

HAZIR BETONDA SİLİS DUMANI KULLANIMININ SERTLEŞMİŞ BETON ÖZELİKLERİNE ETKİSİ

İlker Bekir TOPÇU¹, Mustafa KAVAL²

ÖZET: Hazır betonda yüksek performans elde etmek için mineral katkı olan silis dumanı kullanılması gereklidir. Betona uygun oranda silis dumanı katılması ve süper akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanılması sonucu yüksek performans elde edilir. Bu çalışmada iki farklı tip çimento ile 0.50 su/bağlayıcı ve % 1.6 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılarak; 300, 350 ve 400 dozlu silis dumanı kontrol betonları ve betonlar üretilmiştir. Üretilen betonların ultrases hızı, Schmidt sertliği ve rezonans frekansı gibi hasarsız deneyleri ile 28 günlük silindirik basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Her iki çimento türünde de yapılan deneyler % 15 oranında silis dumanı kullanılmasının en uygun sonucu verdiğini göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Beton, Silis Dumanı, Dayanım.

INFLUENCE OF SILICA FUME ON HARDENED READY-MIXED CONCRETE PROPERTIES

ABSTRACT: Use of silica fume as an additive is necessary to obtain high performance ready-mixed concrete. High quality and economical concrete can be produced with adding silica fume and superplasticizer in appropriate ratios in the mixtures. In this study, two different types of cement were used with 0.50 water/binding and 1.6 % superplasticizer. Control series were produced with cement contents of 300, 350 and 400 kg/m³ 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/m³. The non-destructive and destructive tests were carried out on hardened cylindrical concrete specimens 28 days after the production. Use of a 15 % silica fume in mixtures resulted the most proper solution.

KEYWORDS: Concrete, Silica Fume, Strength.

¹ Osmangazi Üniv., Müh.-Mim. Fak., İnş. Müh. Böl., 26480 Batı Meşelik ESKİŞEHİR.

² Kocatepe Üniv. Çay Meslek Yüksek Okulu, Çay, AFYON.

I. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde çeşitli ürünlerin üretimleri sırasında meydana gelen atıkların değerlendirilmesi üzerine yoğun olarak çalışılmaktadır. Atıklar ya yeni ürünlerin elde edilmesinde yada mevcut ürünlerde katkı olarak kullanılmaktadır. Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi'nde silikoferrokrom üretimi esnasında baca gazları ile beraber ortamı terk eden tozlar değerlendirilmek amacıyla filtrelerde toplanmaktadır. Bu tozların toplanmasında ilk amaç çevre kirliliğini önlemek, ikincisi ise tozların değerlendirilip ekonomiye kazandırılmasıdır [1-4]. Silis dumanlarının yüksek puzolonik aktivitelerinden dolayı betonda kullanımı son yıllarda oldukça yaygın hale gelmiştir. Özellikle dayanıklılığın da önemli olduğu yüksek performanslı betonlarda SD'lı çimento veya betonlar yaygın olarak kullanılmaktadır. SD'nın beton özellikleri üzerindeki yararları yanında ekonomik ve ekolojik yararları da vardır [4].

SD betonlar süperakışkanlaştırıcılar ile beraber kullanılmak suretiyle yüksek performans verirler [5]. Bazı araştırmacılara göre SD'nın beton basınç dayanımını artırmasının nedeni agrega-hamur geçiş bölgelerini kuvvetlendirmesine bağlanmaktadır. Diğer taraftan inceliğinden dolayı daha sıkı ve kaliteli bir çimento hamuru oluşturduğu öne sürülmektedir. 1984 yılında Kanada Montreal'de yapılan La Laurentienne Building'de S/B oranı 0.27 olan SD'lı betonlarda 28. günde 93, 91. günde ise 107 MPa'lık dayanımlar elde edilmiştir. Malhotra ve Jahren, SD'nın beton dayanımı üzerindeki etkisinin uçucu kül ve cüruf gibi atıklardan daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Eşdeğerlik faktörü, (K), uçucu küllerde genel olarak 1 değerini ancak 90 günlük dayanımlarda yakalayabilirken SD ile 7 ve 28 günlük dayanımlarda bu değer 2~5 arasında olmaktadır. Diğer bir deyimle 1 kg SD 2~5 kg çimentoya eşdeğer sayılmaktadır. Cong vd'ne göre, beton dayanımının artırılmasında SD en önemli bir unsurdur. SD, hamur-agrega ara geçiş bölgelerini tıkayarak betonları daha yüksek dayanımlı yapmaktadır. Laamanen vd, % 8 SD'lı betonlardan yüksek sıcaklığa maruz kalanlarında dayanımların düştüğünü gözlemişlerdir. Malolepszy ve Deja, % 5-10 SD'lı harçlarda dayanımların kür koşullarından etkilendiğini gözlemişlerdir. Hava kürünün dayanımlarda % 40'a varan azalmalara neden olduğu, bu etkinin eğilmede çekme dayanımlarından daha fazla olduğu da görülmüştür [6]. SD'lı yüksek performanslı betonlar (YPB) otobanlar, köprü kirişleri, köprü payanda ve mesnetleri, barajlar gibi

kısa sürede bozulma istenmeyen ve uzun vadeli performans aranan beton yapılarda kullanılmaktadır. Aynı zamanda deniz suyu ve endüstriyel kirlilik gibi çevre zararları söz konusu olan yerlerde de yüksek performanslı betonlar (YPB) çok uygundur [7].

Betonda 28 günlük dayanım Bolomey denklemi ile $f_{c28} = K R_{c28} (C/(W+V)-0.5)$ şeklinde hesaplanır. Formülde, C çimento ağırlığı, W su ağırlığı, V hava hacmi, K agregaya bağlı olan bir çarpan ve R_{c28} çimentoların 28 günlük standart basınç dayanımıdır. SD'lı betonlarda bu eşitlik $f_{c28} = K R_{c28} (1/\rho_c) (L(W+V))$ ile hesaplanır. $L = C + \alpha(SD/c) C$ 'dir. Burada ρ_c bağlayıcının relatif yoğunluğu, L etkili bağlayıcı miktarıdır [8]. YPB'larda deneysel olarak bulunmuş $f_t = k (f_c)^{0.5}$ MPa denklemi eğilme dayanımını tahmin etmek için kullanılır. ACI, k değeri için 620 ve 970'i önerir. E-modülü ise $E_c = 4730 (f_c)^{0.5}$ MPa ile hesaplanır. ACI komite 363, yukarıdaki denklemin 41.3 MPa üzerindeki dayanımlar için abartılı olduğunu rapor etmiş, bu nedenle 82.7 MPa'ya kadar olan dayanımlar için $E_c = 3320 (f_c)^{0.5} + 6890$ MPa ile hesaplamayı önermiştir [9, 10].

