

## **BETONDA SİLİS DUMANI KULLANIMININ EKONOMİK ANALİZİ**

İlker Bekir TOPÇU<sup>1</sup>, Mustafa KAVAL<sup>2</sup>

**ÖZET:** Yüksek performanslı beton elde etmek için mineral katkı olarak silis dumanı kullanımı gereklidir. Uygun oranda silis dumanı katılması ve süperakışkanlaştırıcı ile birlikte kullanılması sonucu yüksek kaliteli ve ekonomik beton elde edilebilmektedir. Bu çalışmada PKÇ/B 32.5R ve KÇ 32.5 olarak iki tip çimento ile 0.50 su/bağlayıcı oranında % 1.6 oranında süperakışkanlaştırıcı kullanılarak; 300, 350 ve 400 kg/m<sup>3</sup> dozajlı silis dumanı ilavesiz kontrol betonları ve 200, 250, 300, 350 ve 400 kg/m<sup>3</sup> dozajlı % 5, 10 ve 15 oranında çimento yerine silis dumanı ilave edilmiş betonlar üretilmiştir. Üretilen betonlarda 28 günlük basınç dayanımlarına göre maliyet hesapları yapılmıştır. Her iki çimento türünde de yapılan deneylerle % 10 oranında silis dumanı 350 ve 400 dozajlı betonlar için en uygun sonucu vermiştir. 300 dozajlı betonlar için % 15 oranında silis dumanı ilavesi daha uygun görülmektedir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Beton, Silis Dumanı, Dayanım, Maliyet Analizi.

## **ECONOMICAL ANALYSIS OF USE OF SILICA FUME IN CONCRETE**

**ABSTRACT:** Use of silica fume, as an additive is necessary to obtain high performance concrete. High quality and economical concrete can be produced with silica fume and superplasticizer in appropriate ratios in the mixtures. In this study, two different types of cements, which were PKÇ/B 32.5R and KÇ 32.5, used with a 0.50 water/binding material and 1.6 % superplasticizer. Control concretes were produced with cement contents of 300, 350 and 400 kg/m<sup>3</sup> without silica fume. Other concretes involving silica fume ratios of 5, 10 and 15 % were produced with cement contents of 200, 250, 300, 350 and 400 kg/m<sup>3</sup>. The cost analysis were carried out with respect of 28-day compressive strengths. Use of a 10 % silica fume in mixtures resulted in an optimal ratio, particularly for concretes with cement contents of 350 and 400 kg/m<sup>3</sup>. A % 15 addition of silica fume to the concretes with cement contents of 300 kg/m<sup>3</sup> seems to be more beneficial.

**KEYWORDS:** Concrete, Silica Fume, Strength, Cost Analysis.

<sup>1</sup>Osmangazi Üniv., Müh.-Mim. Fak., İnş. Müh. Böl., 26480 Batı Meşelik, ESKİŞEHİR

<sup>2</sup>Kocatepe Üniv. Meslek Yüksek Okulu, Çay, AFYON.

## ***I. GİRİŞ***

Endüstride çeşitli ürünlerin üretimleri sırasında meydana gelen atıkların beton üretiminde değerlendirilmesi amacına yönelik literatürde pek çok araştırma mevcuttur. Atıkların kullanılmasıyla hem çevre kirliliği önlenmekte, hem de ekonomiye katkı sağlanmaktadır. Atıkların çeşitli sektörlerde kullanılması dolayısıyla ülkelerin hem doğal kaynakları, hem de ulusal ekonomileri olumlu yönde etkilenmektedir. Ekonominin her geçen gün artan önemi nedeniyle henüz kullanılmayan kaynakların araştırılması, hangi amaç için nerede kullanılabileceğinin belirlenmesi çalışmaları zorunlu hale gelmiştir. Zira yoğun şekilde tüketilmekte olan dünya kaynaklarının zamanla yetersiz kalacağı gerçektir. Bunun yanında özellikle canlı sağlığını tehdit eden, çevre kirlenmesine yol açan atıkların kullanımının artırılmasının çok önemli faydaları olacaktır. Termik santrallerde elektrik üretimi esnasında yakılan kömürlerden çıkan uçucu küller, yüksek fırınlardan çıkan cürufur, Silikoferrokrom üretimi sırasında filtrelerde toplanan silis dumanları (SD) ile çeşitli endüstriyel tesislerin bazı atıkları beton ve çimento teknolojisinde yaygın kullanıma sahip atıklardır [1-3].

Silis dumanının normal dayanımlı betonlarda kullanılabilmesi için fiyatının ekonomik olması ve bol miktarda elde edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada SD kullanarak normal betonlardaki dayanımın daha ekonomik olarak sağlanması hedeflenmiştir. Bu amaçla iki farklı çimentoyla 200, 250, 300, 350 ve 400 dozajlarında silis dumanlı ve silis dumanlı beton karışımları hazırlanmıştır. Silis dumanı katılmamış kontrol betonlarının 28 günlük silindirik basınç dayanımlarını veren SD'lı betonların bileşimleri belirlendikten sonra betonların hem bağlayıcı hem de beton maliyet hesapları yapılmıştır. Maliyete bağlı olarak optimum SD miktarı ve bunun dayanımdaki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır [4]. Kontrol betonu dayanımına eşit SD'lı betonların maliyetlerindeki kârlar belirlenerek optimum SD oranı belirlenmiştir. Kontrol betonlarında 200 dozajla başlanarak en az C16 sınıfı beton elde edilmesi hedeflenmiştir. Maliyete bağlı analizler sonucunda silis dumanının en uygun kullanım yüzdeleri, bu yüzdelerin beton basınç dayanımına etkileri ve yapılabilecek tasarruflar belirlenmiştir. Ülkemizde de mineral katkı olarak henüz fazlaca değerlendirilemeyen Antalya ferrokrom tesislerinden sağlanan ve kullanımını gittikçe yaygınlaşan SD'nın kullanımı ile daha ekonomik beton üretimleri yapılabilecektir.

