15 kırma taş	615		629		577	
0-5 kırma ince agrega	1010		1041		955	
Teorik BHA kg/m³	2329		2355		2268	
Katkı türü ve dozajı (%)						
A	1.52	-	2.80	-	0.82	-
H	-	1.52	-	4.20	-	1.00

2.2. Taze ve sertleşmiş beton deneyleri

Her seriden 65 dm³lük harmanlar 100 dm³ efektif karıştırma hacmine sahip bir betoniyer yardımıyla laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Deneyler süresince laboratuvar sıcaklığı 18-24°C aralığında ölçülmüştür. Agregalar, çimento ve taştuzu 2 dakika kuru karıştırıldıktan sonra, süper akışkanlaştırıcı katkının yarısının ilave edildiği karışım suyu miksera dökülmüştür. 2 dakikalık karıştırma süresinin ardından, kalan süper akışkanlaştırıcı katkı ilave edilmiş ve karıştırmaya 1 dakika daha devam edilmiştir. Yayılma çapı kriteri sağlanıncaya kadar katkı ilavesine devam edilmiştir. Yayılma çapı ve 500 mm çapa yayılma süresi ölçümleri ile eşzamanlı olarak L-kutusu geçiş yeteneği ölçümü yapılmıştır. 3 donatılı bir L-kutusu kullanılmıştır [11]. Donatıların olduğu başlangıç bölgesindeki yükseklik, taze betonun donatıların arasından geçerek akıp en uca ulaştığı bölgedeki yüksekliğe bölünerek geçiş yeteneği yüzdesi hesaplanmıştır (Şekil 2). Taze beton deneyleri tamamlandıktan sonra basınç, yarmada çekme ve eğilme deneyleri için 15*15*15 küp, 10 cm çaplı 20 cm yüksekliğinde silindir ve 10*10*60 cm ayrıtlı prizmatik kalıplara KYB herhangi bir sıkıştırma enerjisi uygulanmadan doldurulmuştur.



Şekil 2. Çökme-yayılma ve L kutusu deneyleri

Küp, silindir ve prizma formunda örnekler kullanılarak KYB karışımlarının sırasıyla basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları farklı yaşlarda test edilmiştir. Basınç dayanımı 3. , 7. , 28. günde, yarmada çekme ve eğilme dayanımları ise 7. ve 28. günlerde test edilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi 300 ton kapasiteli ELE Autotest 3000 presi kullanılarak 680 kgf/s yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Silindir örneklerin yarmada çekme deneyleri aynı preste 94 kgf/s yükleme hızıyla yapılmıştır. Prizmatik örneklerin eğilme dayanımları 45 cm açıklıkla 3 noktalı yükleme yapılarak 20 kgf/s hızıyla gerçekleştirilmiştir. Silindir formundaki örneklerden 28 günde kırılacak olanlar üzerinde haftalık aralıklarla ultrases geçiş hızı (USGH) ölçümleri yapılmıştır. Bu amaçla Proceq Pundit Lab+ cihazı kullanılmıştır (Şekil 3). Örnekler kür havuzundan çıkartılıp 1-2 saat laboratuvar ortamında bekletildikten sonra ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Silindir örneklerde ultrases hızı ölçümü

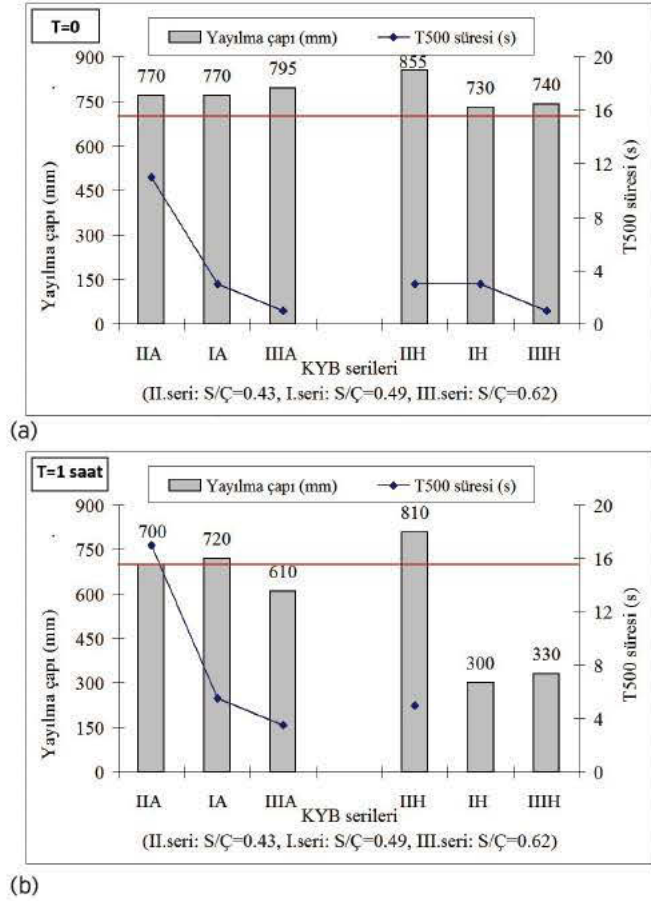
2.3. Deney sonuçları ve değerlendirme

Taze beton deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Tüm seriler için beton üretiminden hemen sonra (T=0 anında) yapılan nihai yayılma çapı ve 500 mm'ye yayılma süresi ölçümleri Şekil 4a'da sunulmuştur. Bir miktar taze beton ayrılıp 1 saatlik bekleme sonrasında yapılan ölçüm sonuçları da Şekil 4b'de

