

SİLİS DUMANININ BETONDA MEKANİK ÇATLAK OLUŞUMLARINA ETKİSİ

İlker Bekir TOPÇU¹, Mehmet CANBAZ²

ÖZET: Elektrometalurji fabrikalarının atığı olan silis dumanının betona katılmasıyla yüksek dayanımlı betonlar elde edilebilmektedir. Bu çalışmada CEM II/A-M 32.5 çimentosu, silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı kullanılarak üretilen betonların dayanımda meydana getirdiği artış ve mekanik çatlak oluşumları mikroyapısal olarak incelenmiştir. Elektron Mikroskobu kullanılarak mikroyapı fotoğrafları çekilmiş, kimyasal analizleri yapılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda; silis dumanının betonda mikro düzeyde doluluk sağladığı, CH bağlayarak CSH'ları oluşturması nedeni ile iri agregaların etrafında düzenli bir harç yapısının oluşması, ara yüzeylerde aderansın sağlanması gibi mikroyapıda olumlu etkileri görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Silis dumanı, Elektron mikroskobu, Mikroyapı, Çatlak.

EFFECT OF SILICA FUME ON MECHANIC CRACK FORMATIONS IN CONCRETE

ABSTRACT: High strength concrete are obtained by adding the silica fume, which is an Electrometallurgy Facility's, into concrete production. In this study, increasing on strength and mechanic crack formations of concrete, which were produced by CEM II/A-M 32.5 cement, using silica fume and superplasticizer, were investigated in the respect of microstructure. Photo of microstructure has been taken and chemical analysis has been determined by using Electron Microscope. As a result of studies, investigated micrographs and chemical analysis, silica fume; provides compactness at micro-level in concrete, occurs a regular mortar microstructure around the coarse aggregate because silica fume reactions with CH and occurs CSH, and produces positive effect in micro structure in addition to the contribution to adherence of interfacial zone.

Keywords: Silica fume, Electron Microscope, Microstructure, Crack.

^{1,2} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batı Meşelik Kampüsü, 26480 ESKİŞEHİR

I. GİRİŞ

Elektronik endüstrisinde önemli bir malzeme olan saf silisyum üretiminde yan ürün olarak silis dumanı (SD) elde edilir. Yoğun SD çok yüksek puzolanik özelliğe sahip bir maddedir. Yüksek dayanımlı beton üretilebilmek için, süperakışkanlaştırıcı katkılarla birlikte SD da betonda mineral katkı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu iki kimyasal ve mineral katkının birlikte kullanımı betonda su-çimento oranını azaltırken daha kaliteli bir içyapı elde edilmesini sağlamıştır [1-4]. SD'nın beton özellikleri üzerinde sağladığı olumlu katkı yanında ekonomik ve ekolojik yararları da göz ardı edilemez. Çimentodan yaklaşık 100 kat daha ince olan SD çimento hamurundaki mikro boşlukları ve agrega-çimento arayüzeyini doldurarak, bir taraftan fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirerek betonun dayanımını ve geçirimsizliğini arttırırken, diğer taraftan içerdiği aktif silis sayesinde hidrasyon ürünlerinden Ca(OH)_2 'i bağlayarak betonun kimyasal dayanıklılığını arttırmaktadır. Kimyasal dayanıklılıktaki artış SD'nın puzolanik reaksiyonu sonucu Ca(OH)_2 'i C-S-H jeli halinde suda çözünmez bir yapıya dönüştürmesine bağlanır [5-9]. SD'nin inceliği de reaksiyon hızını etkilemekte, nano boyutta SD kullanılması ile puzolonik aktivite ve bağlayıcı hamur agrega arasındaki aderansı oldukça arttırmaktadır [10, 11]. İçyapıda meydana gelebilecek çatlaklar aderansı ve bağlayıcılığı olumsuz yönde etkilemektedir. Mekanik etki sonucunda önce mikro seviyede oluşan çatlaklar kısa sürede gözle görülür hale gelmektedir. SD katılarak elde edilen yüksek dayanımlı betonlar daha gevrek hale gelmekte ve mekanik etki altında ani çatlak oluşumlarına neden olmaktadır. Bu çatlakların mikro seviyede incelenmesi yüksek dayanım kadar yüksek performanslı beton elde etmek içinde önemlidir. Bu çalışmada SD katılmış betonlarda uygulanan testler sonucu mekanik özelliklerdeki artışların SD'lı betonların mikroyapısında ne tür değişikliklere yol açtığı incelenmiş, mikroyapıda meydana gelen değişiklikler kullanılan beton numunelerinin mekanik özellikleri ve kimyasal yapısına bakılarak açıklanmaya çalışılmıştır [12-14].