II. AMAÇ

Henüz yaygın olarak kullanılmayan SD'nın hazır betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılması ile daha kaliteli ve ekonomik beton elde edilmesi yanında özellikle canlı sağlığını tehdit edip, çevre kirlenmesine yol açan atıkların kullanıma yöneltmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada hazır betonda yaygın olarak kullanılan PKÇ ve KÇ çimentolarından çeşitli dozajlarda SD'sız ve SD'lı süperakışkanlaştırıcı (SA) içeren betonlar üretilmiş, hazır betonda ve prefabrikasyonda SD'nın mineral katkı olarak kullanılmasının sertleşmiş beton özelliklerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca iki farklı çimento türü üç farklı dozajda birbirleri ile karşılaştırılarak; hangi dozajda, hangi oranda SD katılması durumunda en iyi verim alındığına karar verilmiştir [11]. Araştırmada ayrıca taze beton özellikleri de incelenerek SD'lı betonların işlenebilirlikleri de belirlenmiş, bunların sonuçları beton bileşimlerini de vererek başka bir makalede verilmiştir. Sertleşmiş betonlarda yapılan hasarsız deneylerle SD'lı betonlarla yapılmış binalarda kalite kontrolü açısından dikkate alınabilecek kıstaslar belirlenmeye çalışılmıştır. SD yeterli miktarda bulunabildiğinde hazır betonda yaygın olarak kullanılabilme alanı bulacak ve yüksek dayanımlar ekonomik olarak elde edileceklerdir.

III. SİLİS DUMANI (SD)

Silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde yan ürün olarak elde edilen SD'nın değerlendirilmesi konusunda ilk çalışma 1952'li yıllarda Norveç'te başlamıştır. Bu konudaki uygulama ve çalışmalar daha çok İskandinav ülkelerinde 1980'li yıllara kadar yavaş gelişmiştir. 1983 yılında yapılan uçucu kül, SD ve cüruf gibi yan ürünlerin betonda kullanımını konu alan uluslararası konferanslar dizisi büyük bir ilgi görmüş ve 1992 yılında yapılan konferans İstanbul'da gerçekleşmiştir [12].

SD yüksek saflıkta kuvarsitin silisyum veya ferrosilisyum alaşımı elektrik ark fırınlarında kok kömürü ile indirgenmesi sonucu elde edilen genellikle 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 SiO₂ içermektedir. Alaşım fırınlarından elde edilen tozlar da SD olarak nitelenmekle beraber kimyasal bileşimleri biraz farklı, silis oranları biraz düşük olabilmektedir. Çoğunlukla küresel olan SD 0.1µ civarında ölçülen ortalama çapları ile çimento tanelerinden yaklaşık 100 kere daha küçüktürler. Bileşimindeki yüksek silis oranı bu dumanları aktif bir puzolan yapmakta, fakat çok fazla olan incelik belirli bir kıvam için gerekli su miktarını arttırmaktadır [12]. Etibank Elektrometalurji İşletmesi'nin Antalya'daki tesislerinde elde edilen ferrosilisyum (FeSi) ve silikoferrokrom (SiFeCr) fırınlarında özel filtreli toz tutucularla elde edilen SD'larının fiyat, satış şekli ve üretim kapasitesi hakkında alınan bilgiler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Silis dumanlarının fiyat, satış şekli ve üretim kapasitesi [11]

Silis Dumanı	Torba Ebadı (cm)	Torba Ağırlığı (kg)	Fiyatı (\$/Ton)	Üretim (Ton/Gün)	Üretim (Ton/Yıl)
FeSi ve SiFeCr	60x80x100	50	31	2.6	360-400

TS 12141 standardı [13] ile SD'lı çimento üretimine izin verilmiştir. Antalya'da elde edilen SD'ları doğal puzolan veya uçucu kül ile karşılaştırıldığında, yüksek SiO₂ içeriği, sabite yakın kimyasal bileşimi, çok düşük safsızlığı, camsı fazı ve oldukça yüksek inceliği nedeniyle beton üretimi için çok uygun bir mineral katkıdır.

IV. DENEYSEL ÇALIŞMA

Kullanılan Malzemeler

Mineral katkı: Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesinden sağlanan (FeSi) SD kullanılmıştır. Deneylede kullanılan ferrosilisyumun (FeSi) fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Deneylede kullanılan SD ve çimentoların özellikleri [11]

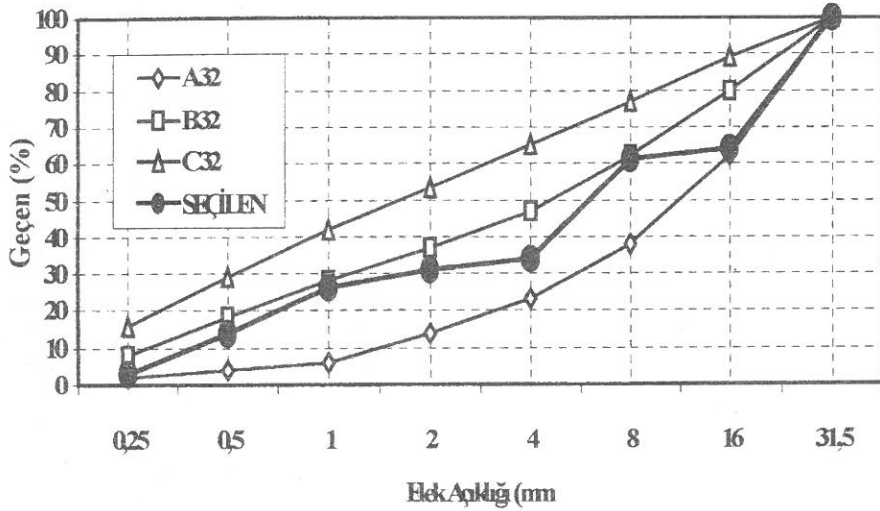
Malzeme Türü	Çimento		SD
	PKÇ/B 32.5R	KÇ 32.5	FeSi
Kimyasal Bileşim (%)			
SiO ₂	31.53	28.61	94.94
Al ₂ O ₃	7.06	6.34	0.70
Fe ₂ O ₃	3.29	2.81	0.60
CaO	48.89	52.83	0.83
MgO	1.46	2.26	0.71
SO ₃	2.01	2.78	0.21
Kızdırma Kaybı	4.55	2.14	-
Tayin Edilemeyen	0.05	0.50	1.48
Çözülme Kalıntı	0.27	0.29	2.16
Fiziksel Özellikler			
Özgül Ağırlık (t/m ³)	2.85	2.96	2.36
Özgül Yüzey (m ² /kg)	3574	3948	-
Basınç Dayanımları (MPa)			
2 Günlük	12.8	13.2	-
7 Günlük	26.9	25.2	-
28 Günlük	42.5	38.4	-
Elek Analizi (mm)			
+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	-

Süperakışkanlaştırıcı Katkı: Karışımlarının tamamında toplam bağlayıcı miktarının % 1.6’sı kadar, TS 3452’ye [14] göre sınıfı F tipi olan Sikament FF-N kullanılmıştır. Sikament FF-N süperakışkanlaştırıcı ve su azaltıcı katkı maddesi olarak kullanılmıştır.