görülmektedir (T= 1 saat). Grafiklerde sütun değerleri yayılma çapını, noktalar ise T500 sürelerini göstermektedir. T=0 anında tüm serilerde 700 mm hedef yayılma çapının üzerine çıkmıştır (Şekil 4, kırmızı çizgiler). Genel olarak aynı yayılma çapı için gerekli süper akışkanlaştırıcı katkı ihtiyacının A katkısında daha düşük olduğu söylenebilir. Örneğin I.seri dökümlerinde hem A katkısı hem de H katkısı %1.52 kullanıldığında yayılma çapları A katkılı KYB'lerde ortalama 40 mm daha fazla olmuştur. A katkılı ve S/Ç oranı 0.49 olan I.seri deneylerinde başlangıç yayılma çapı 1 saat sonunda 770 mm'den 720 mm'ye gerilemiştir. KYB özelliği 1 saat sonunda da büyük ölçüde korunmaktadır (Şekil 4'de, IA serisinde; sadece %6.5 kıvam kaybı). Aynı S/Ç oranı ile üretilen H katkılı KYB'nin yayılma çapı ise 1 saat sonunda 730 mm'den 300 mm'ye düşmüştür. Bu önemli düşüş H katkısının kullanıldığı dozajda (A katkısı ile aynı: %1.52) ilk andaki kendiliğinden yerleşebilirliğini koruyamadığını göstermektedir (Şekil 4'de, IH serisinde; %59 kıvam kaybı).

II. seri dökümlerinde I.seriye göre S/Ç oranı azaltılmıştır (0.43), dolayısıyla başlangıç yayılma çapı için gerekli katkı ihtiyacı artmıştır. A katkısı %2.80 oranında kullanılarak 770 mm başlangıç yayılma çapı değeri elde edilmiş ve 1 saatlik bekleme süresi sonunda yayılma çapı 700 mm'de kalmıştır. Kendiliğinden yerleşebilirliğini koruduğu gözlenen IIA kodlu KYB'de kıvam kaybı kabul edilebilir mertebededir (Şekil 4'de, IIA serisinde; %9 kıvam kaybı). S/Ç oranı 0.43 olan ve H katkısı kullanılarak hazırlanan KYB'de A katkısı ile aynı miktarda süper akışkanlaştırıcı katkı kullanıldığında benzer şekilde kıvam kaybı gözlenmiştir. 1 saat sonunda yayılma çapı 300 mm'ye düştüğü için bu seriden numune alınmamıştır. Bu nedenle, sözü edilen kıvam kaybının, katkı dozajını aşırı artırarak önlenip önlenemeyeceğinin tespiti amacıyla H katkısı dozajı %4.20'ye çıkarılarak döküm tekrarlanmıştır. Başlangıç yayılma çapı da 855 mm olarak ölçülmüştür. Üretilen beton son derece düşük viskoziteli ve ayrışma potansiyeli olan bir KYB'dir. Ancak 1 saatlik bekleme süresi sonunda 810 mm yayılma çapı vermiş ve aşırı katkı kullanımının kıvam kaybını %5 mertebesinde tuttuğu gözlenmiştir (Şekil 4, IIH serisi).



(b)

Şekil 4. KYB serilerinde yayılma çapı ve T500 değerleri

a) T=0 anında, b) T=1 saat sonra

III. seri dökümlerde en yüksek S/Ç oranına çıkılmış (%0.62) ve başlangıç yayılma çapı hedefi için gerekli katkı dozajları azalmıştır. Başlangıç yayılma çapları kıyaslandığında, H katkısı A katkısından %0.18 daha fazla kullanılmasına rağmen A katkılı KYB'lere kıyasla ortalama 55 mm daha düşük yayılma çapı elde edildiği görülmektedir. En az katkı kullanılan III. seri dökümlerinde kıvam kayıpları A ve H katkılı KYB'ler için sırasıyla %23 ve %55'dir. A katkılı KYB'ler 1 saat sonunda halen kendiliğinden yerleşebilirliğini korurken (610 mm yayılma çapı), H katkılı KYB'lerin bu özelliğini koruyamadığı gözlenmiştir (Şekil 4'de, IIIA ve IIHH serileri).