II. DENEYSEL ÇALIŞMA

II.1. Malzemeler

Çimento: Eskişehir Çimento Fabrikası'nın üretimi olan CEM II/A-M 32.5 çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentoya ait özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

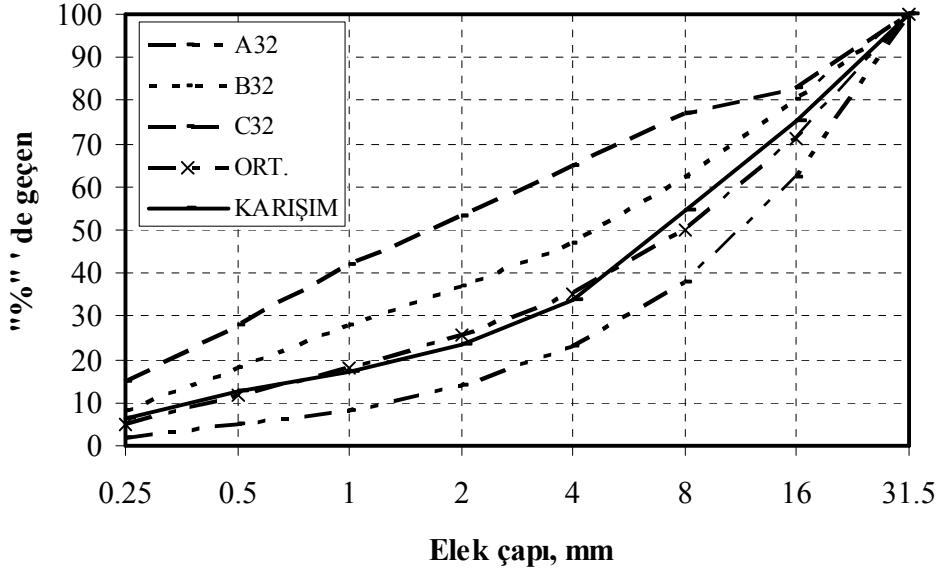
Süperakışkanlaştırıcı katkı: Karışımların tamamında toplam bağlayıcı miktarının % 1.6'sı kadar F tipi Sikament FF-N kullanılmıştır. Sikament FF-N süperakışkanlaştırıcı ve su azaltıcı katkı maddesi olarak kullanılmıştır.

Silis dumanı: Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesinden sağlanan SD kullanılmıştır. Ferrosilisyumun (FeSi) fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Fabrikanın ferrosilisyum (FeSi) ve silikoferrokrom (SiFeCr) fırınlarından özel filtreli toz tutucularla elde edilen SD'ların üretim kapasiteleri yılda 360-400 tondur.

Çizelge 1. Deneyde kullanılan SD ve çimentoların özellikleri

Malzeme Türü	CEM II	SD		CEM II	SD
Kimyasal Analiz (%)			Fiziksel Özellikler		
SiO ₂	29,76	88,8	Özgül Ağırlık	2,96	2,36
Al ₂ O ₃	8,01	0,17	Özgül Yüzey (cm ² /g)	3948	302
Fe ₂ O ₃	3,79	0,11	Basınç Dayanımları MPa		
CaO	48,57	1,01	2 Günlük	13,2	-
MgO	1,39	0,88	7 Günlük	25,2	-
K ₂ O	1,00	5,08	28 Günlük	38,4	-
Na ₂ O	0,65	0,19	Elek Analizi (mm)		
SO ₃	2,89	0,42	-0,250 + 0,125	1,40	0,26
TiO ₂	-----	0,30	-0,125 + 0,074	10,00	1,57
Kızdırma kaybı	3,86	2,40	-0,074 + 0,044	28,50	1,04
Tayin Edilemeyen	0,50	1,48	-0,044 + 0,032	33,27	97,0
Çözülmez Kalıntı	0,29	2,16	-0,032 + 0,003	52,05	-