## II. SİLİS DUMANI (SD)

SD yüksek saflıkta kuvarsitin silisyum veya ferrosilisyum alaşımının elektrik ark fırınlarında kok kömürü ile indirgenmesi sonucu elde edilen gri renkli bir tozdur. SiO gazı fırının düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde hava ile temas ederek hızlı okside olur ve amorf silis olarak yoğunlaşarak SD bileşiminin hemen tamamını oluşturur. Silisyum fırınlarından çıkan SD en az % 89 SiO içerir. Alaşım fırınlarından elde edilen tozlar da SD olarak nitelenmekle beraber kimyasal bileşimleri biraz farklı olup silis oranları düşüktür. Çoğunlukla küresel olan SD taneleri 0.1  $\mu$  civarında ölçülen ortalama çapları ile çimento tanelerinden yaklaşık 100 kere daha küçüktürler. Bileşimindeki yüksek silis oranı SD'ni aktif bir puzolan yapmakta, fakat çok fazla olan incelik belirli bir kıvam için gerekli su miktarını arttırmaktadır [1]. Ülkemizde SD'ları Etibank Elektrometalurji İşletmesi'nin Antalya'daki tesislerinde elde edilmektedir. Fabrikanın ferrosilisyum (FeSi) ve silikoferrokrom (SiFeCr) fırınlarından özel filtreli toz tutucularla elde edilen SD'larının fiyat, satış şekli ve üretim kapasitesi hakkında alınan bilgiler Çizelge 1'de verilmiştir. TS 12141 standardı ile SD'lı çimento üretimine izin verilmiştir [5].

**Çizelge 1.** Silis dumanlarının fiyatı, satış şekli ve üretim kapasitesi [4]

Silis Dumanı	Torba Ebadı (cm)	Torba Ağırlığı (kg)	Fiyatı (\$/Ton)	Üretim (Ton/Gün)	Üretim (Ton/Yıl)
FeSi ve SiFeCr	60x80x100	500	31	2.6	360-400

## III. DENEYSEL ÇALIŞMA

### *Kullanılan Malzemeler*

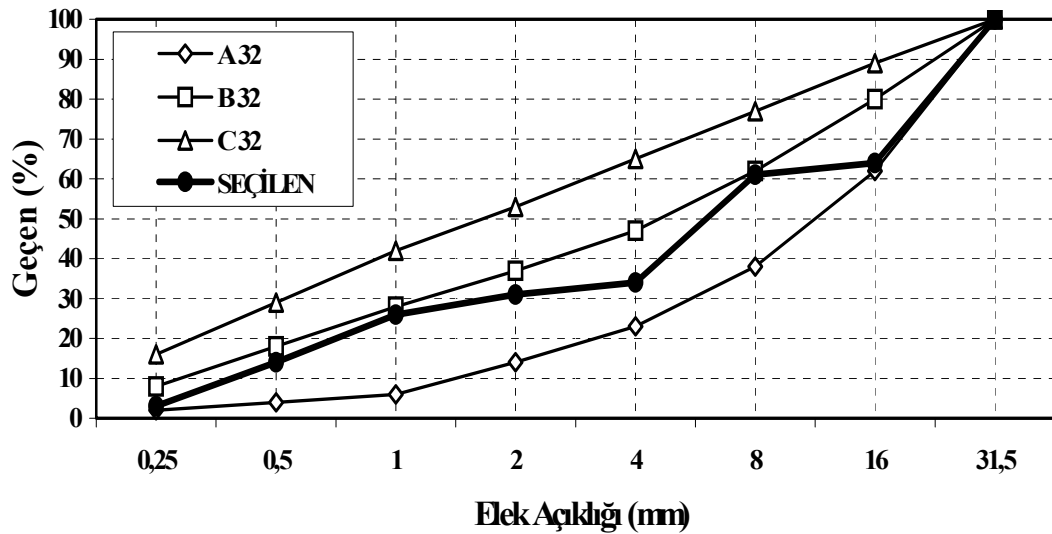
**Mineral katkı:** Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesinden sağlanan ferrosilisyum (FeSi) silis dumanına ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çimento:** Eskişehir Çimento Fabrikasının TS 12143'e [6] uygun olarak ürettiği Portland Kompoze Çimento (PKÇ/B 32.5R) ve Afyon Çimento Fabrikasının TS 10156'e [7] uygun olarak ürettiği Katkılı Çimento (KÇ 32.5) kullanılmıştır. Bu çimentolara ait özellikler Çizelge 2'de verilmiştir.

**Süperakışkanlaştırıcı Katkı:** Tüm karışımlarda toplam bağlayıcı miktarının % 1.6'sı kadar, TS 3452'ye [8] göre süperakışkanlaştırıcı (SA) ve su azaltıcı katkı maddesi olarak tanımlanan F tipi (Sikament FF-N) katkı maddesi kullanılmıştır.

Çizelge 2. Kullanılan silis dumanı ve çimentolara ait özellikler [4]

Malzeme Türü	Çimento		Silis Dumanı
	PKÇ/B 32.5R	KÇ 32.5	FeSi
<b>Kimyasal Bileşim (%)</b>			
SiO <sub>2</sub>	31.53	28.61	94.94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.06	6.34	0.70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.29	2.81	0.60
CaO	48.89	52.83	0.83
MgO	1.46	2.26	0.71
SO <sub>3</sub>	2.01	2.78	0.21
Kızdırma Kaybı	4.55	2.14	-
Tayin Edilemeyen	0.05	0.50	1.48
Çözünmeyen Kalıntı	0.27	0.29	2.16
<b>Fiziksel Özellikler</b>			
Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2.85	2.96	2.36
Özgül Yüzey (m <sup>2</sup> /kg)	357.4	394.8	-
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>			
2 Günlük	12.8	13.2	-
7 Günlük	26.9	25.2	-
28 Günlük	42.5	38.4	-
<b>Elek Analizi (mm)</b>			
+0.250	0.00	0.00	0.04
-0.250 +0.125	0.40	1.40	0.26
-0.125 +0.074	7.00	10.00	1.57
-0.074 +0.044	25.00	28.50	1.04
-0.044 +0.032	33.00	33.27	97.07
-0.032 +0.003	55.00	52.05	-