Çimento: ESÇİM Anonim Şirketi, Eskişehir Çimento Fabrikasının üretimi olan, TS 12143’nolu [15] TSE standartlı Portlant Kompoze Çimento 32.5 (PKÇ/B 32.5R)

çimentosu ve Set Çimento anonim Şirketi, Afyon Çimento Fabrikasının üretimi olan, TS 10156'nolu [16] TSE standarth Katkılı Çimento 32.5 (KÇ 32.5) çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentolara ait özellikler Çizelge 2'de verilmiştir.

Agrega: Eskişehir-Osmaneli kumu ve Söğüt Zemzemiye kırmataşları kullanılmıştır. En büyük tane boyutu 31.5 mm'dir. Agreganın granülometri eğrisi Şekil 1'de verilmiştir. Agregaların karışım granülometrisi TS 706 elek sistemi [17] ve TS 707'de [18] belirtilen referans eğrilerine uygun olarak yapılmıştır. Agreganın birim ağırlığı TS 3529 [19], özgül ağırlığı ise TS 3526'ya [20] göre her karışım için bir deneme yapılmıştır.



Şekil 1. Kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi.

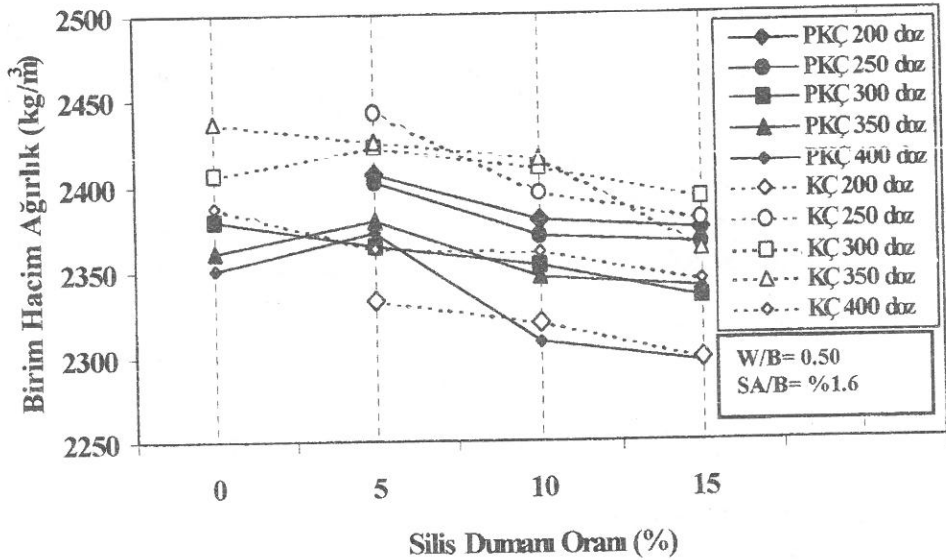
Üretilen Beton Tipleri ve Deneyler: Deneylerde üretilen kontrol betonları PKÇ/B 32.5R ve KÇ 32.5 çimentolarından 300, 350 ve 400 dozlu, SD'sız ve çimento ağırlığının % 1.6'sı kadar sikament FF-N SA kullanılarak elde edilmiştir. Aynı tür çimentolardan 200, 250, 300, 350 ve 400 dozlu, her doz için çimento ağırlığının % 5, 10 ve 15'i SD ve bağlayıcı (çimento+SD) miktar ağırlığının % 1.6'sı kadar sikament FF-N süperakışkanlaştırıcı kullanılarak SD'lı betonlar elde edilmiştir. Çalışmada üretilen 36 seri betonun her birinden 3'er adet alınan 150x300 mm boyutunda silindir numunelerinde ultrases hızı, Schmidt sertliği, rezonans frekansı ve 28 günlük silindir basınç dayanımı gibi sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır [11].

V. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Üretimden 28 gün sonra birim ağırlık, ultrases hızı, rezonans frekansı, Schmidt sertliği ve silindir basınç dayanımı deneyleri yapılmış ve sonuçları aşağıda değerlendirilmiştir.

V.1. Birim Hacim Ağırlık Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Numunelerin boyutları ölçülerek ve tartıldıktan sonra ağırlıkları hacimlerine bölünerek kuru birim ağırlıkları belirlenmiştir. Bu deney TS 2941 esasına göre 150x300 mm'lik silindir numuneler üzerinde her karışımdan üç numune alınarak yapılmıştır. Şekil 2'den de görüleceği gibi, PKÇ'li 200, 250 ve 300 dozlu betonların birim ağırlıklarında SD oranı artışı ile azalma görülmektedir. 200 dozda % 1.33, 250 dozda % 1.5 ve 200 dozda % 1.9 oranında SD'ndan dolayı azalma olmuştur.

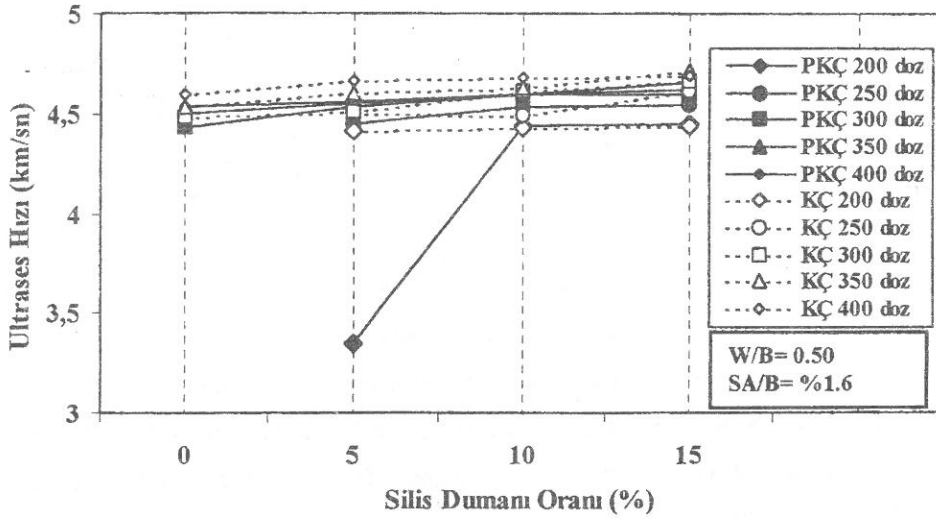


Şekil 2. Birim hacim ağırlık-SD oranı ilişkisi.