Agrega: Eskişehir-Osmaneli kumu ve Söğüt Zemzemiye kırmataşları kullanılmıştır. En büyük tane boyutu 31.5 mm'dir. Agreganın granülometri eğrisi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Eskişehir-Osmaneli agregası karışımının granülometri eğrisi.

II.2. Yapılan Deneyler

300, 350 ve 400 dozajlı SD'sız ve SD'lı silindirik beton numuneler üretildi. Karışımlarda su bağlayıcı oranı % 50 olarak belirlendi. Numuneler 28 gün standart kür koşullarında bekletildikten sonra basınç deneyi yapıldı. Burada en iyi görüntü sağlanacak numunelerden, 300 dozaj için çimento ağırlığının %15'i, 350 dozaj için çimento ağırlığının %5'i, 400 dozaj için çimento ağırlığının %10'u oranında SD kullanılanlar seçildi. Basınç deney sonuçları Çizelge 2'de gösterilmiştir. Basınç deneyi sırasında numune üzerine yapılan yükleme, en büyük değere ulaştığı anda durduruldu. Elmas diskli taş kesme aleti ile silindir numuneler ikiye bölündü. Elde edilen yarım silindirik numunelerin alt, orta ve üst bölgelerinden yaklaşık 2 cm'lik küp numuneler kesilerek çıkarıldı. Daha sonra bu numuneler hassas kesme cihazı ile mikroyapısının incelenebilmesi için gerekli boyutlarda kesildi. Mikroyapısı incelenecek yüzeyler 600 mikronluk aşındırıcı tozlar kullanılarak aşınma yapılarak yüzey düzgünlüğü sağlandı. Numunelerin yüzeyleri son olarak kadife kaplanmış parlatma çarklarına tutuldu. Bu işlemler sonucunda yüzeyler pürüzsüz ve parlak oldu. Numunelerin kesme işlemleri sırasında emdiği

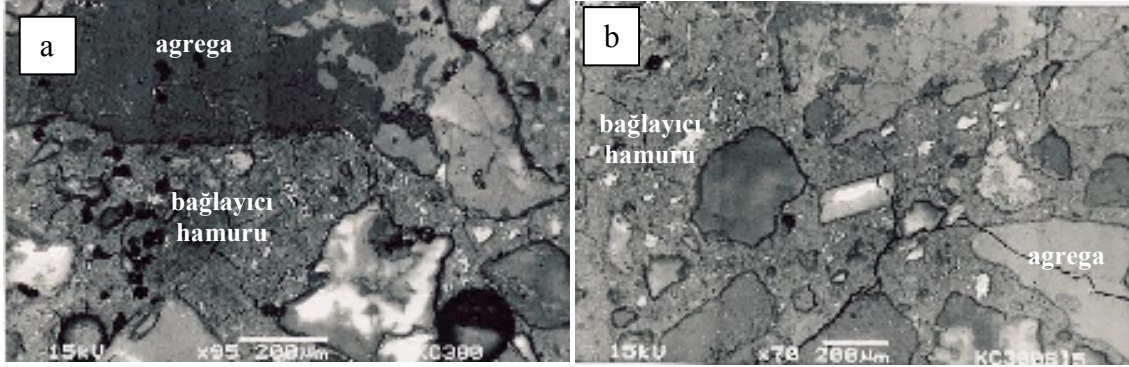
suyun giderilmesi amacıyla 105 °C'lik etüvde 24 saat kurutuldu. Elektron mikroskobunda yüzeylerin fotoğrafları çekildi ve mikroyapısı incelendi.

Çizelge 2. Basınç dayanımı deneyi sonuçları.