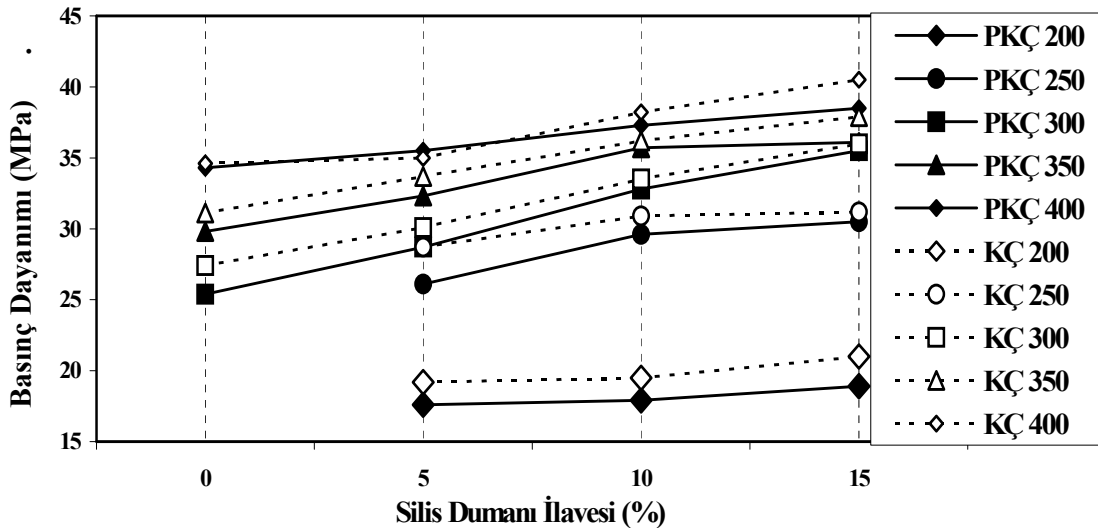
Şekil 1. Kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi.

**Agrega:** Eskişehir-Osmaneli kumu ile Söğüt-Zemzemiye kırmataşları kullanılmıştır. Kırmataşların en büyük tane boyutu 31.5 mm'dir. Karışım agregasının granülometri eğrisi Şekil 1'de verilmiştir. Agregaların granülometrisi TS 706 [9] ve TS 707'de [10] belirtilen referans eğrilerinden A32 ve B32 arasındaki uygun bölgeye düşecek şekilde ayarlanmıştır. Agreganın birim ağırlığı TS 3529 [11], özgül ağırlığı ise TS 3526'ya [12] göre bulunmuştur. Buna göre birim ağırlıklar kum için 1550, kırmataş I (8-16) için 1720, kırmataş II (16-32) için 1770 kg/m<sup>3</sup>, özgül ağırlıklar ise kum için 2660, kırmataş I (8-16) için 2760, kırmataş II (16-32) için 2770 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. % 35 kum, % 30 kırmataş I (8-16) ve % 35 kırmataş II (16-32) oranlarındaki agrega karışımının birim ağırlığı 1680, özgül ağırlığı ise 2730 kg/m<sup>3</sup> olmuştur.

**Üretilen Beton Tipleri ve Deneyle:** Kontrol betonları PKÇ/B 32.5R ve KÇ 32.5 çimentoları kullanılarak 300, 350 ve 400 dozajlı, SD'sız ve çimento ağırlığının % 1.6'sı kadar süperakışkanlaştırıcı (SA) kullanılarak üretilmiştir. Yine 200, 250, 300, 350 ve 400 dozajlı, ve her dozaj için çimento ağırlığının % 5, 10 ve 15'i SD ile bağlayıcı (B=çimento+SD) ağırlığının % 1.6'sı kadar Sikament FF-N SA kullanılarak SD'lı betonlar elde edilmiştir. Üretilen 36 farklı serinin her birinden 3'er adet 150x300 mm silindir numuneler dökülmüş ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir.

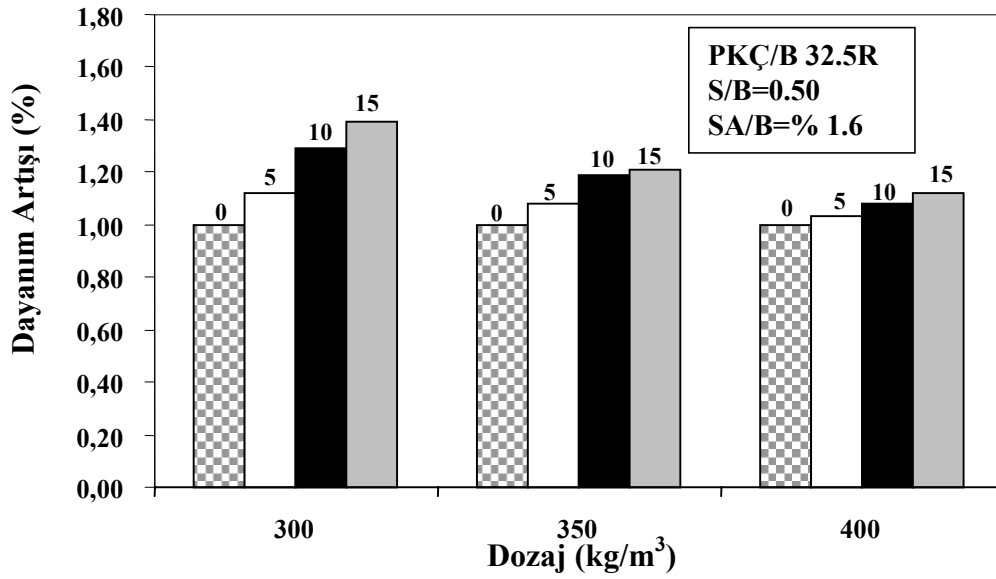
#### IV. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

Şekil 2'de de açıkça görüldüğü gibi, PKÇ/B 32.5R çimentosu ile hazırlanan betonlarda, SD kullanımı ile basınç dayanımı doğrusala yakın bir şekilde artmaktadır. C 30 sınıfı beton hedeflendiğinde, SD'sız 350 dozajlı betonda basınç dayanımı 29.8 MPa iken %