Üretilen 350 ve 400 doz betonlarda ise birim hacim ağırlıklarda, % 5 SD ile önce bir artış ve % 10 ve 15 SD ile ise azalma olmaktadır. 350 dozda % 1.7, 400 dozda ise % 3.2'lik oranlarında SD'ndan dolayı azalma meydana gelmektedir. KÇ'li betonlarda her farklı dozajda birim ağırlıklarda SD oranı artışına bağlı olarak sürekli azalma vardır. Bu azalma oranı doğrusal olarak kabul edilecek olursa 200 dozda % 1.5, 250 dozda % 2.6, 300 dozda % 1.2, 350 dozda % 3 ve 400 dozda ise % 1.8'lik SD'ndan dolayı azalma meydana geldiği görülür.

V.2. Ultrases Hızı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Titreşim frekansı 20 KHz'den fazla olan ses dalgalarına ultrases denir. Ultrases hızı beton yoğunluğuna bağlı bir özellik olan basınç dayanımı arasında ilişki kurmamızı sağlar. Bu deney silindir numuneler üzerinde, her karışım için üç numune yapılmıştır.

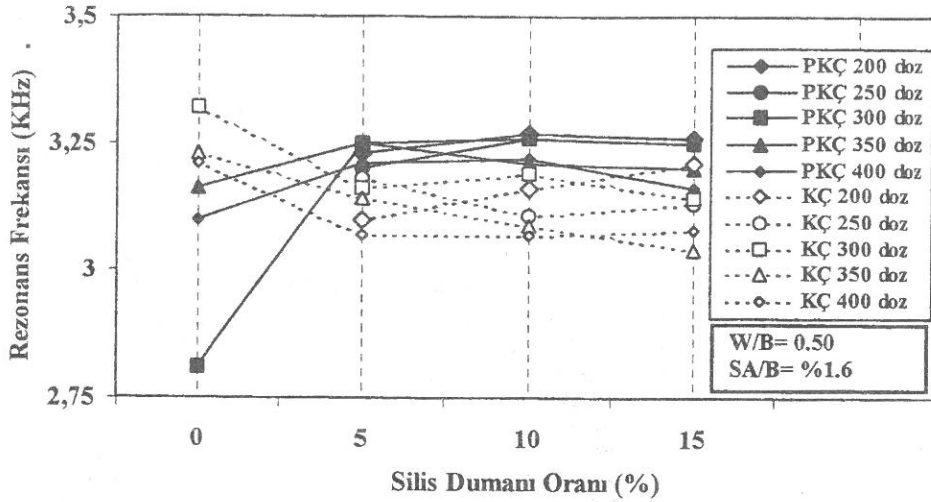


Şekil 3. Ultrases hızı-SD oranı ilişkisi.

PKÇ ile üretilen betonlarda Şekil 3'e bakıldığında ultrases hızı her dozajda SD oranı ile yaklaşık doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu artış doğru orantılı olarak kabul edilecek olursa 250 dozda % 2, 300 dozda % 3.6, 350 dozda % 2.7 ve 400 dozda % 2.7'lik SD'ndan dolayı artış gerçekleşmiştir. KÇ ile üretilen betonlarda ultrases hızı sonuçlarının PKÇ'li betonlardan pek farklı olmadığı, SD'ndan dolayı ultrases hızının artışı görülmektedir. SD'ndan dolayı 200 dozda % 0.7, 250 dozda % 2.4, 300 dozda % 4, 350 dozda % 4 ve 400 dozda % 22'lik artış gözlenmektedir.

V.3. Rezonans Frekansı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

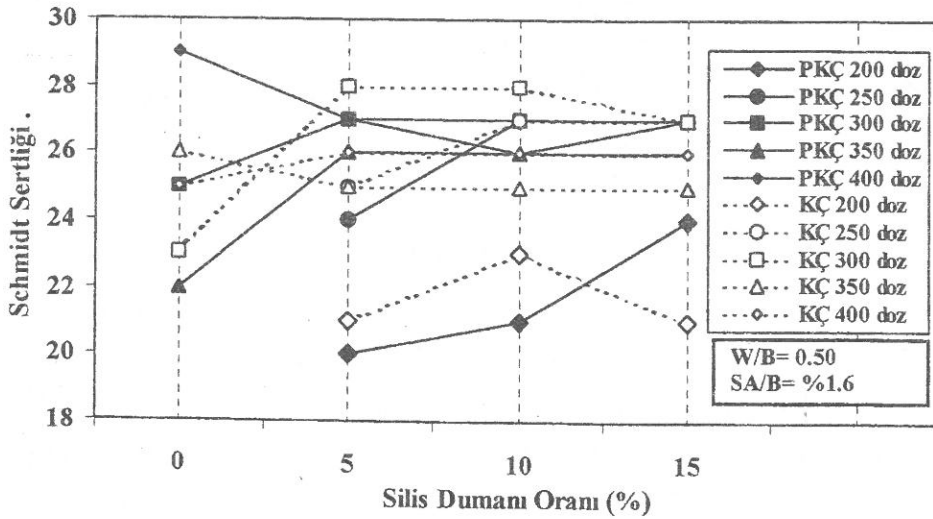
Silindir numunelerde iki farklı çimento ve farklı dozajlar için bulunan rezonans frekansı değerlerinin değişimleri Şekil 4'te gösterilmiştir. PKÇ ile üretilen betonlarda sabit dozajda SD oranındaki değişime SD içermeyen 300 dozlu beton hariç birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Rezonans frekansı değerinde önce artış, sonra azalma meydana gelmektedir. Bu artış 200, 250, 300 ve 400 dozlu betonlarda % 10 SD kullanılması ile, 350 dozlu betonda ise % 5 SD kullanılması ile en yüksek değerine ulaşmakta, daha



Şekil 4. Rezonans frekansı-SD oranı ilişkisi.

sonra bir azalma gözlenmektedir. KÇ ile üretilen betonlarda sabit dozajda SD oranının değişmesi 350 dozlu betonda SD oranının artması ile doğrusal bir azalma görülmekte, 200 dozlu beton ise doğrusal bir artma gözlenmektedir. Diğer dozajlarda ise bir azalma olduğu fakat bunun doğrusal olmadığı belirlenmiştir. KÇ ile üretilen betonların rezonans frekans değerlerinin, PKÇ ile üretilen betonların rezonans frekansı değerlerine göre daha küçük olduğu görülmektedir.