Genel olarak başlangıçta hedeflenen yayılma çapını sağlayacak katkı dozajı ihtiyacı ve kendiliğinden yerleşebilirliği koruma açısından A katkısı, incelenen KYB tasarımları için daha avantajlı bulunmuştur. Katkı ihtiyacı ve kıvam kaybı farklılığının katkıların molekül yapısındaki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak katkıların kimyasal yapıları ticari sır kapsamında olup elde edilen bulgulara yönelik kesin bir

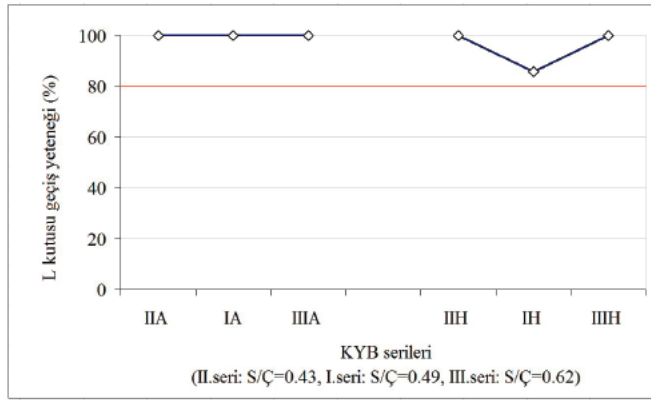
açıklama getirilememektedir. Polikarboksilat esaslı katkıların molekül ağırlığı, ana zincir/yan zincir oranı ve yan zincir yoğunluğu, ana zincir-yan zincir arası bağın alkali direnci vb. pek çok parametre kıvam koruma performansını etkilemektedir [18, 23, 26-28]. Hanehara ve Yamada [29], polikarboksilat moleküllerinin ana zinciri ne kadar kısa ve yan zincirleri ne kadar uzun ve fazla sayıda ise katkının, akışkanlığı artırma ve kıvam koruma özelliğinin o kadar fazla olacağını iddia etmektedir. Ayrıca kıvam kaybı ortam koşullarına ve malzeme özelliklerine (özellikle çimento inceliği, SO_3/C_3A oranı, alkalinite vb.) bağlı olduğundan elde edilen sonuçların kullanılan malzemelerle sınırlı olduğu belirtilmelidir [19, 22, 30-31].

Taze betonun akış özellikleri, Bingham modeline uyduğu varsayımıyla eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite gibi 2 parametre ile tanımlanmaktadır [32]. Bu parametreler beton reometreleri ile ölçülebildiği gibi daha basit ve dolaylı ölçüm yöntemleri ile de kabaca ilişkilendirilebilir. Geleneksel beton da çökme değerinin artışı ile eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite paralel bir şekilde azaldığı için sadece çökme değerini ölçmek yeterli olmaktadır [33]. Ancak KYB için her iki parametre paralel değişmediği için ayrı ayrı belirlenmelidir. Eşik kayma gerilmesi nihai yayılma çapıyla, plastik viskozite ise 500 mm yayılma çapına ulaşma süresiyle (T500) veya V-hunisi akış süresiyle ölçülebilir. Özetle KYB'nin taze halde karakterizasyonu için yayılma çapı ile birlikte T500 süresi de belirlenmelidir.

Şekil 4a ve 4b'de sırasıyla başlangıçtaki ve 1 saat gecikmeli T500 süreleri görülmektedir. S/Ç oranı artırılıp, katkı dozajı azaltılarak yayılma çapı hemen hemen sabit tutulan (770-795 mm) A katkılı KYB'lerde başlangıçta ölçülen T500 sürelerinin 10 saniyeden 1 saniyeye düştüğü görülmektedir. Bu durum, sabit eşik kayma gerilmesine sahip ancak farklı viskozitelerde KYB'lerin üretilebileceğini ispatlamaktadır. Taze betonun hızı arttıkça plastik viskozitesinin azaldığı ancak eşik kayma gerilmesinin sabit kaldığı söylenebilir. Benzer durum 1 saat sonraki T500 süresi ölçümlerinde de elde edilmiştir (Şekil 4b). Ancak T500 süreleri kıvam kaybı nedeniyle paralel olarak bir miktar yükselmiştir. Bununla birlikte, A katkısı kullanılarak farklı akış hızlarına sahip ve bu özelliğini büyük ölçüde koruyan KYB'lerin üretilebileceği tespit edilmiştir.

H katkılı KYB'lerde ilk anda ölçülen T500 süreleri 1-3 saniye arasında değişmektedir. S/Ç oranı en düşük olan KYB'de (0.43) yüksek oranda H katkısı (%4.20) kullanıldığı için T500 süreleri oldukça düşüktür. Benzer yayılma çapı hedeflenip daha az katkı kullanılması durumunda, A katkılı serilere benzer şekilde daha uzun T500 sürelerinin elde edileceği tahmin edilebilir. 1 saat sonraki T500 süresi ise sadece yüksek oranda H katkısı kullanıldığı durumda 5 saniye olarak ölçülebilmektedir. Çünkü diğer KYB'lerde 1 saat sonunda yayılma çapı 500 mm'nin altına düşmüştür.