Numune	300	300 + SD 15	350	350 + SD 5	400	400 + SD 10
Basınç Dayanımı, MPa	27,4	36,0	31,1	33,7	34,6	38,2

III. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE İRDELENMESİ

Şekil 2.(a)'da çatlak yapısı en iyi görülecek şekilde 95 kat büyütme yapılarak çekilmiş 300 dozajlı betonun mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Burada çimento hamurunda, agrega çevresinde ve agrega üzerinde çatlaklar çok fazladır. Çimento hamurunun yeterli bağlayıcılık özelliği gösteremediği, agrega ve çimento hamuru arasındaki ara yüzeyde yeterli aderans sağlanamamıştır. Şekil 2.(b)'de 70 kat büyütme yapılarak çekilmiş 300 dozajlı % 15 SD katkılı betonun mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Burada çatlakların arayüzeylerde, çimento yüzeyinde olduğu hatta bazı agregalarında kırıldığı görülmektedir. Çatlaklar büyütme oranı az olmasına rağmen çok belirgin bir şekilde numune yüzeyine yayılmıştır.



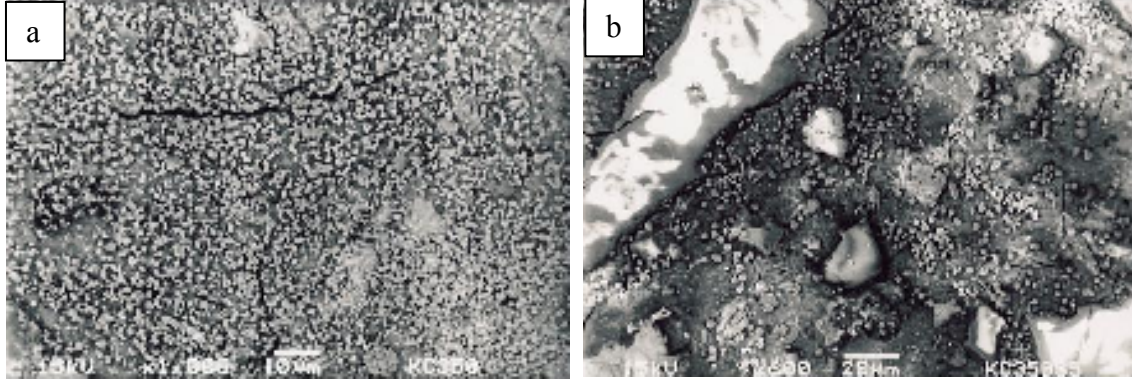
Şekil 2. 300 dozaj ile üretilen SD'siz (a) ve % 15 SD'li (b) betonun mikroyapısı.

Çizelge 3'den görüleceği gibi SD katılması ile bağlayıcı hamurda yapılan kimyasal analizde betonun ana bileşenlerinde önemli yeri olan Si ve Ca miktarı artarken, Al ve O miktarı azalmıştır. Burada Si miktarının artması % 15 oranında katılan SD'nin çimento hamurunda reaksiyonlarda yer aldığı bir göstergesidir.

Çizelge 3. 300 ve 300 SD 15 betonunun kimyasal analizi (uyarma voltajı 20 kV)

Element	Al	Si	P	O	Na	Mg	K	Ca	Fe	S	Cl	
300	Atom %	4,87	10,03	0,03	50,96	0,42	0,86	0,62	29,54	0,78	1,54	0,11
	Ağırlık%	5,1	10,93	0,04	31,65	0,38	0,81	0,93	45,95	1,70	1,92	0,15
300 S15	Atom %	3,59	11,72	0	49,21	0,15	0,77	0,14	31,84	0,46	1,64	0,37
	Ağırlık%	3,7	12,59	0	30,12	0,13	0,71	0,2	48,82	0,98	2,01	0,5