V.4. Schmidt Sertliği Sonuçlarının Değerlendirilmesi

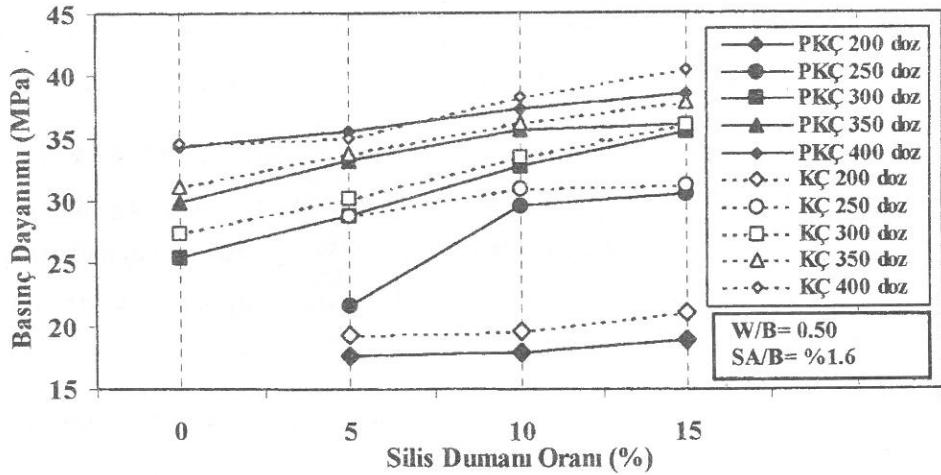


Şekil 5. Schmidt sertliği-SD oranı ilişkisi.

Basınç presinde sabit bir değerde yüklü iken Schmidt çekici ile yüzeylerine onar vuruş yapılarak üç farklı numunede belirlenen sertlik değeri sonuçlarının SD oranı ile değişimi Şekil % 5'te verilmiştir. PKÇ ile hazırlanan betonlarda 400 dozlu betonda SD oranının artması ile çok az bir düşüş olmasına rağmen, diğer dozajlarda ise önemli bir değişme olmamıştır. SD 400 dozlu beton hariç bütün dozajlarda yüzey sertliğini az da olsa artırmıştır. 250, 300, 350 ve 400 dozlu betonlarda SD oranının % 5'den fazla kullanılması yüzey sertliğini değiştirmemiştir. KÇ ile üretilen betonlarda dozajın sabit kalması ve SD'nin artması durumdaki değişimler Şekil 5'te değerlendirilmiştir. 250 ve 300 dozlu betonlarda SD oranının artması ile yüzey sertliği artmış, 350 ve 400 dozlu betonlarda SD'nin etkisi olmamış, 200 dozda ise SD'nin % 10 kullanılması durumunda en iyi sonuç elde edilmiştir. KÇ ve PKÇ ile üretilen betonların yüzey sertlikleri birbirine yakındır. Yani çimento cinsi yüzey sertliğine 28 gün zarfında etkili olmamaktadır.

V.5. Basınç Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deneyde Bucem Delta marka 200 ton kapasiteli otomatik pres kullanılmıştır. Yükleme yapılmadan önce numunelerin kompasla boyutları ölçülmüş, presteki yükleme hızı 3.5 ton/sn olacak şekilde yükleme uygulanmıştır. Yük artışı durduğunda ve yük düşmeye başladığı anda cihazın dijital göstergesinde kg cinsinden okunan bu değer, numunenin yüzey alanına bölünerek basınç dayanımı bulunmuştur.



Şekil 6. Basınç dayanımı-SD oranı ilişkisi.

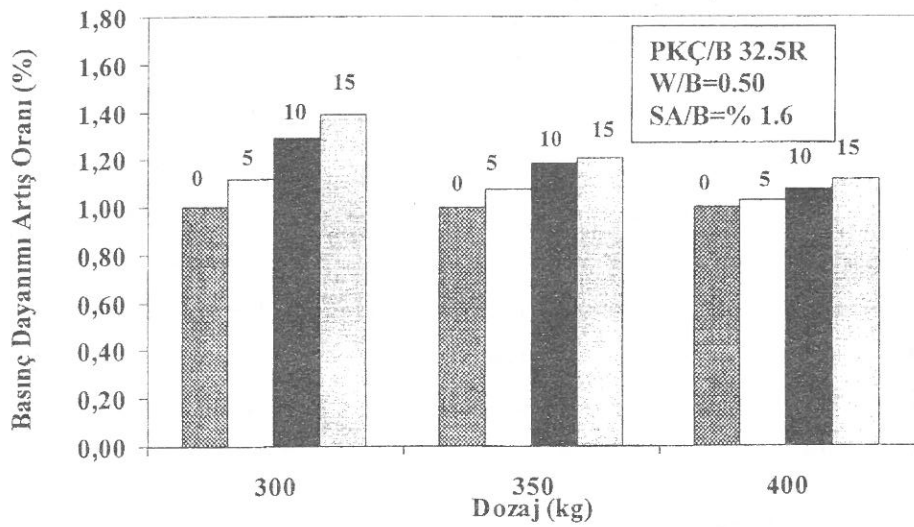
PKÇ ile hazırlanan betonlarda SD'nin artması ile (her egride dozaj sabit) basınç dayanımı da doğrusala yakın bir şekilde artmıştır. Şekil 6'da da açıkça görüldüğü gibi SD ile basınç dayanımı artmaktadır. Örneğin BS 30 betonu hedeflenirse, SD'sız 350 dozda 29.8 MPa iken, SD % 10 oranında 250 dozda 29.6 MPa elde edilmiştir. Yani 1 m³ betonda 100 kg çimento tasarrufu 25 kg SD kullanarak gerçekleştirilebilmektedir.

KÇ ile hazırlanan betonlarda SD oranının artması ile sabit dozajda basınç dayanımı da PKÇ ile hazırlanan betonlarda olduğu gibi doğrusal orana yakın bir şekilde artmıştır. SD kullanımı ile basınç dayanımı artmıştır. Örneğin SD katkısız 400 dozlu betonda 34.6 MPa iken aynı dozajda % 5 SD ile 35 MPa'ya, % 10 SD ile 38.2 MPa'ya ve % 15 SD ile 40.5 MPa'ya ulaşmaktadır. Burada da görüleceği gibi SD'nin % 10 oranında kullanılması ile en fazla artış gerçekleşmiştir. Sonuçta her iki tür çimento ile üretilen betonlarda SD oranına göre etkilenme birbirine çok yakın olmasına karşılık KÇ ile üretilen betonlar genelde basınç dayanımı bakımından daha iyi sonuç vermiştir.