A ve H katkılı serilerde, hesaplanan 3 donatılı L kutusu donatılar arasından geçiş yeteneği yüzdeleri Şekil 5'de sunulmuştur. Tüm karışımlar ilk anda %80'nin üzerinde geçiş yeteneğine sahip olup EFNARC [11]'e göre PA2 sınıfını sağlamıştır. Ancak L kutusu hazneleri arasındaki kapak kaldırıldığında yatay hazne boyunca akış hızları arasında farklılıklar tespit edilmiştir. Gözlemsel olarak bu farklılıkların T500 süresi ile paralel olduğu söylenebilir. Yeteri kadar beklendiğinde IH serisi ($S/\bar{C}=0.49$ ve %1.52 H katkısı kullanılarak üretilen KYB) dışında tüm karışımlar L-kutusu haznesinde tamamen yüzeylenmiştir. IH serisi KYB'de de geçiş yeteneği oranı %80'in üzerindedir.



Şekil 5. KYB serilerinin geçiş yeteneği yüzdeleri

Tablo 1'de verilen EFNARC [11] önerileri dikkate alınarak üretilen betonların sınıflandırılması Tablo 6'da yapılmıştır. Yayılma çapı (SF), T500 süresi (VS) ve L kutusunda ölçülen geçiş yeteneği oranı (PA) limitleri dikkate alındığında, A katkılı betonların büyük ölçüde önerilen KYB sınıflarına uygun olduğu ve bu özelliğini 1 saat boyunca koruduğu söylenebilir. Ancak H katkılı serilerde uygun katkı dozajı kullanımında ilk anda KYB sınıflarına giren KYB'lerin bu özelliklerini koruyamadıkları görülmektedir.

Tablo 6. EFNARC [11] önerileri dikkate alınarak üretilen betonların sınıflandırılması

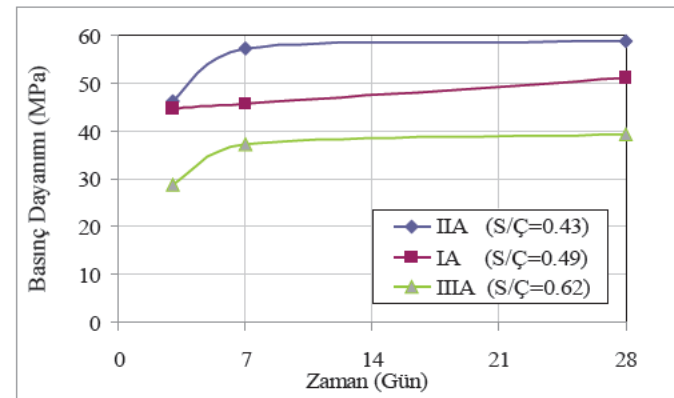
EFNARC [11] sınıfları	I.seri		II.seri		III.seri	
	IA	IH	IIA	IIH	IIIA	IIHH
$S/\bar{C}$ oranı	$S/\bar{C}=0.49$		$S/\bar{C}=0.43$		$S/\bar{C}=0.62$	
Katkı dozajı %	1.52	1.52	2.80	4.20	0.82	1.00
Yayılma çapı sınıfı (T=0)	SF3	SF2	SF3	X	SF3	SF2
Yayılma çapı sınıfı (T=1 saat)	SF2	X	SF2	SF3	SF1	X
T500 süresi sınıfı (T=0)	VS2	VS2	VS2	VS2	VS1	VS1
T500 süresi sınıfı (T=1 saat)	VS2	X	VS2	VS2	VS2	X
Geçiş yeteneği sınıfı (T=0)	PA2	PA2	PA2	PA2	PA2	PA2

* EFNARC [11]'in önerdiği sınırlar dışında kalan değerler "X" ile gösterilmiştir.

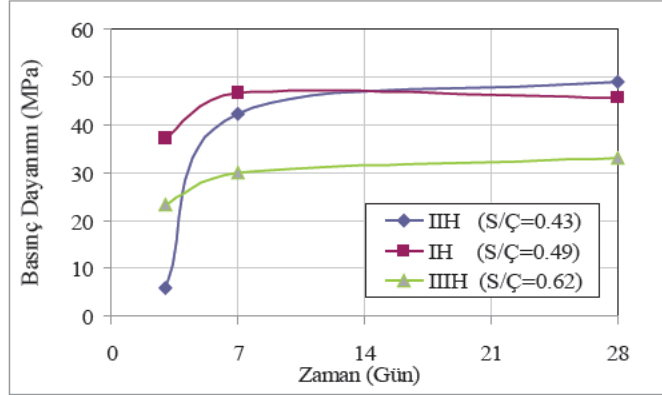
Sertleşmiş beton deney sonuçlarının değerlendirilmesi

KYB serilerinden alınan örneklerin basınç dayanımı gelişimleri Şekil 6'da görülmektedir. Tüm serilerde basınç dayanımı zamanla artmaktadır. Ancak 7. günden sonra dayanım gelişimi ihmal edilebilecek mertebelerdedir. Bu durumun KYB tasarımlarında inert bir filler malzeme ile viskozitenin artırılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 28. gündeki basınç dayanımı değerleri kıyaslandığında $S/\bar{C}$ oranı düşük olan serilerin basınç dayanımı değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