Şekil 3.(a)'da en iyi görüntü elde edilebilen 1000 kat büyütme yapılarak çekilmiş 350 dozajlı betonun mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Çatlakların yine fazla olduğu agrega yüzeyinde çimento hamurunda yoğunlaştığı görülmektedir. Çatlak genişlikleri çok fazla ve belirgindir. Numune yüzeyinin küçük taneli kumla kaplanmış olduğu görülmüştür. Numunenin yüzeyinde küçük ve çimento hamuruna dağılmış boşluklar görülmektedir. Şekil 3.(b)'de en iyi görüntünün elde edildiği 600 kat büyütme yapılarak çekilmiş 350 dozajlı % 5 SD katkıli betonun mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Yine mikroyapıda oluşan çatlaklar incelenecek olursa çatlak yoğunluğunun giderek azaldığı, çatlakların sadece çimento hamurunda ve iri agregaların çevresinde belirgin bir şekilde oluştuğu görülmektedir. Ağ şeklinde çatlaklara rastlanmamıştır. 600'lük büyütmede çimento hamurundaki ince taneli yapının azaldığı SD katkısı ile oluşan mikro boşlukların büyük bir kısmının dolduğu görülmektedir.

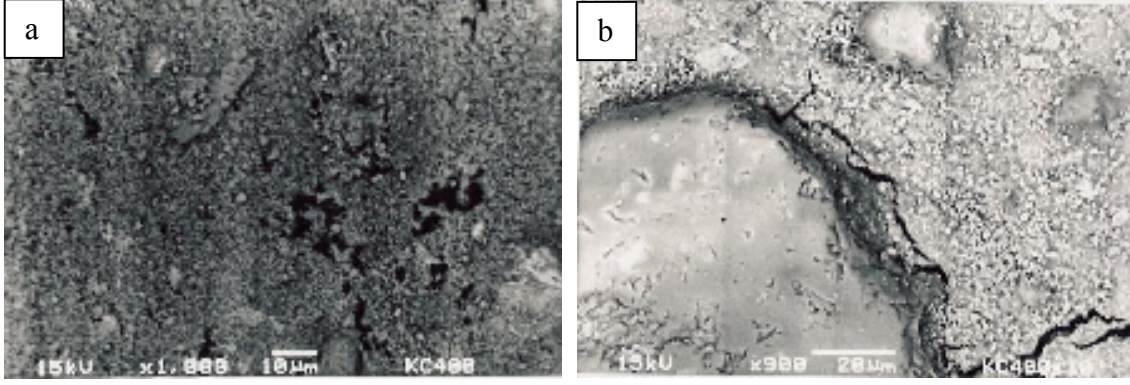
**Şekil 3.** 350 dozaj ile üretilen SD katkısız (a) ve % 5 SD katkıli (b) betonun mikroyapısı

Çizelge 4’de incelendiğinde 350 dozajlı SD katkısız betonun Si ve Al miktarı 350 dozajlı % 5 SD katkılı betonun kimyasal analizi incelendiğinde SD katkısız betona göre Si ve O miktarı artmış, Ca ve Al miktarında düşüşler gözlenmiştir. Yine SD katkısı çimento hamurundaki Si miktarını artırmıştır.

Çizelge 4. 350 ve 350 S5 betonlarının kimyasal analizi (uyarma voltajı 20 kV)

Element		Al	Si	P	O	Na	Mg	K	Ca	Fe	S	Cl
350	Atom %	5,65	14,41	0,46	44,83	1,32	1,94	0,62	28,36	0,9	1,38	0,13
	Ağırlık%	5,81	15,41	0,54	27,31	1,15	1,79	0,93	43,28	1,92	1,68	0,18
350 S5	Atom %	3,43	16,55	0,8	46,29	0,6	1,4	0,4	27,53	1,04	1,47	0,41
	Ağırlık%	3,54	17,79	0,95	28,34	0,53	1,3	0,6	42,23	2,22	1,8	0,55