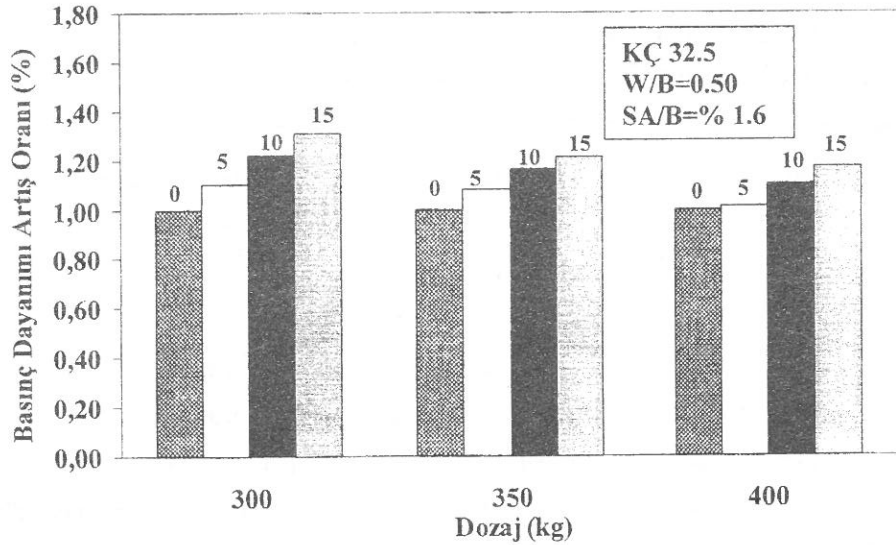
SD'nin dayanımındaki etkisini daha iyi görebilmek için kontrol betonları baz alınarak artış oranına bakılması daha doğru olacaktır. PKÇ'li betonlar için Şekil 7'de ve KÇ'li betonlar için Şekil 8'de dayanım artış oranları görülmektedir. PKÇ'li betonlarda basınç dayanımı artış oranı ile SD arasındaki ilişki SD'sız kontrol betonları baz alındığında, 300 dozda SD sırasıyla % 5, 10 ve 15 kullanılması halinde sırasıyla % 12, 29 ve 39'lük artışlar gerçekleşmiştir. Dozaj arttıkça dayanım artış oranları da düşmektedir. Örneğin SD oranları 350 dozda kullanıldığında dayanım artış oranı sırasıyla % 8, 19 ve 21 iken, 400 dozda basınç dayanımı artış oranı sırasıyla % 3, 8 ve 12 olarak gerçekleşmiştir.

KÇ ile üretilen betonlarda dayanım artış oranı ile SD arasındaki ilişki SD'sız kontrol betonları baz alındığında, 300 dozda SD sırasıyla % 5, 10 ve 15 kullanıldığında, yine sırasıyla % 10, 22 ve 31'lik artışlar gerçekleşmiştir. Dozaj arttıkça dayanım artış oranları da düşmektedir. Aynı SD oranları 350 dozda dayanım artış oranı sırasıyla % 3, 6 ve 21 iken, 400 dozda aynı artışlar sırasıyla % 1, 10 ve 17 olmuştur.

Çimento türünün etkisi artış oranları açısından karşılaştırıldığında; 400 dozlu betonlar hariç basınç dayanım artış oranı açısından PKÇ ile hazırlanan betonların KÇ ile hazırlanan betonlardan daha iyi bir sonuç verdiği görülmüştür.



Şekil 7. PKÇ/B 32.5R'li betonlarda dayanım artış oranı-SD oranı ilişkisi.



Şekil 8. KÇ 32.5'li betonlarda dayanım artış oranı-SD oranı ilişkisi.

VI. İRDELEME

PKÇ ile hazırlanan betonlarda SD oranı % 10 sabit iken dozajın artması ile sertleşmiş birim ağırlık 2380 kg/m^3 'ten 2309 kg/m^3 'e düşmüştür. KÇ'li betonlarda ise SD oranı % 10 olarak sabit iken dozajın artması ile sertleşmiş birim ağırlık 2320 kg/m^3 'ten 2361 kg/m^3 'e çıkmıştır. PKÇ ile hazırlanan betonda dozajın sabit kalması ve SD oranının artması ile sertleşmiş birim ağırlık değerleri azalmıştır. Örneğin 300 dozlu betonda 2380 kg/m^3 'ten 2335 kg/m^3 değerine düşmüştür. KÇ ile hazırlanan betonda dozajın sabit kalması ile tüm farklı oranlarda SD ilavelerinde sertleşmiş birim ağırlıklarda düşüş gözlenmiştir. Örneğin 300 dozlu betonda 2406 kg/m^3 'ten 2392 kg/m^3 'e düşmüştür. Sertleşmiş birim ağırlık açısından KÇ ile hazırlanan beton PKÇ ile hazırlanan betona göre hem daha yüksek ve hem de düşüş miktarı daha az olmuştur.

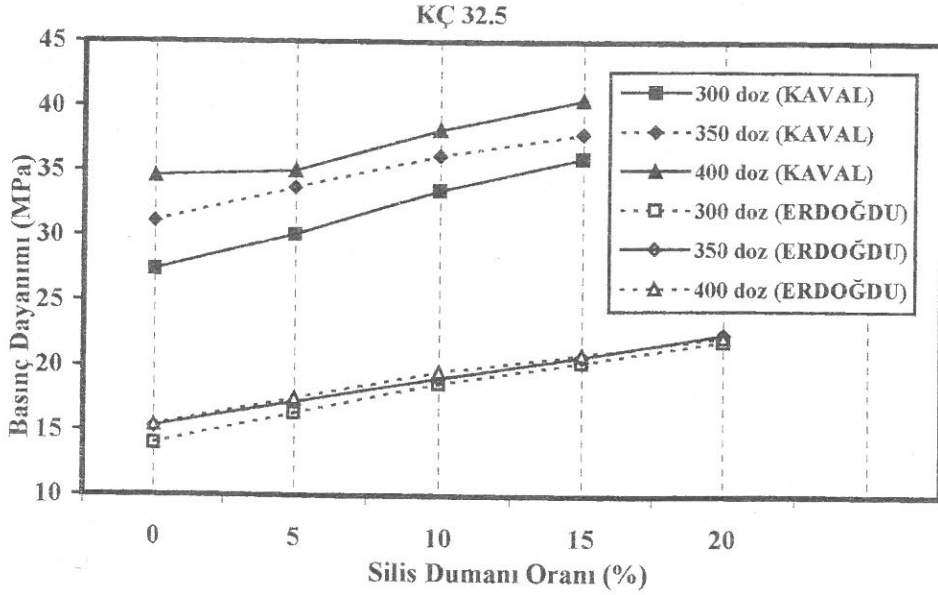
Her iki çimento ile üretilen betonlarda dozajın veya SD oranının artması ile ultrases hızı değerleri de artmıştır. Bu da dozajın ve SD'nin betonun içindeki boşlukları azalttığını göstermekte, dolayısıyla basınç dayanımının artmasına neden olmaktadır. PKÇ ve KÇ ile üretilen betonlardan 250 doz ve % 5 oranındaki SD'nin altındakilerde ultrases hızı 3.5-4.5 km/sn olduğu için beton kalitesi iyi, üstündekilerde ise 4.5 km/sn'nin üzerinde olması nedeniyle beton kalitesinin çok iyi olduğu söylenebilir. KÇ ile üretilen betonların ultrases hızı sonuçları PKÇ ile üretilen betonların ultrases hızlarından daha yüksek çıkması nedeniyle KÇ ile üretilen betonların daha iyi olduğu söylenebilir. İki farklı çimento ile üretilen betonların rezonans frekansında SD oranının artması ile az da olsa bir düşme olmakta, SD'nin sabit kalması dozajın artması ile düşüş görülmemektedir. SD'nin rezonans frekansına fazla bir etkisi olmadığı söylenebilir.