A ve H katkılarının kullanıldığı serilerin basınç dayanımı gelişimleri kıyaslandığında, A katkısının çoğunlukla daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6a ve 6b). Kıvam koruma özelliği daha iyi olan A katkılı KYB'lerin sıkışma derecelerinin de H katkılı KYB'lere kıyasla daha iyi olduğu söylenebilir. Yerleştirme anında betona vibrasyon uygulanmadığı için yerleşebilme derecesi taze beton reolojisi ile direkt ilişkilidir. Taze beton birim hacim ağırlık değerleri de çoğunlukla bu durumu destekler niteliktedir. Ancak IIH serisinde bir istisna söz konusudur. Başlangıç yayılma çapı oldukça yüksek olan IIH serisinden hazırlanan örneklerin 3 günlük basınç dayanımlarının (~5 MPa) IIA serisinden hazırlanan örneklerle kıyasla (~46 MPa) çok daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum kıvam koruma amacıyla kullanılan aşırı dozda H katkısının priz süresini aşırı geciktirdiğinin ve dayanım kazanma hızını yavaşlattığının bir ispatıdır. Daha sonraki yaşlarda dayanım gelişimi hızlanmış ancak hiçbir yaşta IIA serisine yetişememiştir. 7. ve 28. günde yaklaşık 10 MPa'lık basınç dayanımı farkının korunmasının nedeni aşırı dozda H katkısının taze betonda ayrışmaya yol açmış olmasıdır. A katkılı seride ise böyle bir problem olmadığı için basınç dayanımı değeri 60 MPa seviyesine yaklaşmıştır. A katkısı kullanılarak C30/37, C40/50 ve C45/55 dayanım sınıflarında ve kendiliğinde yerleşebilirliğini 1 saat koruyan KYB üretmenin mümkün olduğu belirlenmiştir.

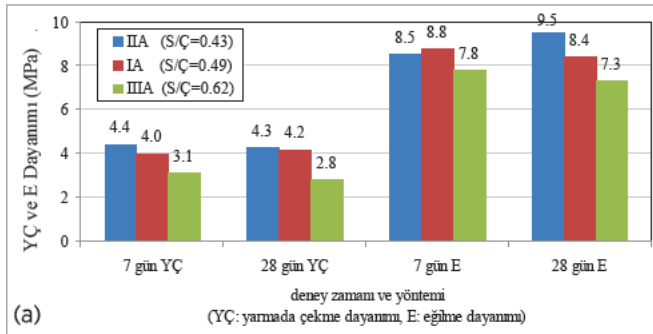


(a)

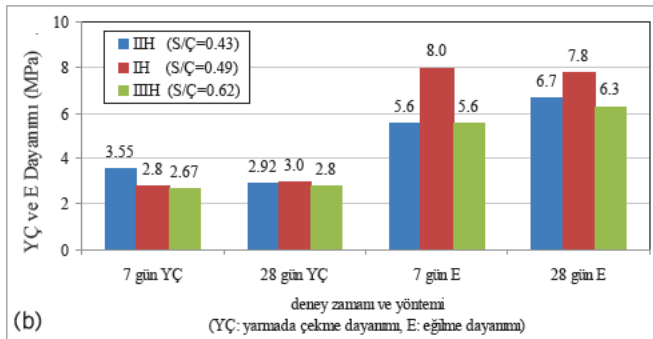


(b)

Şekil 6. KYB'lerin basınç dayanımı gelişimleri; a) A katkılı, b) H katkılı 7 ve 28 günlük yarmada çekme ve eğilme dayanımları Şekil 7'de sunulmuştur. A katkılı KYB'lerde bazı istisnalar dışında çoğunlukla S/Ç oranı arttıkça eğilme ve basınç dayanımları azalmaktadır (Şekil 7a). H katkısı kullanıldığında, özellikle en düşük S/Ç oranındaki (0.43) serilerde 7 ve 28 günlük dayanımlar, S/Ç oranı 0.49 olan KYB'lerden bile daha düşük veya yakın değerlerde çıkmıştır. Aşırı dozda katkı kullanımının beton stabilitesinde meydana getirdiği heterojenlik basınç dayanımını olduğu gibi yarmada çekme ve eğilme dayanımlarını da olumsuz etkilemiştir (Şekil 7b). Yaştan bağımsız olarak A ve H katkılı KYB'lerin tümünde yarmada çekme dayanımı basınç dayanımının %6-9'u ve eğilme dayanımı ise basınç dayanımının %13-21'i arasında değişmektedir.



(a)



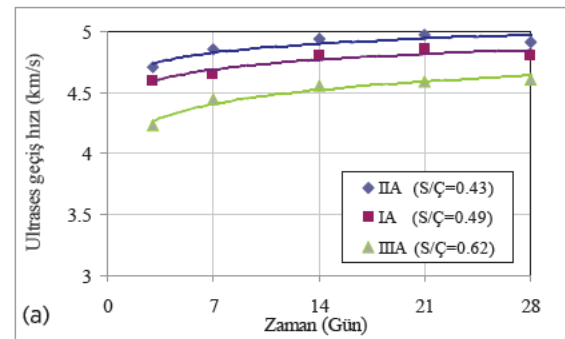
(b)

Şekil 7. KYB'lerin yarmada çekme ve eğilme dayanımları; a) A katkılı, b) H katkılı

