

# Kendiliğinden yerleşen betonların reolojik özelliklerine bileşim parametrelerinin etkisi

Ali Raif SAĞLAM\*, M. Hulusi ÖZKUL

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

## Özet

*Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkıları ve değişik mineral katkıları kullanılarak geliştirilmiş yeni bir beton türüdür. Bu çalışmada, faktöriyel analiz yöntemi kullanılarak çimento hamuru, harç ve beton bileşenlerinin reolojik özelliklere etkileri araştırılmıştır. Su/bağlayıcı, mineral katkı/bağlayıcı, kimyasal katkı/bağlayıcı ve kum/bağlayıcı oranları değişken olarak seçilmiştir. Reolojik parametreler olarak, çökme-yayılma, viskozite ve kayma eşiği değerleri ölçülmüştür. Uçucu kül ve silis dumanı, normal Portland çimentosu ile yer değiştirerek kullanılmıştır. Faktöriyel analiz sonunda reolojik özellikleri anlamlı olarak etkileyen bileşim parametreleri belirlenmiştir. Süperakışkanlaştırıcı katkılı çimento hamuru ve harç karışımlarının Bingham cismi gibi davranmasına karşılık, beton karışımlarında kayma eşiğinin sifıra yakın değerler aldığı ve bu nedenle yaklaşık olarak Newton cismi gibi davrandığı görülmüştür.*

**Anahtar Kelimeler:** Kendiliğinden yerleşen beton, beton viskozimetresi, işlenebilme, reoloji, süperakışkanlaştırıcı, mineral katkı.

## The effect of composition parameters on the rheological properties for self-compacting concretes

### Abstract

*Self-compacting concrete (SCC) has been developed using new generation superplasticizers and different mineral admixtures, and can be consolidated under its own weight without any vibration. It is suitable for high performance and densely reinforced structures as well as in most applications where traditionally vibrated concrete is used. The aim of this study is to investigate the effects of constituent materials on rheological properties of cement paste, mortar and concrete by application of factorial analysis method. Water/binder, mineral admixture/binder, chemical admixture/binder and sand/binder ratios were chosen as variables in the analysis. Slump-flow, viscosity (relative torque viscosity for concrete) and yield shear (relative yield torque for concrete) were rheological parameters and their variations by time up to 90 minutes were recorded. A fly ash and a silica fume were used as fine materials for partial substitution of the normal Portland cement. By the factorial analysis the composition factors significantly influencing the rheological properties are determined. Test results show that, although the cement paste and mortar prepared with self-compacting superplasticizer, act as Bingham materials, the yield torque for the concrete approaches to zero indicating approximately a Newtonian-material behaviour.*

**Keywords:** Self-compacting concrete, concrete viscosimeter, workability, rheology, superplasticizer, mineral admixture.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ali Raif SAĞLAM. aliraifsaglam@hotmail.com; Tel: (216) 494 19 90 dahili: 292.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Kendiliğinden yerleşen betonun reolojik özelliklerine bileşim parametrelerinin etkisi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 30.12.2003 tarihinde dergiye ulaşmış, 15.03.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.07.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Taze betonun kendiliğinden yerleşebilme özelliği, betonun yoğun donatılı ve dar kesitli elemanlara, homojenliğini koruyarak ve herhangi bir vibrasyon gerektirmeden kendi ağırlığı ile yayılabilmesi olarak tanımlanabilir. Kendiliğinden yerleşen beton, yüksek performanslı beton ve çoğunlukla geleneksel olarak vibrasyonla sıkıştırılan betonların kullanıldığı yoğun donatılı yapılar için uygundur. Kendiliğinden yerleşen beton kavramı 1980'li yılların başında su altı beton uygulamaları için geliştirilmiştir (Okamura, 1997). Kendiliğinden yerleşen beton gerek prefabrikte (hazır) olarak üretilen ve gerekse şantiyede yerinde üretilen ve lif takviyeli betonlarda da kullanılabilir (Skarendahl ve Peterson, 2000). Kendiliğinden yerleşen beton üretiminde kullanılan kimyasal katkılar, öncelikle süperakışkanlaştırıcı ve viskozite düzenleyici katkılar olmak üzere birkaç değişik katkının bileşiminden oluşmaktadır. Süperakışkanlaştırıcı katkılar, yüksek akıcılık sağlanması ve su/bağlayıcı oranının düşürülmesini sağlamak amacı ile kullanılır. Viskozite düzenleyici katkılar ise terleme ve çökme gibi ayrışmaları azaltarak betonun homojenliğinin sağlanması ve kayma eşiğinin düşürülmesi için kullanılır (Bürge, 1999).

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 (Uchikawa vd., 1997; Yoshioka vd., 1997). 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 (Houst vd., 1999). Ayrışmaya karşı yüksek direnç, yerleşebilme ve sıkışabilme özellikleri, viskozite düzenleyici katkı veya ince malzeme ve bazen her ikisinin birlikte kullanımı ile sağlanır. Çimento dahil olmak üzere ince malzeme (90µm den küçük) miktarı ayrışma direncinin artırılması için belirli bir sınırdan yüksek seçilir (Özkul vd., 2000; Özkul vd., 1999). En büyük agrega tane boyutu ve ince/iri agrega oranı kendiliğinden yerleşen betonda diğer önemli parametrelerdir.

Kendiliğinden yerleşen betonların reolojik özelliğinin ölçülmesi için değişik yöntemler geliştirilmiştir:

a) Doldurma Yeteneği: Betonun kendi ağırlığı ile kalıptaki bütün boşluklara akabilme yeteneğidir. Bu özellik çökme-yayıma deney yöntemi ile ölçülebilir.

b) Ayrışmaya direnç: Karıştırma, taşıma ve döküm işlemleri sırasında betonun homojenliğini koruyarak ince taneli askıda madde (süspansiyon) olarak kalabilme yeteneğidir. L şekilli deney aleti (L-shape test) bu özelliği ölçmek için kullanılabilir.

c) Engellerin arasından geçme yeteneği: Betonun, kalıpta sık donatılar vb. dar kesitlerin oluşturduğu engeller arasından, agrega tanelerinin tıkanma yapmaksızın geçebilme yeteneğidir. Bu özellik, V huni, U ve L şekilli deney aletleri (Skarendahl ve Peterson, O, 2000) ve önerilen yeni deney aleti (Özkul vd., 2000; Özkul vd., 1999) kullanılarak ölçülebilir.

d) Viskozite ve kayma eşiği: Bu gibi reolojik özellikler Bingham modeli kullanılarak çimento hamuru, harç ve betonda viskozimetre aleti ile ölçülebilir (Nornberg vd., 1997). Bu yöntemde farklı dönme hızlarında ( $\dot{\gamma}$ ) oluşan kayma dirençleri ( $\tau$ ) dönme momenti ile ölçülmekte ve kayma direnci ile dönme hızı arasında elde edilen doğrusal ilişkiden kayma eşiği ( $\tau_0$ ) ve viskozite ( $\eta$ ) parametreleri hesaplanmaktadır:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