PKÇ ile üretilen betonlarda Schmidt sertliği SD oranı % 5 sabit iken 300 dozda 27 değerine ulaşmakta, dozajın artması durumunda ise artış görülmemektedir. Schmidt sertliği değeri dozajın sabit kalması durumunda SD oranı % 5 olarak kullanılması halinde 300, 350 ve 450 dozlu betonlarda 27'ye ulaşmakta, SD oranı artırılması halinde ise sabit kalmaktadır. KÇ ile üretilen betonlarda durum PKÇ ile üretilenlerden pek farklı değildir. Ancak Schmidt sertliği değeri 26'da kalmaktadır. Sonuç olarak Schmidt sertliği için SD % 5 oranında kullanılırsa yeterli yüzey sertliğine ulaşılabilenkte, SD oranının artırılması da bu sonucu değiştirmemektedir.

Basınç dayanımı ile ilgili yapılan deneylerde PKÇ ile hazırlanan numunelerde; 300 doz üretimlerinde kontrol betonunda basınç dayanımı 25.4 MPa iken; % 5 SD kullanımıyla 28.7 MPa'ya, % 10 SD kullanımıyla 32.8 MPa'ya, % 15 SD kullanımıyla 35.5 MPa'ya çıkmıştır. Yine 350 dozlu betonlarda SD oranı sırasıyla % 0, 5, 10 ve 15 kullanılması durumunda basınç dayanımı sırasıyla 29.8, 32.3, 35.7 ve 36.1 MPa'ya çıkmıştır. 400 dozda ise sırasıyla aynı oranda SD kullanılması halinde sırasıyla 34.3, 35.5, 37.3 ve 38.5 MPa'ya ulaşılmıştır. Buradan da görüleceği gibi düşük dozlarda SD'nin etkisi daha fazla olmaktadır. SD % 5, 10 ve 15 kullanılırsa basınç dayanımlarındaki artış oranları; 300 dozlu betonlarda % 12, 29 ve 39, 350 dozlu betonlarda % 8, 19 ve 21 ve 400 dozlu betonlarda % 3, 8 ve 12 olarak gerçekleşmektedir. En iyi sonuçlar SD'nin % 15 oranında kullanılmasıyla elde edilmektedir.

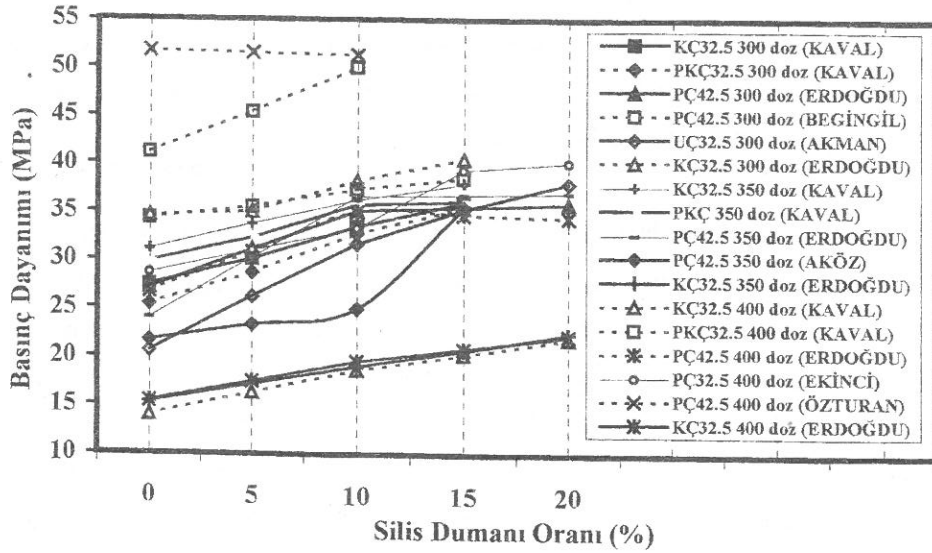
Basınç dayanımı ile ilgili yapılan deneylerde KÇ'li numunelerde 300 dozlu kontrol betonunda 27.4 MPa iken; % 5 SD kullanımında 30.1 MPa'ya, % 10 SD kullanımında 33.5 MPa'ya, % 15 SD kullanımında 36.0 MPa'ya çıkmıştır. 350 dozlu betonlarda SD oranı sırasıyla % 0, 5, 10 ve 15 kullanılması durumunda basınç dayanımı sırasıyla 31.1, 33.7, 36.2 ve 37.9 MPa'ya çıkmıştır. 400 dozda ise sırasıyla aynı oranda SD kullanılması halinde sırasıyla 34.6, 35.0, 38.2 ve 40.5 MPa'ya ulaşılmıştır. Buradan da görüleceği gibi düşük dozlarda SD'nin etkisi daha fazla olmaktadır. SD % 5, 10 ve 15 kullanıldığında dayanımlardaki artış oranları; 300 dozda % 10, 22 ve 31, 350 dozda % 8, 16 ve 21 ve 400 dozda % 1, 10 ve 17 olarak gerçekleşmektedir. En iyi sonuçlar SD'nin % 15 oranında kullanılmasıyla elde edilmekte ve artış oranlarından da anlaşıldığı gibi düşük dozda daha fazla olmaktadır.

SD'nin mineral katkı olarak betonlarda kullanılması durumunu karşılaştırmak için daha önce yapılmış çalışmaların sonuçları ile birlikte değerlendirilmesi aşağıda açıklanmıştır. Şekil 9'da yapılan kaynak araştırmasında sadece KÇ 32.5 çimentosu ile üretilmiş betonlara ait basınç dayanımları ile bu çalışmada bulunan sonuçlar verilmiştir. Şekil 9'da görüleceği gibi Erdoğan vd'nin [4] yaptığı üretim ile bu üretim arasında basınç dayanımı farkı olmasına rağmen, dayanım artış oranları bir uyum içerisinde gerçekleşmiştir. Diğer yapılan çalışmalarda çimento türü farklıdır. Bu tür çalışmaların değerlendirilmesi ise 300, 350 ve 400 dozlar için Şekil 10'da incelenmiştir.



Şekil 9. KÇ'li betonlarda basınç dayanımlarının önceki çalışmalarla karşılaştırılması.