Şekil 4.(a)’da 1000 kat büyütme yapılarak çekilmiş 400 dozajlı betonun mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Bu fotoğraftan da görülebileceği gibi çimento hamurunda düzgün bir yapı oluşmuştur. Mikro boşluklar burada da görülmektedir ve yer yer daha büyük boşluklar oluşturmuştur. Agregalar ve çimento hamuru arayüzeyinde aderans büyük ölçüde sağlanmış, agregalar çimento hamuru ile birlikte hareket etmeye başlamıştır. Çatlakların büyük çoğunluğu çimento hamurundadır. Çatlak genişlikleri oldukça büyük olup, çoğu agreganın ara yüzeyinde çatlak meydana gelmemiştir. Şekil 4.(b)’de en iyi görüntünün elde edilebildiği 900 kat büyütme yapılarak çekilmiş 400 dozajlı, % 10 SD katkılı betonun mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde iri agregaların büyük kısmı ve küçük agregalarla çimento hamuru arasında yapışmanın tam olarak sağlandığı görülmektedir. Bu bölgelerde çatlaklar agregaların çevresinde, fakat çimento hamurunda görülmektedir. Oldukça yüksek bir basınç yükünde gevrek bir şekilde aniden çatlayarak ve çatlak genişliği artarak çimento hamurunda yayıldığı gözlenebilir. SD katılması ile çimento hamurunda mikro yönden büyük ölçüde doluluğun sağlandığı görülmektedir. İnce yapılı tanelerin çimento hamurunda yayıldığı gözlenmiştir.



Şekil 4. 400 dozaj ile üretilen SD'siz (a) ve % 10 SD'li (b) betonun mikroyapısı.

Çizelge 5 incelendiğinde 400 dozajlı SD katkısız betonda Ca ve O miktarı diğer SD katkılı ve katkısız numunelerin kimyasal analizine bakıldığında arttığı, Si ve Al miktarı ise azaldığı görülebilir. 400 dozajlı betonda % 10 SD katılması ile SD'siz betonlara göre Si miktarında artış görülürken diğer O, Ca ve Al miktarında azalmalar görülmüştür.

Çizelge 5. 400 ve 400 SD 10 betonunun kimyasal analizi (uyarma voltajı 20 kV)

Element		Al	Si	P	O	Na	Mg	K	Ca	Fe	S	Cl
400	Atom %	2,42	8,76	0,37	52,45	0	0	0,81	32,44	0,99	1,2	0,27
	Ağırlık%	2,5	9,43	0,44	32,14	0	0	1,21	49,8	2,12	1,48	0,36
400 S10	Atom %	3,39	13,38	0,17	60,77	0,83	0,49	0,95	18,85	0,22	0,89	0
	Ağırlık%	3,96	16,25	0,23	42,05	0,82	0,51	1,61	32,68	0,52	1,23	0

Ekinci'nin yaptığı çalışmada SD katılması ile çimento hamurunda meydana gelen değişimler SEM fotoğrafları ile incelenmeye çalışılmıştır. C-S-H bileşiklerinin SD katkılı çimento hamurunda her tarafta yoğun bir şekilde olduğu, SD katkısız çimento hamurunda ise yine her tarafta, fakat daha az yoğun olduğu görülmüştür [15]. SEM-EDX ile yapılan incelemelerde SD katkılı betonlarda SD katkısız betonlara göre genel olarak bakıldığında Si atomlarında meydana gelen artışlar ve Ca miktarındaki azalmalar SD'nin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyon yaparak C-S-H'ları oluşturduğu şeklinde açıklanabilir. Ekinci'nin yaptığı çalışmayla uyumlu olarak SD katkılı çimento hamurunda C-S-H yoğunluğunun arttığı söylenebilir.