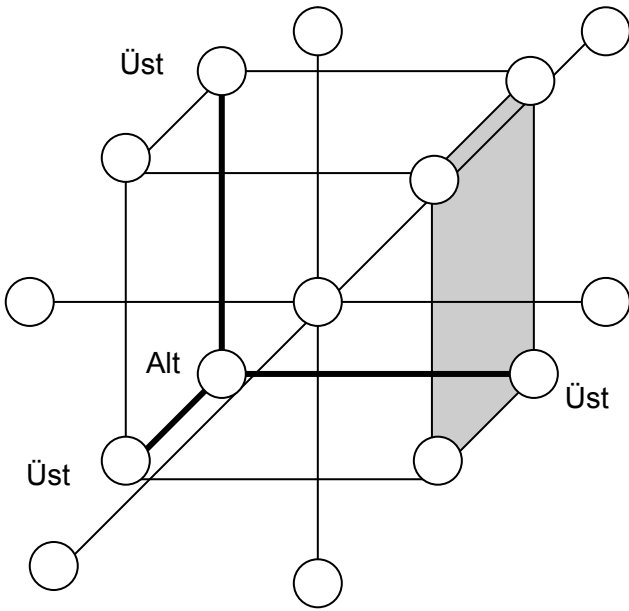
Bu çalışmada, beton için geliştirilen viskozimetre aletinde, farklı dönme hızlarına karşılık gelen dönme momenti dirençleri (T, tork) ölçülmüştür. Dönme momentinin dönme hızı (N) ile değişimi çizilerek elde edilen doğrusal ilişkinin eğimi viskozite ile ilgili bir büyüklüğü (H), bu doğrunun moment eksenini kestiği nokta da kayma eşiği ile ilgili büyüklüğü (G) vermektedir. Bu durumda ilişki şu şekli almaktadır:

$$T = G + H \cdot N \quad (2)$$

## Faktöriyel analiz yöntemi

Bu çalışmanın deneysel kısmında çimento hamuru, harcı ve beton karışımlarının bileşenleri-

nin oranları “merkezi bileşik tasarım yöntemi-ne” göre oluşturulmuştur (Montgomery, 1991). Bu yaklaşımda, her bir değişken için merkez nokta belirlenmekte ve düşük (-1) ve yüksek (+1) seviyeler seçilmektedir. Değişkenlerin iki farklı düzeyde değere sahip olması durumunda, 3 değişkenli tam faktöriyel tasarım için  $2^k = 2^3 = 8$  noktaya ihtiyaç vardır. Her bir değişken için iki uç düzey (+ $\alpha$  veya - $\alpha$ ) belirlenir ve üçüncü değişken uç düzeyde iken (+ $\alpha$  veya - $\alpha$ ) iki değişkenin orta düzeyleri (merkez) alınarak (6 adet nokta) tasarım yapılır. Ayrıca, merkez değerleri 3 kez tekrarlanır; böylece deney sayısı toplamı 17'ye ulaşır. Merkezi bileşik tasarım Şekil 1'de görülebileceği gibi, köşe noktaların her bir değişkenin düşük ve yüksek düzeylerini gösterdiği, uç noktaların ise kübün dışında ve orta noktaların merkezde yer aldığı bir küp ile gösterilebilir. Daha sonra deney sonuçları kullanılarak her bir ölçülen özellik için yüzeyler geçirilerek denklemleri belirlenir (Surface response method). Aynı yöntem Khayat ve arkadaşlarınınca betona başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Khayat vd., 1999).



Şekil 1. Merkezi bileşik tasarım

Bu çalışmada, mineral katkı/bağlayıcı (M/B), kimyasal katkı/bağlayıcı (SP/B), su/bağlayıcı (W/B) ve kum/bağlayıcı (S/B) oranlarının çimento hamuru, harç ve beton özelliklerine etkileri çökme-yayıma deneyleri ve reolojik ölçüm aletleri kullanılarak incelenmiştir.

## Deneysel çalışmalar

### Malzemeler

**Agregalar:** İnce malzeme olarak doğal ve kırma kum ve iri agrega olarak en büyük tane boyutu 14 mm olan kırma kireçtaşı kullanılmıştır. Doğal kum, kırma kum ve kırma kireçtaşının özgül ağırlıkları sırası ile 2.63, 2.66 ve 2.69 kg/dm<sup>3</sup>'tür.

**Çimento:** Tüm deneylerde, PÇ 42.5 sınıfında (CEM I, TS-EN 197-1) normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellik		Nuh PÇ 42.5	
Kimyasal Analiz	C <sub>3</sub> S	(%)	58.77
	C <sub>2</sub> S	(%)	15.12
	C <sub>3</sub> A	(%)	4.72
	C <sub>4</sub> AF	(%)	11.51
Fiziksel Analiz	Özgül Yüzey	m <sup>2</sup> /kg	328.7
	Özgül Ağırlık	gr/cm <sup>3</sup>	3.15
	Priz	İlk	2:11
	(h:min)	Son	4:58

**İnce Malzeme:** Orhaneli Termik Santrali'nden sağlanan uçucu kül (özgül ağırlık :2.45 gr/cm<sup>3</sup> ve Blaine: 413.6 m<sup>2</sup>/kg) ve Etibank Antalya Ferrokrom Tesisi'nde elde edilen silis dumanı (mikro silika) (özgül ağırlık: 2.27 gr/cm<sup>3</sup>) ince malzeme olarak kullanılmıştır.

**Süperakışkanlaştırıcı Katkı:** Polikarboksilat eter bazlı yeni kuşak kimyasal katkı (özgül ağırlık: 1.10 g/cm<sup>3</sup>, 20°C; katı madde: %33.88) kullanılmıştır.

### Deney yöntemleri

Çimento hamurları ve harç karışımları 3 dm<sup>3</sup> kapasiteli harç karıştırıcısında 4.5 dakika karıştırılmıştır. Betonlar 40 dm<sup>3</sup> kapasiteli pan tip bir karıştırıcıda 3 dakika karıştırılarak üretilmiştir.

Çimento hamuru, harç ve betonların reolojik özelliklerinin ölçümünde kullanılan deney yöntemleri aşağıda verilmiştir.

**Kantro mini çökme-yayıma deneyi:** Alt çapı 38.1 mm, üst çapı 19 mm ve yüksekliği 57.2 mm

olan kesik koni kullanılmıştır. Deney sonunda yayılan malzemenin birbirine dik iki doğrultuda çapları ölçülmüş ve bu iki değer ortalaması alınmıştır. Deney zaman içinde yayılma kaybının gözlemlenmesi için 6, 30, 60 ve 90. dakikalarda tekrarlanmıştır.

**Yayılma deneyi:** Harçlarda yayılma deneyi çimento hamurlarında kullanılan yöntem benzer şekilde yapılmıştır. ASTM C 230 da öngörülen koni kullanılmıştır. Deneyler çimento hamurları ile aynı zamanlarda tekrarlanmıştır.