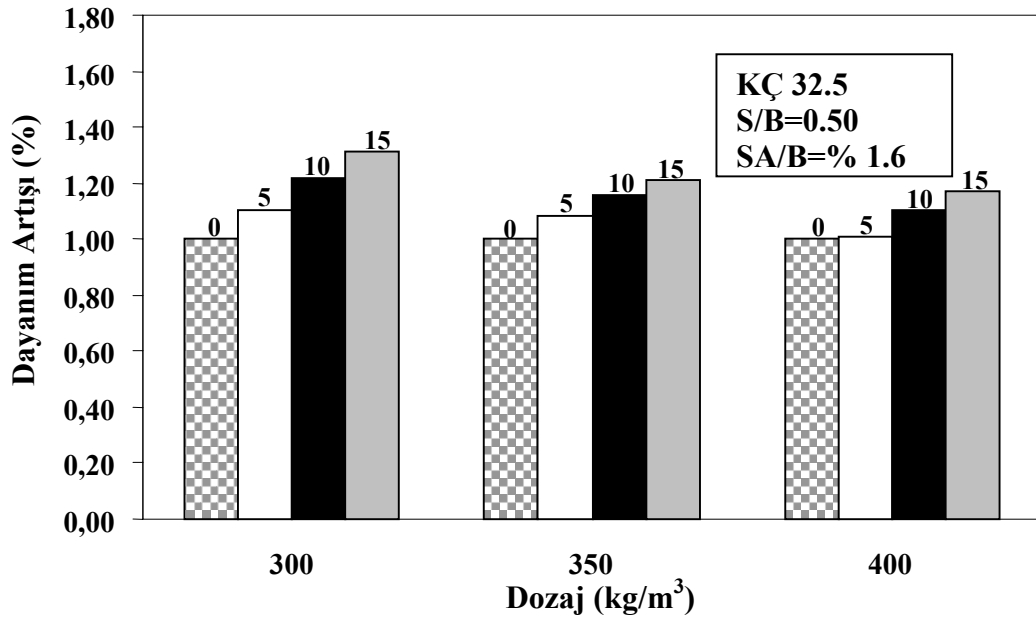
Şekil 2. PKÇ/B 32.5R ve KÇ 32.5 ile üretilen betonların dayanım-SD oranı ilişkisi.

10 SD kullanılarak üretilmiş 250 dozajlı betonda 29.6 MPa'dır. Yani 100 kg. çimento tasarrufuna karşılık 25 kg. SD kullanılarak aynı basınç dayanımı elde edilmiştir. KÇ 32.5'li betonlarda SD oranının artması ile basınç dayanımı da PKÇ/B 32.5R'li betonlarda olduğu gibi doğrusala yakın bir şekilde artmaktadır. SD'sız 400 dozajlı betonda 34.6 MPa olan dayanım aynı dozajda % 5 SD ile 35 MPa'ya, % 10 SD kullanımı ile 38.2 MPa'ya ve % 15 SD kullanımı ile 40.5 MPa'ya ulaşmaktadır.



Şekil 3. PKÇ/B 32.5R betonlarında dayanım artışı-SD oranı ilişkisi.

Şekil 3'den görüleceği gibi SD'nın % 15 oranında kullanılması ile en fazla dayanım artışı gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak her iki çimento ile üretilen betonlarda SD oranına göre değişimler oldukça az olmasına karşılık KÇ 32.5 ile üretilen betonlar genelde basınç dayanımı bakımından daha iyi sonuç vermiştir. SD'nın dayanımdaki etkisini daha iyi görebilmek için kontrol betonlarına bağlı olarak dayanım artış oranındaki değişimler PKÇ ile hazırlanan betonlar için Şekil 3'de ve KÇ 32.5 ile hazırlanan betonlar için Şekil 4'de verilmiştir. PKÇ/B 32.5R ile üretilen betonlarda basınç dayanımı artış oranı ile SD arasındaki ilişki SD'sız (kontrol) betonları baz alındığında, 300 dozajda SD sırasıyla % 5, 10, 15 kullanılması halinde, yine sırasıyla % 12, 29, 39'lük artış şeklinde gerçekleşmiştir. Dozaj arttıkça dayanım artış oranları da düşmektedir. SD oranları 350 dozajda sırasıyla % 8, 19, 21 iken, 400 dozajda ise % 3, 8, 12 olarak gerçekleşmiştir. KÇ 32.5 ile üretilen betonlarda dayanım artış oranı ile SD arasındaki ilişki SD'sız (kontrol) betonları baz alındığında 300 dozajlı betonda SD



Şekil 4. KÇ 32.5 çimentolularda dayanım artışı-SD oranı ilişkisi.

sırasıyla % 5, 10, 15 kullanılması halinde, yine sırasıyla % 10, 22, 31'lik artış gerçekleşmiştir. Dozaj arttıkça dayanım artış oranları da düşmektedir. Örneğin aynı SD oranları 350 dozajda kullanıldığında dayanım artış oranı sırasıyla % 3, 6, 21 iken, 400 dozajda dayanım artış oranı sırasıyla % 1, 10, 17 olarak gerçekleşmektedir. İki çimento türünün artış oranları karşılaştırıldığında 400 dozajlı betonlar hariç dayanım artışı oranı açısından PKÇ/B 32.5R çimentosu ile hazırlanan beton, KÇ 32.5 çimentosu ile hazırlanan betondan daha iyi bir sonuç vermiştir.

## V. SONUÇLARIN İRDELENMESİ

PKÇ ile hazırlanan numunelerde; 300 dozajlı üretimlerinde kontrol betonunda dayanım 25.4 MPa iken; % 5 SD kullanımında 28.7 MPa'ya, % 10 SD kullanımında 32.8 MPa'ya, % 15 SD kullanımında 35.5 MPa'ya çıkmıştır. 350 dozajlı betonlarda SD oranı sırasıyla % 0, 5, 10, 15 kullanılması durumunda dayanımı sırasıyla 29.8, 32.3, 35.7 ve 36.1 MPa olarak bulunmuştur. 400 dozaj için ise sırasıyla aynı oranda SD kullanılması halinde dayanım 34.3, 35.5, 37.3 ve 38.5 MPa düzeyine ulaşılmıştır. Buradan da görüleceği gibi normal dozajlar için SD'nin etkisi daha fazla olmaktadır. SD % 5, 10, 15 kullanıldığında dayanımda gözlenen artış oranları; 300 dozajlı betonlarda % 12, 29, 39; 350 dozajlı betonlarda % 8, 19, 21 ve 400 dozajlı betonlarda % 3, 8, 12 olarak gerçekleşmektedir. En iyi sonuçlar SD'nin % 15 oranında kullanılması durumunda elde