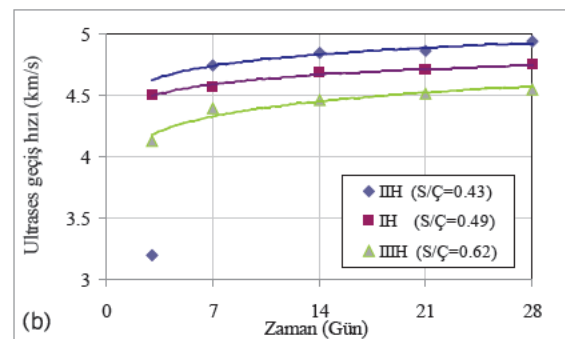
Haftalık aralıklarla yapılan ultrases ölçüm sonuçları Şekil 8'de sunulmuştur. Ultrases geçiş hızları (USGH) zamanla azalan ivmeyle artış göstermektedir. Aynı zamanda S/Ç oranı arttıkça USGH'nin düştüğü gözlenmektedir. Geleneksel betonun 28 günlük USGH değeri 3.7-4.2 km/s arasında değişmektedir [34]. 28 günlük USGH değerleri tüm serilerde 4.5 km/s'nin üzerinde olup, bu yaştaki beton kalitesinin oldukça iyi olduğunu göstermektedir. USGH değerlerini tahmin etmeye yönelik olarak zamana bağlı logaritmik bir fonksiyon kullanılmıştır:

$$USGH = a + b \ln(t)$$

Fonksiyonun ampirik a ve b parametreleri ultrases geçiş hızı birimi "km/s" ve zaman birimi de "gün" olacak şekilde her seri için ayrı ayrı hesaplanmıştır (Tablo 7). Fonksiyonların sürekli değerleri Şekil 8a ve 8b'de renkli çizgilerle gösterilmiştir. Ayrıca fonksiyonların korelasyon katsayıları da Tablo 7'de verilmiştir. R^2 değerleri 0.83 ile 0.98 arasında değişmekte olup, fonksiyonlar büyük ölçüde davranışı temsil etmektedir. İstisnai bir durum olarak 3 günlük değer için fonksiyon H katkılı KYB'de geçerli değildir. H katkılı II. seride aşırı dozda katkı nedeniyle USGH gelişimi anormallik göstermiştir. Bu nedenle logaritmik fonksiyon oluşturulurken IIH serisinin 3 günlük USGH değerleri dikkate alınmamıştır. IIH serisinde fonksiyonlar 7-28 gün arasında, diğer serilerde de 3-28 gün arasında geçerlidir. Fonksiyonlar 0-3 günlük USGH kestiriminde kullanılmamalıdır.



(a)



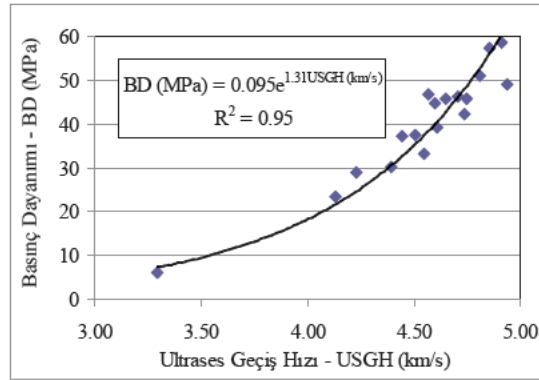
(b)

Şekil 8. KYB'lerin ultrases geçiş hızlarının (USGH) zamana bağlı gelişimi; a) A katkılı, b) H katkılı

Tablo 7. KYB'lerin USGH fonksiyonları için hesaplanan ampirik a ve b parametreleri

Seri	a	B	R ²	Seri	a	b	R ²
IIA (S/Ç=0.43)	4.62	0.1066	0.83	IIH (S/Ç=0.43)	4.48	0.1345	0.97
IA (S/Ç=0.49)	4.46	0.1167	0.88	IH (S/Ç=0.49)	4.37	0.1129	0.98
IIIA (S/Ç=0.62)	4.08	0.1698	0.95	IIIH (S/Ç=0.62)	3.98	0.1773	0.93

Tahribatsız bir deney yöntemi olan USGH ölçümü ile basınç dayanımı gelişimi takip edilebilir. Bu amaçla tüm örneklerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları ile ultrases geçiş hızları Şekil 9'da eşleştirilmiştir. Şekil 9'daki veriler kullanılarak elde edilen üstel fonksiyon 3.3-5.0 km/s aralığındaki USGH değerlerine sahip betonların basınç dayanımlarının tahminine imkan sağlamaktadır. Bu aralığa karşılık gelen basınç dayanımları 8-60 MPa'dır. Böylece çok sayıda örnek dökülmesine ve basınç dayanımı testi yapılmasına gerek kalmadan, KYB'nin dayanımını ultrases ölçümü yaparak tahmin etmek mümkün olabilir.