**Çökme-yayılma deneyi:** Betonda yayılma özelliklerinin ölçümünde geleneksel Abrams konisi ters çevrilerek kullanılmıştır. Deneyler çimento hamurları ve harç karışımları ile aynı zamanlarda tekrarlanmıştır.

**İki noktalı deneyler:** Çimento hamurları ve harç karışımlarının reolojik özelliklerinin ölçümünde Metler RM 180 eş-eksenel reometresi kullanılmıştır. Betonlar için ise Tattersal'in viskozimetresine benzer bir alet geliştirilerek kullanılmıştır. Bahsedilen özelliklerin 90 dakikaya kadar olan değişimleri araştırılmıştır.

### Deneyel tasarım

Karışımların bileşimlerini bulmak için merkezi bileşik tasarım yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 2'de, her bir serinin karışım bileşimi verilmiştir. Tablo 2'de, 0 merkez noktayı, -1 ve +1 üst ve alt düzeyleri,  $\pm\alpha$  uç düzeyleri göstermektedir.

Tablo 2'deki son iki karışım (16 ve 17), merkez noktanın tekrarlanabilirliğini görmek için seçilmiştir.

Tablo 3'te görülebileceği gibi mineral katkı/bağlayıcı (M/B), kimyasal katkı/bağlayıcı (SP/B), su/bağlayıcı (W/B) oranları çimento hamuru tasarımlarında değişken olarak alınmıştır. Tablo 4'te gösterildiği gibi harçlarda, (M/B), kum/bağlayıcı (S/B) ve su/bağlayıcı (W/B) oranları değişkendir. Tablo 5'te ise betonlardaki değişkenler olan (S/B), (SP/B) ve (W/B) oranları verilmiştir. Deney sırası rastgele seçilmiştir. Uçucu

kül kullanılarak yapılan beton karışımlarının bileşimleri Tablo 6'da örnek olarak verilmiştir.

Tablo 2. Merkezi bileşik tasarım gösterilimi

Deneme No	Değişken A	Değişken B	Değişken C
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1
9	0	0	$-\alpha$
10	0	0	$+\alpha$
11	0	$-\alpha$	0
12	0	$+\alpha$	0
13	$-\alpha$	0	0
14	$+\alpha$	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0

### Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Çökme-yayılma deneyleri deneysel kısımda verilen çökme konileri kullanılarak çimento hamuru, harç ve beton karışımları için yapılmıştır. Her bir karışım için yayılma çapı ölçülmüş ve yayılma alan oranı aşağıda tanımlandığı gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Yayılma Alan Oranı} = \frac{A - A_0}{A_0} \quad (2)$$

Burada  $A_0$ , koni taban alanı, A ise yayılma sonrası ölçülen alanı göstermektedir. Şekil 2'de çimento hamuru (uçucu küllü), harç ve beton için her bir karışımın zamana bağlı olarak (6, 30, 60, 90 dakika) yayılma alanı oranları ile değişimi sırası ile gösterilmektedir. Silis dumanı eklenen çimento hamuru da kıyaslama açısından Şekil 3'te verilmiştir. Karışım numaraları Tablo 2'de ve genel olarak betonlar için Tablo 6'da verilen karışımlara benzerdir. Şekil 2, yayılma alan oranının öngörüldüğü gibi zamanla azaldığını göstermektedir. Deney noktalarını birleştiren doğruların eğilimi, çimento hamuru ve harç ka-

*Kendiliğinden yerleşen betonun reolojik özellikleri*

rışımlarında benzer fakat betonlarda farklıdır. Yayılma alan oranının harçlarda 6 dakikadan 90 dakikaya değişiminin aynı aralıklar için çimento hamuru ve betonlara göre daha küçük olduğu görülmektedir (Şekil 2).

*Tablo 3. Çimento hamuru için değişkenlerin düzeyleri*

		Alt Uç	Alt	Merkez	Üst	Üst Uç
Uçucu Kül	M / B	0	27.29	36.40	45.51	54.55
	SP / B	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10
	W / B	0.24	0.25	0.26	0.27	0.30
S.Dumanı	M / B	0	4.55	6.82	9.09	11.36
	SP / B	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10
	W / B	0.22	0.25	0.26	0.27	0.30

Şekil 4'te, uçucu kül içeren çimento hamuru, harç ve beton karışımları için yayılma alan oranı ile viskozitenin değişimleri gösterilmiştir

Şekil 4, genel olarak viskozite azaldıkça yayılma alan oranının arttığını göstermektedir. Aynı gösterim Şekil 5'de, uçucu kül yerine silis dumanı içeren beton karışımları için verilmiştir. Tahminen büyük yüzey alanının bir sonucu ola-

rak silis dumanı, uçucu kül göre çimento hamurlarında viskoziteyi artırıcı etki yapmıştır. Harçlar ve betonlarda ise uçucu kül yerine silis dumanı kullanıldığında viskozite değerleri