edilmiştir. KÇ 32.5 ile hazırlanan 300 dozajlı üretimlerde dayanım, kontrol betonunda 27.4 MPa iken; % 5 SD için 30.1 MPa, % 10 SD için 33.5 MPa, % 15 SD için 36.0 MPa'dır. 350 dozajlı betonlarda sırasıyla % 0, 5, 10 ve 15 oranlarında SD kullanılması durumunda basınç dayanımı sırasıyla 31.1, 33.7, 36.2 ve 37.9 MPa çıkmıştır. 400 dozajlıda ise sırasıyla aynı oranda SD kullanılması halinde dayanım 34.6, 35.0, 38.2 ve 40.5 MPa düzeyine ulaşılmıştır. Buradan da görüleceği gibi normal dozajlar için SD'nin etkisi daha fazla olmaktadır. % 5, 10, 15 oranlarında SD kullanılırsa dayanımlardaki artış oranları sırasıyla 300 dozajlı betonlarda % 10, % 22, % 31; 350 dozajlı betonlarda % 8, % 16 ve % 21 ve 400 dozajlı betonlarda % 1, % 10 ve % 17 olarak gerçekleşmektedir. En iyi sonuçlar SD'nin % 15 oranında kullanılmasıyla elde edilmektedir. Artış oranlarından da anlaşıldığı gibi düşük dozajda SD'nin etkisi daha belirgin olmaktadır.

## ***VI. MALİYET ANALİZİ***

SD'nin üretim maliyetine etkisi ile ilgili olarak Tonak ve arkadaşları SD'nin çimento üretiminde kullanılmasının maliyete etkisini incelemişlerdir [13]. Araştırmalarında çimento değirmenine öğütmede % 10 oranında SD katılması ile öğütme süresinin % 20-25 azaldığını, dolayısıyla % 20-25 elektrik enerjisi tasarrufu sağlanabileceğini belirtmişlerdir. Öğütme süresinin kısılmasından dolayı değirmenin üretim kapasitesinde yaklaşık % 25 artış olacağını ifade etmektedirler.

***Bağlayıcı Malzeme Maliyeti Analizi:*** Kontrol betonuna dayanım açısından eşit olan SD'li betonların bağlayıcı (B=çimento+SD) maliyeti ile kontrol betonunun bağlayıcı (çimento) maliyeti çıkarılarak optimizasyon için değerler karşılaştırılmıştır. Çizelge 5'de 2002 tarihindeki fiyat listesi dolar bazında (kur:1 \$=1.350.000 TL) verilmiştir.

**Çizelge 5.** Malzeme birim fiyat listesi

<b>Malzeme</b>	<b>Fiyatı ( \$ )</b>	<b>Birim Fiyatı (\$/kg)</b>
Çimento	2.476	0.0495
Silis Dumanı	31.000	0.031
Süperakışkanlaştırıcı	165.094	0.660
Kırmataş	4.717	0.0027
Kum	3.538	0.00282
Su	0.470	4.72x10 <sup>-4</sup>



**Aynı Dayanımı Veren Dozaj ve SD Miktarının Bulunması:** 300, 350 ve 400 dozajlı kontrol betonlarının dayanım açısından eşit, sırasıyla % 5, 10 ve 15 SD içeren beton dozajları ve SD miktarları 1 m<sup>3</sup> için belirlenmiş miktarları Çizelge 6'da verilmiştir.

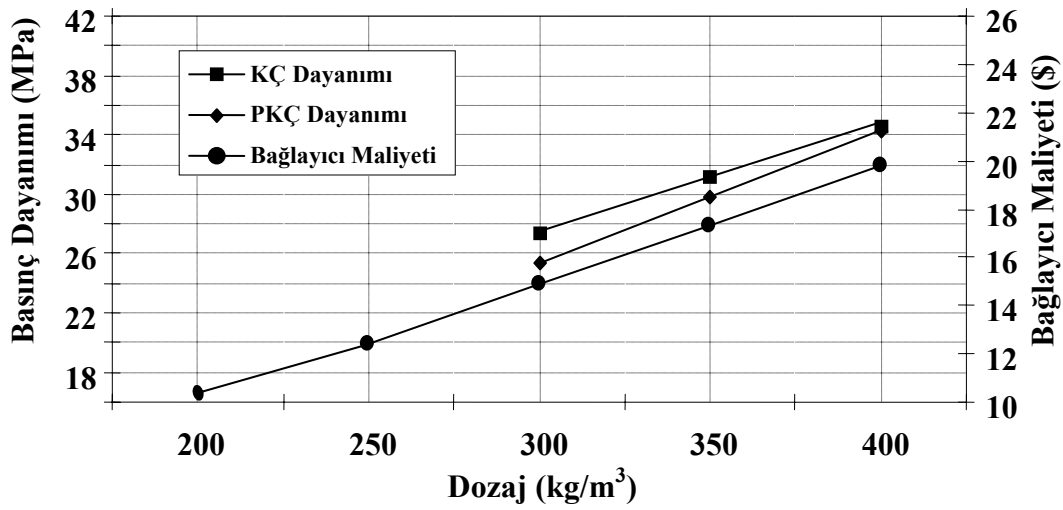
**Çizelge 6.** Beton maliyetleri ve % kâr miktarları [4]