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

SD katılması betonlarda Si atomu miktarını arttırmakta ve doluluğu sağlamaktadır. Bağlayıcılık özelliği ile harç fazında bulunan küçük agrega ve kum tanelerinin bağlanmasında çimentoya katkıda bulunmuş ve iri agrega ara yüzeylerinin çoğunda SD katılması ile aderans daha iyi sağlanmıştır. Sadece agrega yüzeyleri çok düzgün olduğu kısımlarda bu yapışma tam sağlanamamıştır. Düşük dozajlarda çatlakların harç fazında ağ şeklinde yayıldığı iri agregaların ara yüzeylerinde çatlakların oluştuğu, yüksek dozajlarda SD kullanımıyla da çatlaklar harç fazında azalarak, daha belirgin, geniş ve kısa çatlaklar halini almıştır. İri agregaların etrafında çatlaklar kısmen görülmüştür. SD kullanımı mikroyapı fotoğrafları ile ve kimyasal analizlerle incelendiği kadarıyla, betonun içyapısında mikro düzeyde doluluğa, bağlayıcılığı artırarak düzenli bir harç yapısının oluşmasına yardımcı olmuş, ara yüzeylerde aderansın sağlanması ile mikro yapıda olumlu etkileri görülmüştür. SEM fotoğrafları incelendiğinde SD katılması durumunda harç fazında daha yoğun bir yapı meydana geldiği görülmektedir. SD'nın katılması durumunda, hidrasyon ürünü olan ve betona zarar veren Ca(OH)_2 'in bağlanarak C-S-H kristallerine çevirildiği ve üretilen C-S-H kristalleri ile betonun harç fazında meydana gelen boşlukların doldurarak geçirimsiz bir yapı elde edildiği söylenebilir. SD'nın betonda kullanılması hem çevreye vereceği zararı önleyecek, hem de beton özelliklerini iyileştirdiği için daha kaliteli betonlar üretilmesini sağlayacak ve atık bir malzeme değerlendirildiği için ülkemize ekonomik olarak katkı sağlayacaktır.

V. KAYNAKLAR

- [1] A. Yeğınobalı ve İ. Öztok, "Silis Dumanı ve Uçucu Kül İçeren Taşıyıcı Bimsbetonları", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 3. Bildiriler Kitabı, 1997, Eskişehir, ss. 73-93.
- [2] Ş. Erdoğdu, Ş. Kurbetçi ve A. Doğan, "Silis Dumanının Katkılı Çimento ile Kullanımı", 4. Ulusal Beton Kongresi, 1996, İstanbul, ss. 257-265.
- [3] İ.B. Topçu and M. Sarıdemir, "Prediction of mechanical properties of recycled aggregate concretes containing silica fume using artificial neural networks and fuzzy logic", *Computational Materials Science*, In Press 2007.

- [4] C.D. Atiş, F. Özcan, A. Kılıç, O. Karahan, C. Bilim and M.H. Severcan, "Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete", *Building and Environment*, Vol. 40, pp. 1678-1683, December 2005.
- [5] R. Duval and 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.
- [6] X. Li and D.D.L. Chung, "Improving silica fume for concrete by surface treatment", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, pp. 493-498, 1998.
- [7] J. Marchand, H. Hornain, S. Diamond, M. Pigeon and H. Guiraud, "The microstructure of dry concrete products", *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, pp. 427-438, 1996.
- [8] D.R. Mitchell, I. Hinczak and R.A. Day, "Interaction of silica fume with calcium hydroxide solutions and hydrated cement pastes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, pp. 1571-1584, 1998.
- [9] S.L. Sarkar and A. Xu, "A Microstructural Overview of Mineral Admixtures in High-Performance Ready-Mix Concrete", XIth European Ready Mixed Concrete Congress, 1995, İstanbul, pp. 420-430.
- [10] B.W. Jo, C.H. Kim, G. Tae and J.B. Park, "Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 1351-1355, 2007.
- [11] Y. Qing, Z. Zenan, K. Deyu, C. Rongshen, "Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 539-545, 2007.
- [12] M. Canbaz, "*Silis Dumanlı Betonların Mikroyapısının İncelenmesi*". Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 85s, 2001.
- [13] İ.B. Topçu and M. Canbaz, "Microstructural Analysis of Concrete with Silica Fume", 7th International Conference on Concrete Technology in Developing Countries (ICCT 2004), 5-8 October 2004, Kuala Lumpur, Malaysia, I - (7) - pp. 83-90.
- [14] İ.B. Topçu ve M. Canbaz, "Silis Dumanlı Betonların Ara Yüzeylerinin İncelenmesi", ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Semp., 14 Ekim 2002, ODTÜ, Ankara, Türkiye, ss. 469-476.
- [15] C.E. Ekinci, "*Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Silis Dumanlarının Çimento ve Beton Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi*", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Yapı Eğitim Anabilim Dalı, Elazığ, s.197, 1995.