*Tablo 4. Harçlar için değişkenlerin düzeyleri*

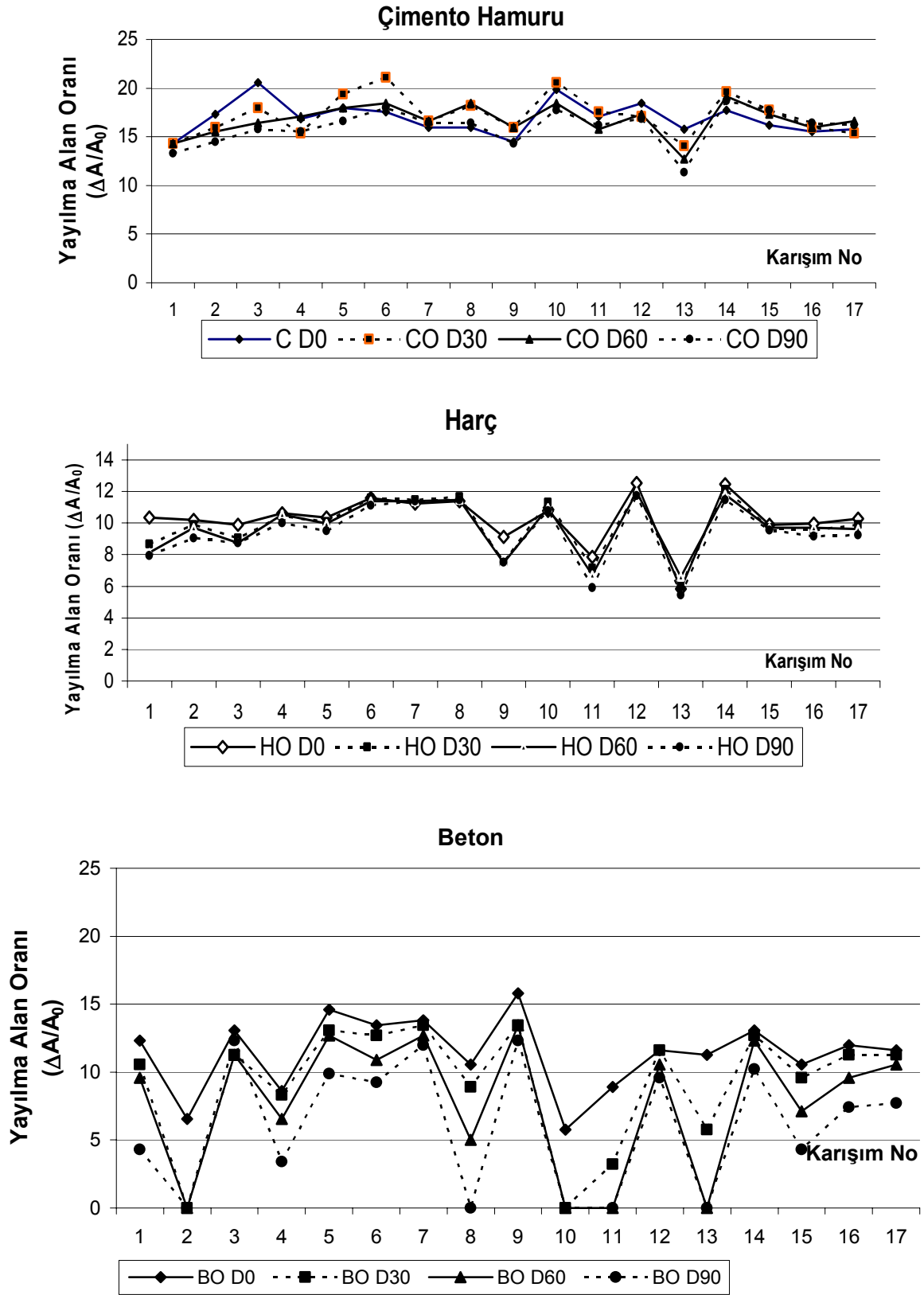
		Alt Uç	Alt	Merkez	Üst	Üst Uç
Uçucu Kül	M / B	0	27.29	36.4	45.51	54.55
	S / B	1.53	1.23	1.13	0.93	0.63
	W / B	0.22	0.25	0.26	0.27	0.30
S.Dumanı	M / B	0	4.55	6.82	9.09	11.36
	S / B	1.53	1.23	1.13	0.93	0.63
	W / B	0.28	0.31	0.32	0.33	0.36

*Tablo 5. Betonlar için değişkenlerin düzeyleri*

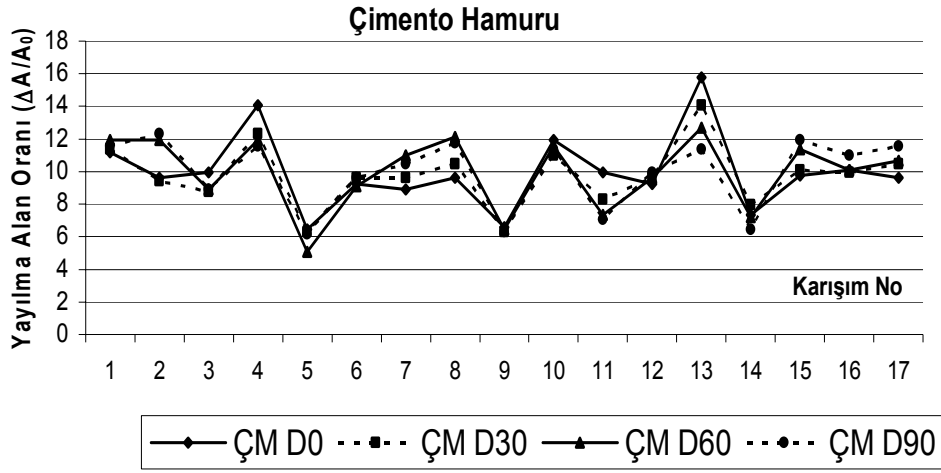
		Alt Uç	Alt	Merkez	Üst	Üst Uç
Uçucu Kül	W / B	0.23	0.245	0.26	0.275	0.30
	SP / B	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10
	S / B	1.32	1.61	1.86	2.11	2.40
S.Dumanı	W / B	0.29	0.305	0.32	0.335	0.35
	SP / B	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30
	S / B	1.32	1.61	1.86	2.11	2.40

*Tablo 6. Faktöriyel tasarımda kullanılan uçucu küllü beton karışımlarının bileşim oranları*