Hedef Üretim	SD %	Hedefi Veren		Hedefi Veren Bağlayıcı		Hedefi Veren Beton	
		C (kg)	SD (kg)	Maliyeti (\$)	Kâr (%)	Maliyeti (\$)	Kâr (%)
PKÇ300	0	300	-	14.87	-	23.95	-
PKÇ300	5	247	12.3	12.62	15.1	21.27	11.2
PKÇ300	10	232	23.2	12.21	<b>17.8</b>	20.82	13.1
PKÇ300	15	228	34.2	12.35	16.9	21.93	12.2
PKÇ350	0	350	-	17.33	-	26.63	-
PKÇ350	5	319	15.9	16.29	6.0	25.43	4.5
PKÇ350	10	253	25.3	13.31	<b>23.2</b>	21.84	18.0
PKÇ350	15	247	37	13.38	22.9	21.97	17.5
PKÇ400	0	400	-	19.81	-	29.32	-
PKÇ400	5	381	19.0	19.46	1.8	28.97	0.4
PKÇ400	10	325	32.5	17.10	13.7	26.16	10.8
PKÇ400	15	288	43.2	15.60	<b>21.2</b>	24.37	16.9
KÇ300	0	300	-	14.87	-	23.95	-
KÇ300	5	243	12.2	12.42	16.5	21.02	12.2
KÇ300	10	235	23.5	12.37	<b>16.8</b>	21.01	12.3
KÇ300	15	231	34.7	12.52	15.8	21.23	11.3
KÇ350	0	350	-	17.33	-	26.63	-
KÇ350	5	314	15.7	16.04	7.5	25.12	5.7
KÇ350	10	254	25.4	13.37	<b>22.9</b>	21.90	17.8
KÇ350	15	250	37.4	13.54	21.9	22.17	16.8
KÇ400	0	400	-	19.81	-	29.32	-
KÇ400	5	385	19.2	19.66	0.8	29.22	0.4
KÇ400	10	320	32.0	16.84	15.0	25.83	11.9
KÇ400	15	285	42.8	15.44	<b>22.0</b>	24.17	17.6

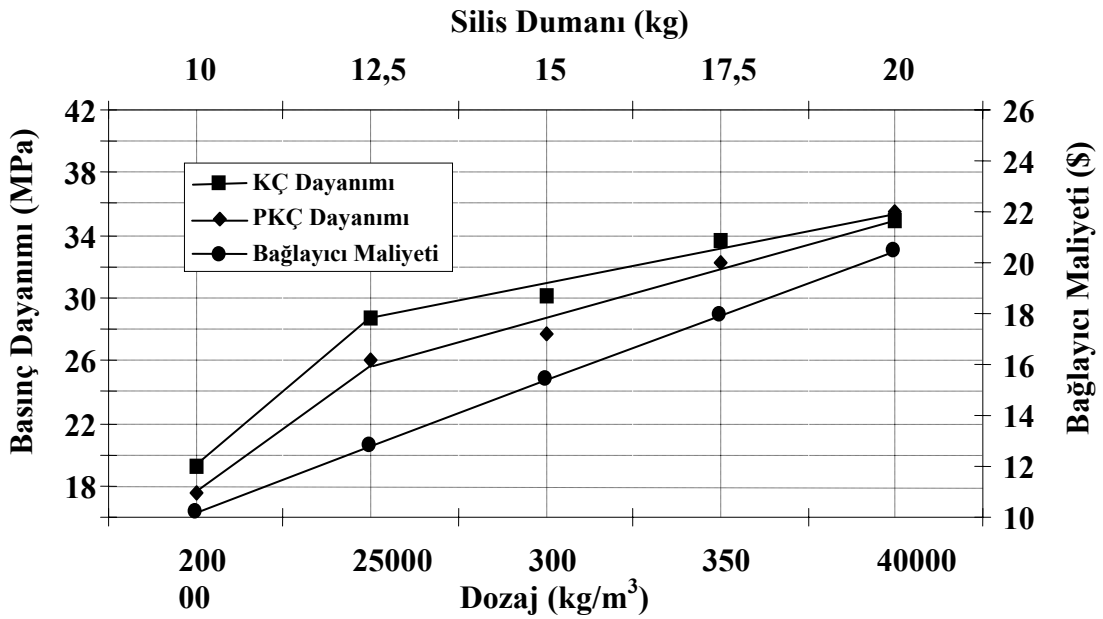
**Bağlayıcı Malzeme Maliyetlerinin İrdelenmesi:** Çizelge 6'da PKÇ 300'lü bir beton yerine 232 kg/m<sup>3</sup> çimento, 23.2 kg/m<sup>3</sup> SD kullanımı ile en fazla kâr miktarı % 10 SD kullanılması ile % 17.8 olmakta, PKÇ 350'lü bir beton yerine 253 kg/m<sup>3</sup> çimento, 25.3 kg/m<sup>3</sup> SD kullanımı ile en fazla kâr miktarı % 10 SD kullanılması ile % 23.2 olmakta, PKÇ 400'lü bir beton yerine 288 kg/m<sup>3</sup> çimento, 43.2 kg/m<sup>3</sup> SD kullanımı ile en fazla kâr miktarı % 15 SD kullanılması ile % 21.2 olmaktadır. KÇ 300'lü bir beton yerine 235 kg/m<sup>3</sup> çimento ve 23.5 kg/m<sup>3</sup> SD kullanımı ile en fazla kâr miktarı % 10 SD kullanılması ile % 16.8 olmakta, KÇ 350'lü bir beton yerine 254 kg/m<sup>3</sup> çimento, 25.4

kg/m<sup>3</sup> SD kullanımı ile en fazla kâr miktarı % 10 SD kullanılması ile % 22.9 olmakta, KÇ 400'lü bir beton yerine 285 kg/m<sup>3</sup> çimento ve 42.8 kg/m<sup>3</sup> SD kullanımı ile en fazla kâr miktarı % 15 SD kullanılması ile % 22.0 olmaktadır.