Şekil 9. KYB'lerin ultrases geçiş hızları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki

3. Sonuçlar

Bu çalışmada 2 farklı türde polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı (A ve H) kullanılarak, 3 farklı (S/Ç=0.43, 0.49 ve 0.62) KYB üretimi amaçlanmıştır. Taze ve sertleşmiş beton deney bulguları kullanılarak elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

1. A ve H katkıları çeşitli dozajlarda kullanılarak ilk anda kendiliğinden yerleşebilir özellikteki KYB'ler üretilmiştir. EFNARC [11] sınıflandırmasına göre farklı uygulamalara yönelik KYB'ler elde edilmiştir.
2. Zamana bağlı olarak KYB'lerin yayılma çapı azalmakta ve T500 süreleri ise artmaktadır. Katkı türüne bağlı olarak bu özellik değişkenlik göstermektedir. A katkısı kullanılan betonlar 1 saat sonunda kendiliğinden yerleşebilirliğini büyük ölçüde korumakta, benzer dozajda kullanılan H katkısı 1 saat sonunda kendiliğinden yerleşebilirliğini kaybetmektedir. H katkısı kıvam koruma için yüksek oranda kullanıldığında ise taze ve sertleşmiş betonda stabilite kaybı ve düşük dayanım gibi sorunlar gözlenmiştir.

3. Üretilen KYB'ler S/Ç oranına ve süper akışkanlaştırıcı katkı dozajına göre değişen akış hızlarına sahiptir. S/Ç oranı veya katkı dozajı arttıkça T500 süresi kısaltmakta, diğer bir deyişle akış hızı artmaktadır. A katkısı kullanılarak üretilen KYB'lerin ilk anda yayılma süreleri 1 ile 10 s arasında, 1 saat sonunda 3.5 ile 17 s arasında değişmektedir.

4. Tüm KYB'lerde basınç dayanım değerleri zaman geçtikçe artmaktadır. Ancak 7 günden sonra dayanım artışları çok küçük seviyelerdedir. Dayanım gelişiminin yavaşlaması pozolanik bir katkı kullanılmamasına bağlanabilir.

5. A katkısı kullanılarak C30/37, C40/50 ve C45/55 dayanım sınıflarında ve kendiliğinden yerleşebilirliğini 1 saat koruyan KYB üretiminin mümkün olduğu belirlenmiştir. H katkısının aşırı miktarda kullanılması durumunda (HII) hem erken dayanım (3 günlük) hem de 28 günlük dayanımları olumsuz etkilenmektedir.

6. Yarmada çekme ve eğilme dayanımlarının zamana bağlı olarak artışları düşük mertebelerdedir. Yaştan bağımsız olarak A ve H katkılı KYB'lerin tümünde yarmada çekme dayanımı basınç dayanımının %6-9'u ve eğilme dayanımı ise basınç dayanımının %13-21'i arasında değişmektedir.

7. Tüm örneklerin ultrases geçiş hızları (USGH) zamanla artmıştır. KYB'lerin zamana bağlı ultrases geçiş hızları ampirik logaritmik fonksiyonlar yardımıyla tespit edilebilir. Bu durum boşluk oranının zamanla azaldığının, diğer bir deyişle hidratasyon reaksiyonlarının devam ettiğinin ispatıdır. USGH, KYB'lerin S/Ç oranı arttıkça azalmıştır. Tahribatsız bir deney yöntemi olan USGH verileri kullanılarak KYB'lerin basınç dayanımı tahminine yönelik üstel bir fonksiyon da önerilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde 2013-2014 bahar döneminde yapılan "Farklı Süper Akışkanlaştırıcılar Kullanılarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" konulu lisans bitirme projesinin deneysel sonuçlarından hazırlanmıştır. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesindeki katkılardan dolayı, İnş.Müh. Fatma Yavuz, İnş.Müh. Necip Fazıl Özten, İnş.Müh. Selim Çukacioğlu ve İnş.Müh. Muhammet Fatih Mangır'a teşekkür ederiz. Ayrıca, deneysel amaçlı polikarboksilat katkıların teminindeki desteklerinden dolayı Grace Yapı Kimyasalları Teknik Servis Müdürü Dr.Müh. Ali Raif Sağlam'a ve ultrases ölçümlerindeki yardımlarından dolayı Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nden Arş.Gör. Mehmet V. Özdoğan'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar

1. Walraven, J., "Self-Compacting Concrete in the Netherlands", First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 399-404, 2002.
2. THBB Hazır Beton Dergisi, "Özel Dosya: Kendiliğinden Yerleşen Beton", Sayı:112, 45-69, 2012.
3. Khayat, K.H., Paultre, P., Tremblay, S., "Structural Performance and In Situ Properties of Self-Consolidating Concrete Used for Casting Highly Reinforced Columns", ACI Materials Journal, V. 98, No. 5, 371-378, 2001.
4. Khayat, K.H., and Assaad, J., "Effect of w/cm and High-Range Water-Reducing Admixture on Formwork Pressure and Thixotropy of Self-Consolidating Concrete", ACI Materials Journal, V. 103, No. 3, 186-193, 2006.
5. TS EN 12350-8 Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 8: Kendiliğinden yerleşen beton - Çökme yayılma deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2011.
6. TS EN 12350-9 Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 9: Kendiliğinden yerleşen beton - V hunisi deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2011.
7. TS EN 12350-10 Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 10: Kendiliğinden yerleşen beton - L kutusu deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2011.
8. TS EN 12350-11 Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 11: Kendiliğinden yerleşen beton - Elekte ayrışma deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2011.
9. TS EN 12350-12 Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 12: Kendiliğinden yerleşen beton - J halkası deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2011.
10. Kılınç, C., "Kendiliğinden yerleşen beton", THBB Hazır Beton Dergisi Sayı:112, Temmuz-Ağustos, 70-75, 2012.
11. EFNARC, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use (European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete)", May, 68p, 2005.
12. JSCE, "Guide to construction of high flowing concrete" Gihoudou Pub., Tokyo, 1998.
13. Walraven, J., "Structural applications of self compacting concrete", Proceedings of 3rd RILEM International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, ed. Wallevik O and Nielsson I, RILEM Publications PRO 33, Bagneux, France, August, pp 15-2, 2003.
14. Su N., Hsu K.-C., Chai H.-W., "A simple mix design of self-compacting concrete", Cement and Concrete Research, V. 31, 1799-1807, 2001.
15. Uchikawa, H., Hanehara, S., Sawaki, D., "The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture", Cement and Concrete Research, V. 27, No. 1, p. 37-50, 1997.
16. Özkul, M.H., "Beton Teknolojisinde bir Devrim: Kendiliğinden Yerleşen-Sıkışan Beton", Hazır Beton Dergisi, Temmuz-Ağustos, 64-71, 2002.
17. Winnefeld, F., Becker, S., Pakusch, J., Gotz, T. "Effects of the molecular architecture of comb-shaped superplasticizers on their performance in cementitious systems" Cement and Concrete Composites, V. 29, 251-262, 2007.
18. Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., Matsuhisa M., "Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer", Cement and Concrete Research, V.30, 197-207, 2000.
19. Yamada, K., Ogawa, S., Takahashi, T., "Improvement of the compability between cement and superplasticizer by optimizing the chemical structure of the polycarboxylate-type superplasticizer", 2nd International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Tokyo, pp.159-168, 2001.
20. Zingg, A., Winnefeld, F., Holzer, L., Pakusch, J., Becker, S., Figi, R., Gauckler, L., "Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different C₃A amounts", Cement and Concrete Composites, V. 31, 153-162, 2009.
21. Qiu, X., Peng, X., Yi, C., Deng, Y., "Effect of Side Chains and Sulfonic Groups on the Performance of Polycarboxylate-Type Superplasticizers in Concentrated Cement Suspensions", Journal of Dispersion Science and Technology, V. 32(2), 203-212, 2011.
22. Hanehara, S., Yamada K., "Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology", Cement and Concrete Research, V. 29, 1159-1165, 1999.
23. Felekoğlu, B., Sarıkahya, H., "Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete", Construction and Building Materials, V. 22 (9), 1972-1980, 2008.
24. TS 781 ISO 758 "Sanayide kullanılan sıvı kimyasal ürünler - 20°C'da yoğunluk tayini". Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1998.
25. TS 6365 EN 1262 "Yüzey aktif maddeler-Çözültülerin veya dispersiyonların pH değerlerinin tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2005.
26. Lim, G.G., Hong, S.S., Kim, D.S., Lee, B.J., Rho, J.S., "Slump loss control of cement paste by adding polycarboxylic type slump-releasing dispersant", Cement and Concrete Research, V. 29, 223-229, 1999.
27. Plank, J., Pöllmann, K., Zouaoui, N., Andres, P.R., Schaefer, C., "Synthesis and performance of methacrylic ester based polycarboxylate superplasticizers possessing hydroxy terminated poly(ethylene glycol) side chains", Cement and Concrete Research, V. 38, 1210-1216, 2008.
28. Plank, J., Sachsenhauser, B., "Experimental determination of the effective anionic charge density of polycarboxylate superplasticizers in cement pore solution", Cement and Concrete Research, V. 39, 1-5, 2009.
29. Hanehara, S., Yamada, K., "Rheology and early age properties of cement systems", Cement and Concrete Research, V. 38(2):175-195, 2008.
30. Mollah, M.Y.A., Adams, W.J., Schennach, R., Cocke, D.L., "A review of cement- superplasticizer interactions and their models", Advances in Cement Research, V. 12, No. 4, Oct., 153-161, 2000.
31. Plank, J., Zhimin, D., Keller, H., Hössle, F., Seidl, W., "Fundamental mechanisms for polycarboxylate intercalation into C₃A hydrate phases and the role of sulfate present in cement", Cement and Concrete Research, V. 40, 45-57, 2010.
32. Ferraris, C.F., "Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report", Journal of the National Institute of Standards and Technology, V.104, 461-478, 1999.
33. Ferraris, C.F., de-Larrard, F. "Testing and Modelling Fresh Concrete Rheology", Building and Fire Research Laboratories, Maryland, NISTIR 6094, 71p, 1998.
34. Naik, T.R., Malhotra, V.M., Popovics, J.S., "The Ultrasonic Pulse Velocity Method", Handbook of Nondestructive Testing of Concrete Eds. V.M. Malhotra, N.J. Carino, Part 8, CRC Press LLC, 19s, 2004.