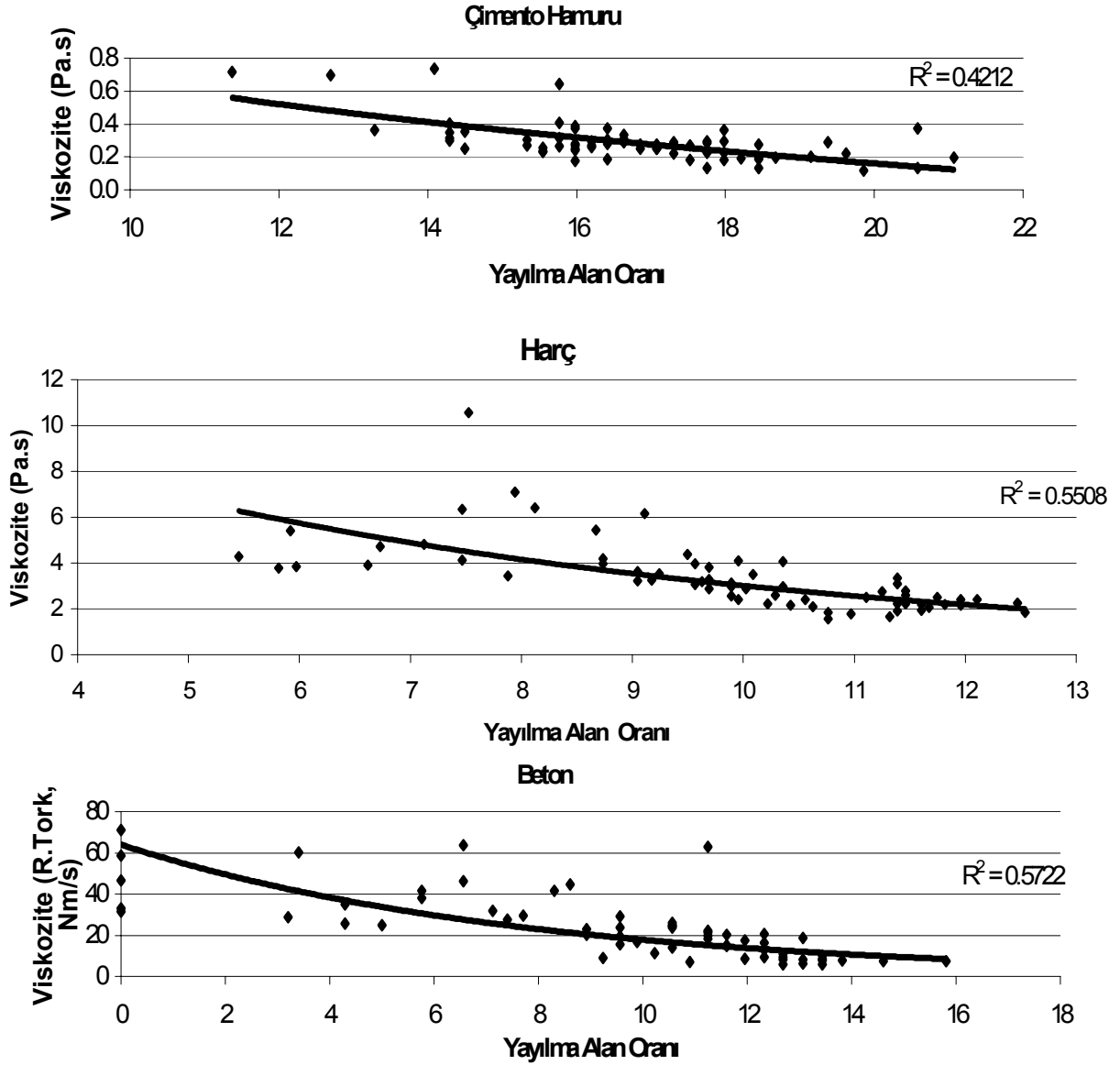
No	S/B	SP/B	W/B	Katkı (% B)	W/B	C	Uçucu Kül	W	Kum 1	Kum 2	Kırma Taş.	
											No1	B
A1	1.61	0.8	0.245	0.8	0.245	382	218	147	483	483	673	600
A2	2.11	0.8	0.245	0.8	0.245	330	189	127	548	548	673	519
A3	1.61	1.0	0.245	1.0	0.245	382	218	147	483	483	673	600
A4	2.11	1.0	0.245	1.0	0.245	330	189	127	548	548	673	519
A5	1.61	0.8	0.275	0.8	0.275	373	213	161	471	471	673	585
A6	2.11	0.8	0.275	0.8	0.275	323	185	140	536	536	673	508
A7	1.61	1.0	0.275	1.0	0.275	373	213	161	471	471	673	585
A8	2.11	1.0	0.275	1.0	0.275	323	185	140	536	536	673	508
A9	1.32	0.9	0.260	0.9	0.260	414	236	169	429	429	673	650
A10	2.40	0.9	0.260	0.9	0.260	303	173	124	572	572	673	477
A11	1.86	0.7	0.260	0.7	0.260	350	200	143	512	512	673	550
A12	1.86	1.1	0.260	1.1	0.260	350	200	143	512	512	673	550
A13	1.86	0.90	0.23	0.9	0.230	358	205	129	524	524	673	563
A14	1.86	0.90	0.30	0.9	0.300	340	194	160	497	497	673	534
A15	1.86	0.9	0.26	0.9	0.260	350	200	143	512	512	673	550
A16	1.86	0.9	0.26	0.9	0.260	350	200	143	512	512	673	550
A17	1.86	0.9	0.26	0.9	0.260	350	200	143	512	512	673	550



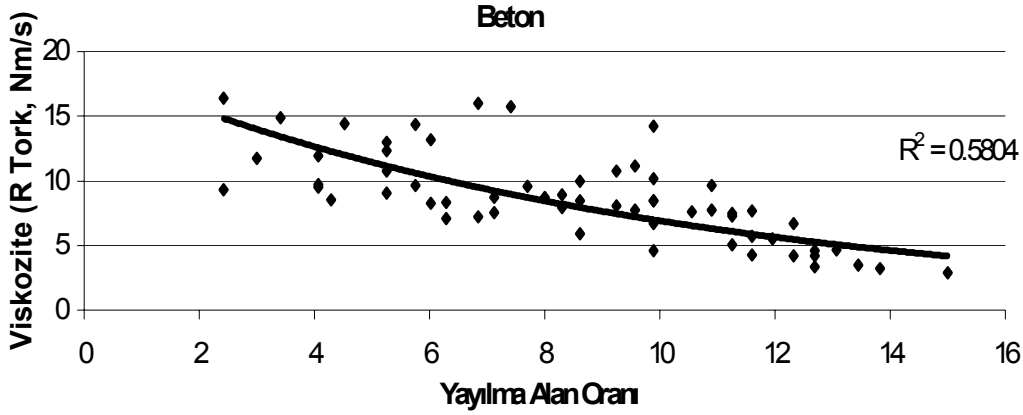
Şekil 2. Uçucu küllü karışımlarda farklı zamanlarda ölçülen yayılma alan oranlarının değişimi



Şekil 3. Silis dumanlı çimento hamurlarında farklı zamanlardaki yayılma alan oranlarının değişimi



Şekil 4. Uçucu küllü karışımlarda viskozite- yayılma alan oranı ilişkisi



Şekil 5. Silis dumanlı beton karışımlarında viskozite - yayılma alan oranı ilişkisi

düşmektedir. Bunun nedeni olarak karışıma çimentoya göre daha iri boyutlu olan taneler girildiğinde etkileşimin değiştiği düşünülebilir.

Yayılma alan oranı ile kayma eşiğinin değişimleri Şekil 6 ve 7’de sırası ile uçucu küllü ve silis dumanlı karışımlar için verilmiştir. Uçucu kül ve silis dumanı ile hazırlanan çimento hamurlarının kayma eşikleri karşılaştırıldığında, silis dumanı içeren karışımlarda kayma eşiğinin daha büyük değerler aldığı tespit edilmiştir. Ancak harçlar söz konusu olduğunda, viskozite özelliğinde farklı bir davranış elde edilmiş ve silis dumanlı karışımlarda kayma eşiğinin uçucu kül içerenlere göre daha düşük düzeyde kaldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, betonlarda kayma eşiğine karşı gelen torkun değişimi çimento hamurları ve harçlardan farklıdır. Hem uçucu kül hem de silis dumanı içeren karışımlarda, beton için yüksek yayılma değerlerinde sıfıra yaklaşan eşik değerleri elde edilirken, çimento hamurları ve harç karışımlarında (harçlarda çimento hamurlarına göre genel olarak daha büyük olmak üzere) sıfırdan oldukça büyük değerler elde edilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada denenen ve yayılma alan oranları 5-6 değerinden büyük olan beton karışımlarının pratik olarak Newtonien cisim olarak kabul edilebileceği görülmüştür.