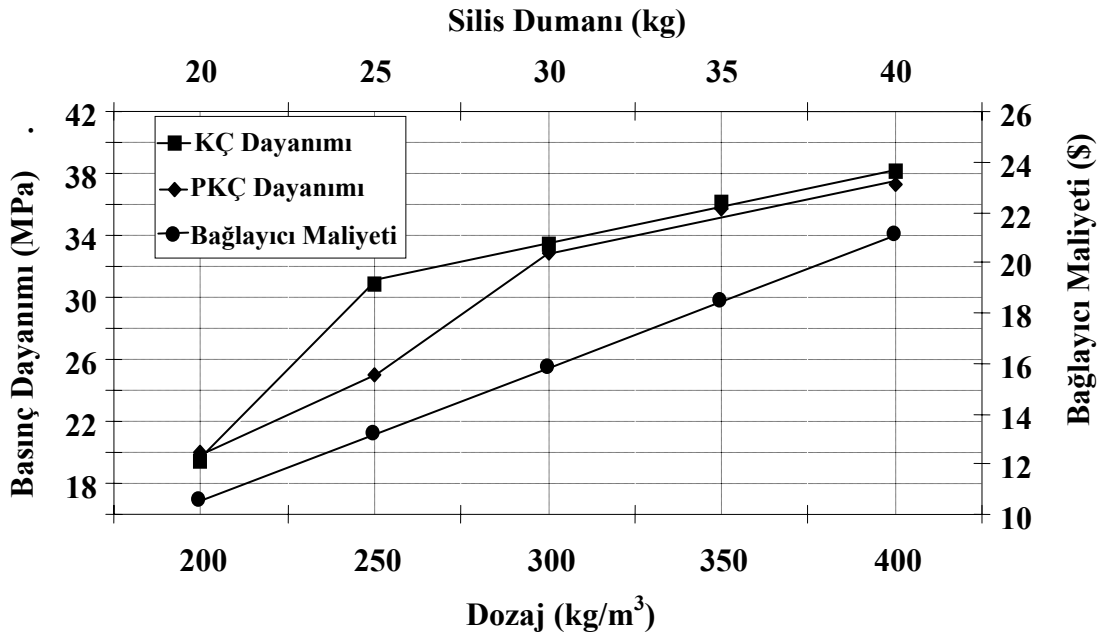
**Beton Maliyeti Analizi:** Elde edilen dozaj, SD miktarları ile fiyatlarını göz önünde tutularak maliyetler hesaplanmıştır. Maliyet hesabından sonra kontrol betonuna göre kâr miktarları çıkarılmıştır. Bulunan beton maliyetleri ve % kârları Çizelge 6'da verilmiştir.



Şekil 5. SD içermeyen 1 m<sup>3</sup> betonda dozaj, dayanım ve maliyet ilişkisi.

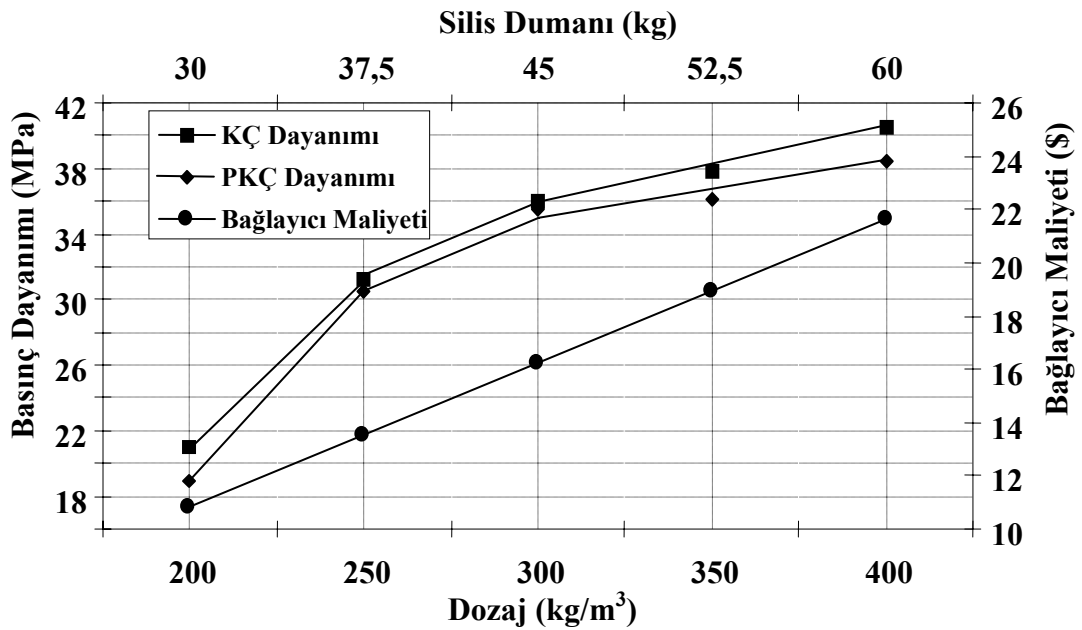


Şekil 6. % 5 oranında SD içeren 1 m<sup>3</sup> betonda dozaj, dayanım ve maliyet ilişkisi.



Şekil 7. % 10 oranında SD içeren betonda dozaj, dayanım ve maliyet ilişkisi.

**Beton Maliyetinin İrdelenmesi:** SD'lı betonun maliyetinin değerlendirilmesi kontrol betonlarına göre yapılmıştır. Çizelge 6'dan görüldüğü gibi her iki çimentoda da 300 ve 350 dozajlı betona dayanımı açısından denk SD betonlarında % 10 SD kullanımı ile en iyi sonuç elde edilmiştir. 400 dozajlı betonda ise silis dumanlı betonlarda % 15 SD kullanımı en iyi sonucu sağlamıştır (Şekil 5-8).



Şekil 8. % 15 oranında SD içeren betonda dozaj, dayanım ve maliyet ilişkisi.

**SD'nun Bağlayıcı Malzeme Maliyetine ve Dayanıma Etkisi:** Betonlarda SD'nın % 0, 5, 10 ve 15 oranlarında kullanımı ile beton dayanımı ve bağlayıcı malzeme maliyeti etkileşimi 1 m<sup>3</sup> için Çizelge 7'de verilmiştir.