Şekil 10'da çimento türlerinin farklı olması nedeni ile her tür üretimin SD içermeyen betonunun basınç dayanımı göz önünde tutulması durumunda bulunan sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu şekillerden de anlaşılacağı gibi çimento türünün değişmesi ile dayanımında da değişimler olmaktadır. Şekil 10'da 300 dozla



Şekil 10. Basınç dayanımlarının daha önceki çalışmalarla karşılaştırılması.

üretilen çalışmada basınç dayanımlarının, Erdoğan vd [4] ve Akman'ın [21] sonuçlarına yakın çıktığı görülmektedir. Begimgil vd'nin [22] yaptığı çalışmanın sonuçlarının fazla çıkmasının nedeninin çimento türünün farklı (PÇ 42.5) olmasındandır. 350 dozla üretilen çalışmada basınç dayanımları kontrol betonlarına göre değerlendirildiğinde sonuçlar oldukça uyumlu çıkmış ancak Aköz vd'nin [23] yaptığı çalışmada SD oranının % 15 kullanılması durumunda oldukça büyük artış olmuştur. 400 dozla üretilen çalışmanın sonuçları dayanım açısından Ekinci [6] ve Erdoğan vd'nin [4] sonuçlarına çok yakın çıkmıştır. Özturan vd'nin [24] yaptığı çalışmanın sonuçlarının fazla çıkmasının nedeni çimento türünün farklı (PÇ 42.5) olması olabilir.

VII. SONUÇ

SD oranının artması ile birim ağırlıklarda azalma olmuştur. SD oranının artması ile ultrases hızı değerlerinin doğru orantılı bir şekilde arttığı gözlenmiştir. SD'nin % 5 oranından fazla kullanılması yüzey sertliğini değiştirmemiştir. PKÇ ve KÇ ile hazırlanan betonlarda SD'nin betona katılması basınç dayanımının artmasında yararlı olmuştur. SD'nin artması ile basınç dayanımı da artmaktadır. En fazla artış oranı SD'nin % 15 kullanılması ile elde edilmiştir. KÇ'li betonlar PKÇ'lilere göre daha dayanımlıdır. Bu sonuçlardan SD'nin betona katılmasıyla daha yüksek dayanımlar tasarruf edilerek sağlanabilecektir. Yeterli miktarda SD bulunması ve bunun yaygın olarak kullanılması beton teknolojisi ve bir atığın değerlendirilmesi açısından çok yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Ay, N. ve İ. B. Topçu, "The Influence of Silicoferrochromium Fume on Concrete Properties", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 2, pp. 387-394, 1995.
- [2] Ay, N. ve İ. B. Topçu, "Silikofrokrom Baca Tozunun Betonda Kullanılması", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Endüstriyel Artıkların İnşaat sektöründe Kullanılması Sempozyumu, ss. 185-195, Kasım-1993, Ankara.
- [3] Sümer, M. ve A. İ. Çark, "Değişik Kür Şartlarında Silis Dumanı Kullanımının Beton Mukavemetine Etkisinin İncelenmesi", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 4.Ulusal Beton Kongresi Bildiriler Kitabı, ss. 267-277, Ekim-Kasım 1996, İstanbul.
- [4] Erdoğan, Ş., Ş. Kurbetçi, ve A. Doğan, "Silis Dumanının Katkılı Çimento İle Kullanımı", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 4.Ulusal Beton Kongresi Bildiriler Kitabı, ss. 257-266, Ekim-Kasım 1996, İstanbul.
- [5] Topçu, İ. B. ve Ş. Aydın, "Akışkanlaştırıcı Katkıların Beton Özelliklerine Etkisi", Hazır Beton Dergisi, ss. 49-53, Mayıs-Haziran 1998, İstanbul.

- [6] Ekinci, C.E., "Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Silis Dumanlarının Çimento ve Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, 1995, Elazığ.
- [7] Mehta, P. K. ve P. C. Aitcin, "Principles Underlying Production of High-Performance Concrete", Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, pp. 70-78, 1990.
- [8] Duval, R. ve E. H. Kadri, "Influence of Silica Fume on the Workability and the Compressive Strength of High-Performance Concretes", Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 4, pp. 533-547, 1998.
- [9] Çetin, A. ve R. L. Carrasquillo, "High-Performance Concrete: Influence of Coarse Aggregates on Mechanical Properties", ACI Mat. Journal, pp. 252-261, May-June 1998.
- [10] ACI Committee 226, "Silica Fume in Concrete", ACI Materials Journal, 84, pp. 158-166, March-April 1987.
- [11] Kaval, M., "Silis Dumanının Hazır Betonda Kullanımının Optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000, Eskişehir.
- [12] Yeğınobalı M. A., "Silis Dumanının Beton Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, ss. 149-167, Ekim 1997, Ankara.
- [13] TS 12141, "Çimento-Portlant Silika Füme", TSE, Mart 1997, Ankara.
- [14] TS 3452, "Beton Kimyasal Katkı Maddeleri (Priz Süresini Ayarlayan ve Karışım Suyunu Azaltan)", TSE, Şubat 1984, Ankara.
- [15] TS 12143, "Çimento-Portlant Kompoze", TSE, Mart 1997, Ankara.
- [16] TS 10156, "Çimento-Katkılı Çimento", TSE, Nisan 1992, Ankara.
- [17] TS 706, "Beton Agregaları", TSE, 1980, Ankara.
- [18] TS 707, "Beton Agregalarında Numune Alma ve Deney Numunesi Hazırlama Yöntemi", TSE, 1980, Ankara.
- [19] TS 3529, "Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini", TSE, 1980, Ankara.
- [20] TS 3526, "Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini", TSE, Aralık 1980, Ankara.
- [21] Akman, M. S., "Beton Teknolojisinde Silica Füme Kullanılması", İTÜ Malzeme Seminerleri, ss. 175-200, 1985, İstanbul.
- [21] Begimgil, M. ve A. Doğan, "Silis Dumanının Beton Performansına Katkısı", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu 3. Bildiriler Kitabı, ss. 51-61, Ekim 1997, Eskişehir.
- [22] Aköz, F., N. Yüzer, H. Biricik ve S. Koral, "Silis Dumanı Katkılı Beton Özelliklerine Kür Koşullarının Etkileri", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu 3. Bildiriler Kitabı, ss. 63- 71, Ekim 1997, Eskişehir.
- [23] Özturan, T., M. Özel ve A. N. Şigaher, "Süperakışkanlaştırıcı Dozajının Uçucu Kül ve Silis Dumanı Katkılı Betonlarda İşlenebilme ve Dayanıma Etkisi", TMMOB İnşaat Müh. Odası, 4. Ulusal Beton Kongresi, ss. 121-131, Ekim-Kasım 1996, İstanbul.