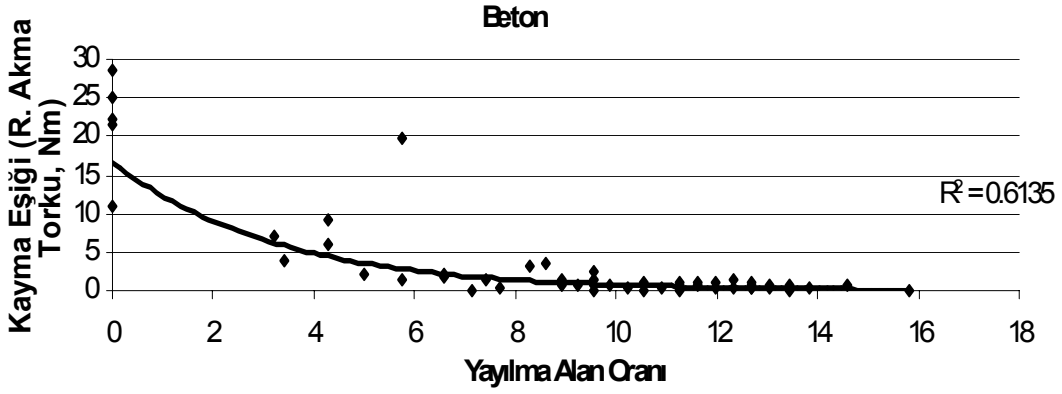
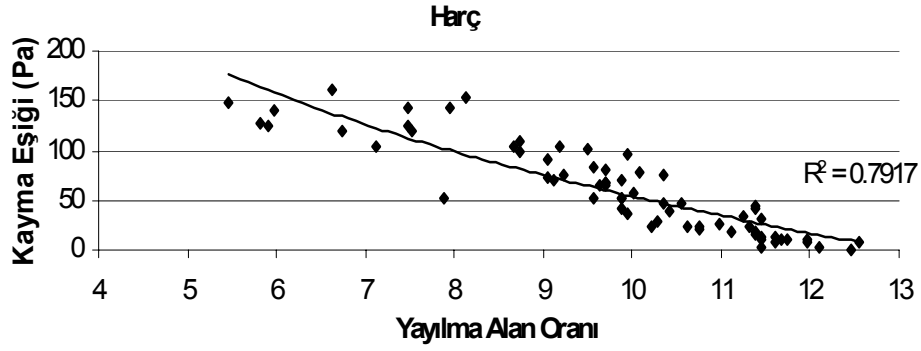
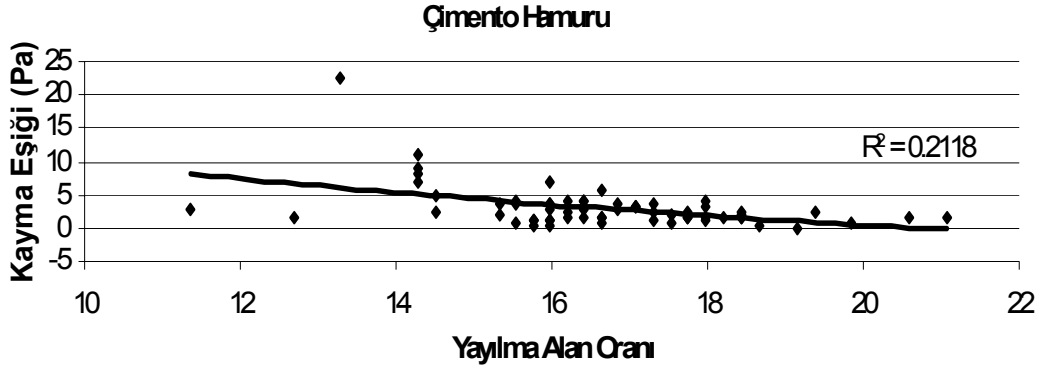
Betonlar için bir istatistik programı kullanılarak deney verilerine uygulanan “response surface” yönteminin sonuçları Tablo 7-10’da verilmiştir. Bu yöntemle seçilen bir özelliğin bileşim parametrelerine bağlı olarak yüzey denklemi çıkartılabilmektedir. Örnek olarak Şekil 8’de uçucu

küllü betonda 6. dakikadaki yayılma alan oranının, W/B, SA/B ve K/B parametrelerine bağlı yüzey ifadesinin 3 boyutlu şekli görülmektedir. Tablo 7-10, kuadratik yaklaşım ile elde edilen  $R^2$  ve p gibi “response surface” yönteminin parametrelerini içermektedir.  $R^2$  en küçük kareler yöntemi ile elde edilen korelasyon katsayısının karesini ve p ise seçilen değişkenin anlamlılık derecesini göstermektedir. Normal olarak  $p < 0.05$  ise %95 güvenlilikle değişkenin anlamlı bir etkisi olduğu kabul edilebilir. Tablo 7’de görülebileceği gibi bazı anlamlı parametreler, ikinci dereceden değişkenler içerebilmektedir. Örneğin 6. dakikada yayılma alan oranı için M/B ve SP/B’nin ikinci dereceden etkisi bulunmaktadır. Tablolar 7-10’dan görüldüğü gibi, uçucu küllü çimento hamurlarında 6. dakikada elde edilen yayılma alan oranı ve kayma eşiği değerlerini anlamlı olarak etkileyen bir bileşim parametresi elde edilememiştir. Buna karşılık, viskozite katsayısını M/B ve W/B oranlarının etkilediği anlaşılmaktadır. 30. dakika sonunda da, viskoziteyi benzer parametrelerin etkilediği, ayrıca yayılma alan oranının da M/B’den etkilendiği gözlemlenmiştir.

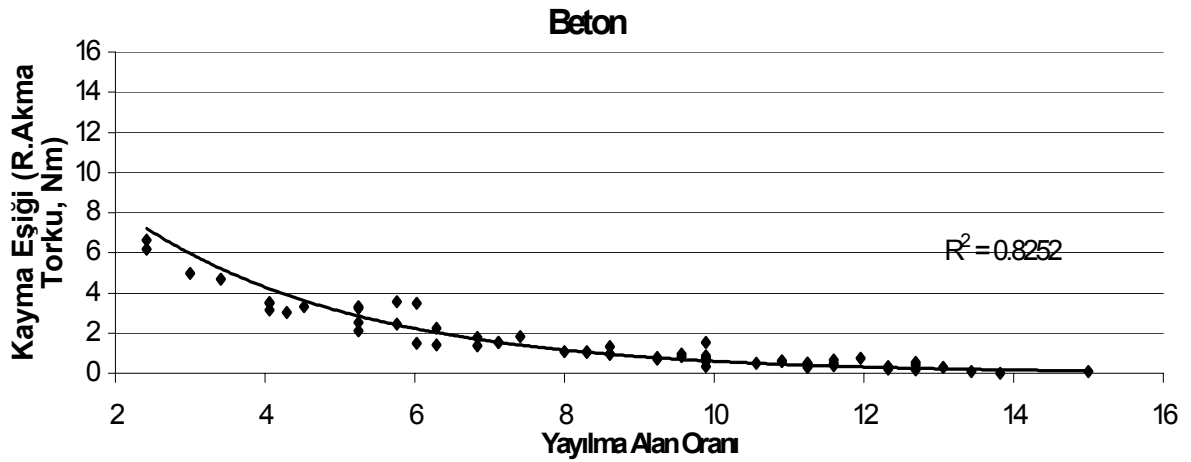
Uçucu küllü harçlarda ise, M/B oranı, her iki süre sonunda da tüm reolojik özellikleri etkilemekte, ayrıca 6. dakikada viskozite üzerine ek olarak S/B ve W/B parametreleri de etkili olmaktadır. 30. dakikada ise, M/B, S/B ve W/B, yayılma alan oranı ve viskozite üzerine etkili olmuş, kayma eşiği ise M/B ve W/B’den etkilenmiştir.