**Çizelge 7.** Betonların dozaj-SD-dayanım-bağlayıcı malzeme ve maliyet ilişkisi [4]

Beton Kodu	Dozaj (kg)	SD (kg)	Basınç Dayanımı (MPa)		Bağlayıcı Maliyeti (\$)	Beton Maliyeti (\$)
			PKÇ/B 32.5R	KÇ 32.5		
200 S0	200	0	-	-	9.90	17.80
200 S5		10	17.6	19.2	10.21	18.21
200 S10		20	20.0	19.5	10.52	18.35
200 S15		30	18.9	21.0	10.83	18.59
250 S0	250	0	-	-	12.38	20.40
250 S5		12.5	26.1	28.7	12.76	20.89
250 S10		25	25.0	30.9	13.15	21.20
250 S15		37.5	30.5	31.2	13.54	21.50
300 S0	300	0	25.4	27.4	14.87	23.95
300 S5		15	27.7	30.1	15.35	24.41
300 S10		30	32.8	33.5	15.78	24.88
300 S15		45	35.5	36.0	16.25	25.34
350 S0	350	0	29.8	31.1	17.33	26.63
350 S5		17.5	32.3	33.7	17.87	27.18
350 S10		35	35.7	36.2	18.41	27.72
350 S15		52,5	36.1	37.9	18.96	28.26
400 S0	400	0	34.3	34.6	19.81	28.97
400 S5		20	35.5	35.0	20.42	29.94
400 S10		40	37.3	38.2	21.04	30.56
400 S15		60	38.5	40.5	21.66	31.18

**SD'nun Beton Maliyetine Doğrudan Etkisi:** PKÇ/B 32.5R ve KÇ 32.5 ile üretilen betonlara SD'nın % 5, 10 ve 15 oranında kullanımı ile beton maliyetinin etkilenmesi ve bu etkilenmeden dolayı maliyetin artması ile dayanım artış oranları Çizelge 8'de verilmiştir. Çizelgede her iki tür çimentoda da SD % 10 kullanılması ile maliyetler yaklaşık % 4 artar. Basınç dayanımları KÇ 32.5 ile üretilende 300 dozajda % 22, 350 dozajda % 16, 400 dozajda % 10, PKÇ/B 32.5R ile üretilen betonlarda ise 300 dozajda % 29, 350 dozajda % 19 ve 400 dozajda % 8 artış göstermektedir.

**Çizelge 8.** SD içerikli betonun maliyeti ile dayanımı arasında karşılaştırma [4]

Dozaj	SD (%)	Beton Maliyeti (\$/m <sup>3</sup> )	Maliyet Artışı	Dayanım Artışı (%)	
				KÇ 32.5	PKÇ/B 32.5R
300	0	23.95	-	-	-
300	5	24.41	1.9	10	12
300	10	24.88	3.9	22	29
300	15	25.34	5.8	31	39
350	0	26.63	-	-	-
350	5	27.18	2.0	8	8
350	10	27.72	4.1	16	19
350	15	28.26	6.1	21	21
400	0	28.97	-	-	-
400	5	29.94	2.1	1	3
400	10	30.56	4.3	10	8
400	15	31.18	6.3	17	12

## VII. SONUÇ VE ÖNERİLER

Silis dumanı betona uygun oranda katıldığında dayanımı arttırmaktadır. KÇ ile hazırlanan betonlar, PKÇ çimentolarına göre daha yüksek basınç dayanımları vermiştir. Dayanım artışı açısından 350 ve 400 dozajlı betonlarda % 10, 300 dozajlı betonlarda ise % 15 SD kullanılması uygundur. Dozaj sabit tutularak her % 5 SD dilimi ilavesi maliyeti % 2 oranında arttırmaktadır. Her iki çimento türünde de üretilen kontrol betonlarına dayanım açısından eşit SD'lı betonların, gerek bağlayıcı malzeme (çimento+SD) gerekse de beton maliyeti açısından değerlendirilmesinde ise en iyi sonucu SD'nın % 10 oranında kullanılması vermiştir. SD'nın % 10 kullanımı maliyetlerde % 4 artışa sebep olmaktadır. SD'nın % 10 kullanımı ile basınç dayanımları PKÇ'li 300 dozajlı betonlarda % 29, 350 dozajlı betonlarda % 19 ve 400 dozajlı betonlarda % 8, KÇ'li betonlarda 300 dozajlı betonlarda % 22, 350 dozajlı betonlarda % 16 ve 400 dozajlı betonlarda % 10 artış göstermiştir. 300 dozajlı kontrol betonunun verdiği dayanım SD'nın % 10 oranında kullanılması ile 235 dozajlı üretimle bağlayıcı malzeme maliyetinden yaklaşık % 17'lik tasarrufla, 350 dozajlı kontrol betonunun verdiği dayanım 254 dozajlı üretimle aynı dayanımı bağlayıcı maliyetinden yaklaşık % 23'lük tasarrufla, 400 dozajlı kontrol betonunun verdiği dayanım 325 dozajlı üretimle bağlayıcı maliyetinden yaklaşık % 14'lük tasarrufla elde edilmektedir.

## **KAYNAKLAR**

- [1] M. A. Yeğınobalı, “Silis Dumanının Beton Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi”, TMMOB İnşaat Müh. Odası, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, 1997, Ankara, Bildiriler Kitabı, ss. 149-167.
- [2] N. Ay, İ. B. Topçu, “Silikoferrokrom Baca Tozunun Betonda Kullanılması”, TMMOB İnşaat Müh. Odası, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Kasım 1993, Ankara, Bildiriler Kitabı, ss. 185-195.
- [3] N. Ay, İ. B. Topçu, “The Influence of Silicoferrochromium Fume on Concrete Properties”, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 2, pp. 387-394, 1995.
- [4] M. Kaval, “Silis Dumanının Hazır Betonda Kullanımının Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000, Eskişehir.
- [5] TS 12141, “Çimento-Portland Silika Füme”, TSE, Mart 1997, Ankara.
- [6] TS 3452, “Beton Kimyasal Katkı Maddeleri (Priz Süresini ayarlayan ve Karışım Suyunu Azaltan)”, TSE, Şubat 1984, Ankara.
- [7] TS 12143, “Çimento-Portland Kompoze”, TSE, Mart 1997, Ankara
- [8] TS 10156, “Çimento-Katkılı Çimento”, TSE, Nisan 1992, Ankara.
- [9] TS 706, “Beton Agregaları”, TSE, 1980, Ankara.
- [10] TS 707, “Beton Agregalarında Numune Alma ve Deney Numunesi Hazırlama Yöntemi”, TSE, 1980, Ankara.
- [11] TS 3529, “Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini”, TSE, 1980, Ankara.
- [12] TS 3526, “Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini”, TSE, Aralık 1980, Ankara.
- [13] T. Tonak, F. Sipahi, Y. Atay, “Elektrometalurji Sanayii Atık Ürünü Silis Dumanı'nın Çimento Üretiminde Kullanılması”, TMMOB İnşaat Müh. Odası, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, 1997, Ankara, Bildiriler Kitabı, ss. 169-183.