Hem uçucu küllü hem de silis dumanı içeren betonlarda, uçucu küllü karışımların 6. dakikada





Şekil 6. Uçucu küllü karışımlarda kayma eşiği - yayılma alan oranı ilişkisi

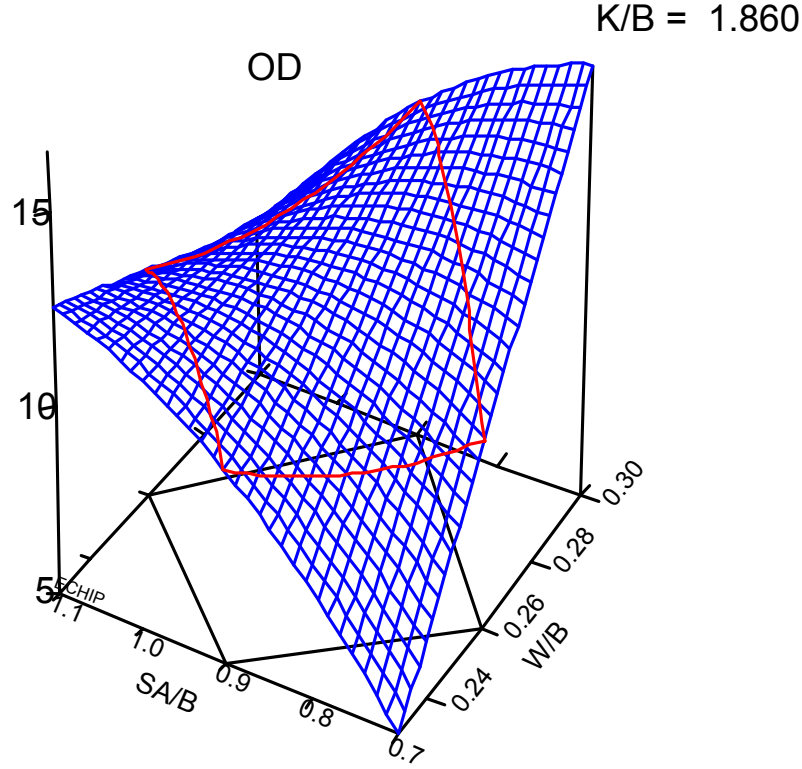


Şekil 7. Silis dumanlı beton karışımlarında kayma eşiği- yayılma alan oranı ilişkisi

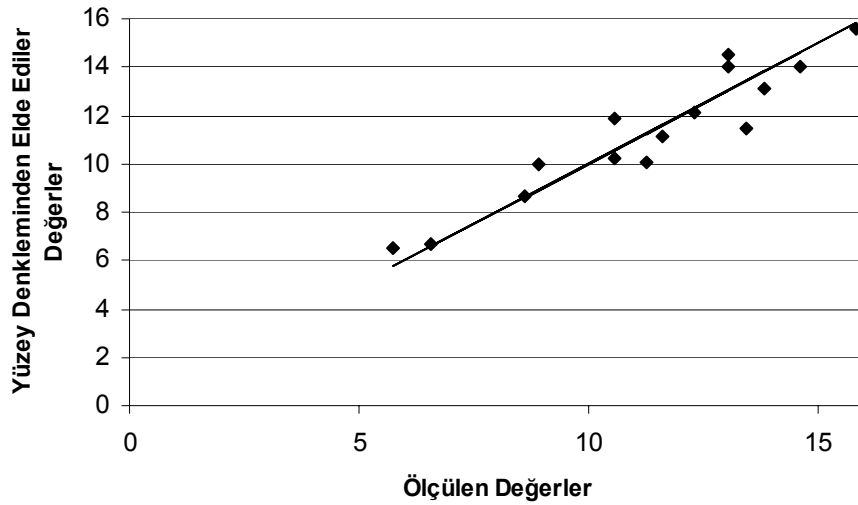
kayma eşiği özelliği hariç, tüm özellikler için S/B ve W/B'nin etkili olduğu görülmüştür. Bu duruma ek olarak, silis dumanı içeren beton karışımlarında yayılma alan oranı ve kayma eşiği (rölatif akma torku) üzerine süperakışkanlaştırıcı katkı oranının da etkili olduğu gözlenmiştir. Silis dumanının toplam yüzey alanının uçucu küle göre çok daha yüksek olması nedeni ile yayılmayı sağlamak için süperakışkanlaştırıcı kat-

kı oranındaki artışların önem kazanması bu durumu doğurmuş olabilir.

Şekil 9'da uçucu kül içeren betonda, altıncı dakikadaki "yayılma alan oranı" için ölçülen ve yüzey denkleminde elde edilen değerler verilmiş, deneysel sonuçların ve tahmin edilen değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 8. Uçucu küllü betonda yayılma alan oranının (6.dakika), S/B, SP/B ve W/B ile değişimi



Şekil 9. Uçucu küllü beton için 6. dakikada yayılma alanının ölçülen ve yüzey denkleminde elde edilen değerleri arasındaki ilişki

Tablo 7. Uçucu küllü çimento hamurları için istatistikler

	Zaman (dak.)	Terim	p	R <sup>2</sup>
Yayılma Alan Oranı	6	M/B*SP/B	0.0536	0.689
	30	M / B	0.0067	0.900
		M/B*SP/B	0.0177	
		M/B*M/B	0.0824	
Viskozite	6	M / B	0.0002	0.985
		W / B	0.0011	
		M/B*M/B	0.0001	
	30	M / B	0.0006	0.969
		W / B	0.0320	
		M/B*M/B	0.0006	
Kayma Eşiği	30	M/B*M/B	0.0311	0.665

Tablo 8. Uçucu küllü harçlar için istatistikler

	Zaman (dak.)	Terim	p	R <sup>2</sup>
Yayılma Alan Oranı	6	M / B	0.0018	0.858
	30	M / B	0.0001	0.948
		S / B	0.0361	
		W / B	0.0532	
Viskozite	6	M / B	0.0034	0.977
		S / B	0.0086	
		W / B	0.0004	
		M/B*M/B	0.0007	
	30	M / B	0.0108	0.971
		S / B	0.0030	
		W / B	0.0003	
		M/B*W/B	0.0428	
		W/B*W/B	0.0173	
Kayma Eşiği	6	M / B	0.0041	0.842
	30	M / B	0.0007	0.922
		W / B	0.0420	

## Sonuçlar

Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

1) Çimento hamurları, harçlar ve betonlarda, çökme-yayılma, viskozite ve kayma eşiği arasında ilişkiler vardır. Uçucu kül yerine silis dumanı kullanımı çimento hamurlarında viskoziteyi artırmış (thickening), ancak harç ve betonda

bunun tersine viskoziteyi düşüren bir etki gözlenmiştir.

Tablo 9. Uçucu küllü betonlar için istatistikler

	Zaman (dak.)	Terim	p	R <sup>2</sup>
Yayılma Alan Oranı	6	S / B	0.0014	0.888
		W / B	0.0307	
	30	S / B	0.0069	0.881
		W / B	0.0138	
		SP/B*W/B	0.0974	
Viskozite (beton için rölatif tork)	6	S / B	0.0033	0.953
		W / B	0.0001	
		S/B*W/B	0.0183	
		SP/B*W/B	0.0442	
		W/B*W/B	0.0150	
	30	S / B	0.0079	0.914
		W / B	0.0007	
		S/B*W/B	0.0562	
Kayma Eşiği (beton için akma torku)	6	S/B*W/B	0.0045	0.853
	30	S / B	0.0189	0.906
		W / B	0.0128	
		S/B*W/B	0.0367	
		S/B*S/B	0.0208	
		W/B*W/B	0.0339	

2) Kayma eşikleri karşılaştırıldığında, silis dumanlı çimento hamurlarının uçucu küllülere göre daha büyük değerler aldığı gözlenirken, harçlarda durum değişmiş ve silis dumanlı karışımların kayma eşiklerinin daha düşük kaldığı belirlenmiştir. Öte yandan hem uçucu küllü hem de silis dumanlı betonlarda, yayılma alanı oranının 5-6 değerinin üzerinde olduğu karışımlarda kayma eşiğinin sıfıra yaklaştığı, bu nedenle bu betonların Newtonien kabul edilebileceği anlaşılmıştır.

3) Genel olarak uçucu küllü hamurlarda en etkin bileşim parametreleri, M/B ve W/B iken, harçlarda ek olarak S/B'de etkili olmuştur. Uçucu küllü ve silis dumanlı betonların her ikisinde de S/B ve W/B etkin parametreler olarak öne çıkmıştır. Silis dumanı içeren betonlarda, SP/B'nin de yayılma alan oranı ve kayma eşiği üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır.

4) “Merkezi bileşik tasarım” yöntemi ile tasarlanan deney verilerine uygulanan “Response surface” yönteminin kendiliğinden yerleşen çimento

mento hamuru, harç ve betonların reolojik parametrelerinin tahmininde başarı ile uygulanabileceği görülmüştür.

Tablo 10. Silis dumanlı betonlar için istatistikler

	Zaman (dak.)	Terim	p	R <sup>2</sup>
Yayıma Alan Oranı	6	S / B	0.0001	0.939
		SP / B	0.0067	
		W / B	0.0038	
	30	S / B	0.0000	0.990
		SP / B	0.0000	
		W / B	0.0001	
		S/B*SP/B	0.0150	
		S/B*S/B	0.0313	
	SP/B*SP/B	0.0050		
Viskozite (beton için rölatif tork)	6	S / B	0.0000	0.961
		W / B	0.0007	
		SP/B*W/B	0.0287	
	30	S / B	0.0000	0.989
		SP / B	0.0260	
		W / B	0.0000	
		S/B*W/B	0.0990	
		SP/B*W/B	0.0208	
Kayma Eşiği (beton için akma torku)	6	S / B	0.0012	0.880
		SP / B	0.0476	
		S/B*S/B	0.0298	
	30	S / B	0.0002	0.936
		SP / B	0.0045	
		W / B	0.0253	
		S/B*SP/B	0.0202	
		SP/B*W/B	0.0511	
	S/B*S/B	0.0142		

## Teşekkür

Yazarlar TÜBİTAK INTAG'a, TÇMB'ne, İ.T.Ü. Araştırma Fonu'na ve Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye desteklerinden dolayı teşekkür ederler.

## Kaynaklar

- Aitcin, P. C., (1998). *High – Performance Concrete*, Chapter 7, pp. 175 – 198, E & FN SPON pub. ISBN 0419 192700, New York.
- ASTM C30, Flow table for use in tests of hydraulic cement.
- Bürge, T., (1999). *Viscocrete, Latest Development*, Madrid, Spain.
- Houst, Y.F., Maeder, U., Flatt, R.J., Widmer, J., Bowen, P., Hoffmann, H., Sulser, U. ve Buerge,

- T.A., (1999). *New superplasticizers: from research to application, creating with concrete*, international conf. on modern concrete materials: binders, additives and admixtures, Ed. by Dhir R.K., Dundee, Scotland, 445-456.
- Khayat, K.H., Ghezal, A. ve Hadriche M.S., (1999). Factorial design models for proportioning self-consolidating concrete, *Material Structures*. **32**, 679 - 686.
- Montgomery, D.C., (1991). *Design and Analysis of Experiments*, Third Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Nornberg, J., Peterson, Ö., ve Billberg, P., (1997). Effect of new generation superplasticizers on the properties of fresh concrete, *Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Proceedings, Fifth CANMET/ACI Int. Conf. Ed. By V.M. Malhotra, Rome, SP-173*, 583-98.
- Okamura, H., (1997). Self-compacting high-performance concrete, *Concrete International*, **19**, 7, 50-54.
- Ozkul, M.H., Dogan, A.U., Cavdar, Z., Sağlam, A.R. ve Parlak, N., (2000). Effects of self compacting concrete admixtures on fresh and hardened concrete properties, *Proceedings, Cement and Concrete Technology in the 2000's, Second International Symposium*, Ed. by Yeginobalı, A., 6-10 September, Istanbul.
- Ozkul, M.H., Dogan, A.U., Cavdar, Z., Sağlam, A.R. ve Parlak N., (1999). Properties of fresh and hardened concretes prepared by new generation superplasticizers, *Proceedings, Creating with Concrete, International Conf. On Modern Concrete. Materials: Binders, Additives and Admixtures*, Ed. by Dhir R.K., Dundee, Scotland, 467-474.
- TS-EN 197-1, Cement Parts 1, Composition, and Specification and Conformity Criteria
- Skarendahl, A. ve Peterson, O., eds. (2000) *Self-Compacting Concrete, State-of-the Art Report of RILEM Technical Committee*, 174 - SCC.
- Uchikawa, H., Harehara, S., ve Sawaki D., (1997). The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in cement paste prepared with organic admixture, *Cement and Concrete Research*, **27**, 1, 37-50.
- Yoshioka, K., Sakai, E., Damian, M., ve Kitaharu, A., (1997). Role of steric hindrance in the performance of superplasticizers for concrete, *5<sup>th</sup> American Ceramic Society Journal*, **80**, 10, 2667-2771.