

Silis Dumanlı Betonların Ara Yüzeylerinin İncelenmesi

İlker Bekir Topçu, Mehmet Canbaz

Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batı Meşelik, 26480, Eskişehir, Türkiye.

ÖZET: Endüstriyel atık olan silis dumanı (SD) ve süperakışkanlaştırıcı kullanılarak PKÇ/B 32.5/R ve KÇ 32.5 cinsi iki farklı çimento ile üretilen betonların yapılan deneylerle mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Betonun dayanım ve dayanıklılığını arttırdığı görülmüştür. Bu artışın mikro yapıda meydana getirdiği değişimler incelenmiştir. X-Işımları Difraktometresi (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) kullanılarak mikro yapı fotoğrafları çekildi, kimyasal analizleri yapıldı. Yapılan çalışmanın sonucunda mikro yapı fotoğrafları ve kimyasal analizler incelendiğinde; SD 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 mikro yapıda olumlu etkileri görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Silis dumanı; süperakışkanlaştırıcı, mikro yapı.

ABSTRACT: The mechanical and physical properties of concrete which are produced by using silica fume and super-plasticized with two different cements (PKÇ/B 32.5/R and KÇ 32.5) have been determined. The strength and durability of concrete have been increased by using this method. The differences micro structure because of this increased are investigated. Photo of micro structure has been taken and chemical analysis has been determined by using X Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM). As a result of studies, investigated micrographs and chemical analysis, silica fume; determines compactness micro-level in concrete, occurs a regular mortar structure around the coarse aggregate because silica fume reaction with CH and occurs CSH, and produces positive effect in micro structure in addition to determine adherence of interfacial zone.

Keywords: Silica fume, superplasticizer, micro structure.

Giriş

Beton teknolojisinde son yıllardaki gelişmeler yüksek dayanımlı beton üretilmesi yönündedir. Bunun sonucunda süperakışkanlaştırıcı katkılarla birlikte endüstriyel atık olan SD'nın da betonda mineral katkı olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu iki kimyasal ve mineral katkının birlikte kullanımı betonda su-çimento oranını azaltırken daha kaliteli bir iç yapı elde edilmesini sağlamıştır (Yeğinobalı, 1997).

Agrega-matris arayüzeylerine dair çalışmalara artan bir ilgi vardır. Agregalar ile çimento hamuru arasındaki yüzey en zayıf bağlantı olduğu için betonun mekanik davranışı, arayüzeydeki bölgenin özelliklerinden oldukça fazla etkilenir; beton çatlağı bu bölgenin özelliklerine karşı çok hassastır. Normal dayanımdaki betonlarda bu bölgenin mikro yapısı ve çatlaklar üzerine yapılan çalışmalar bazı faydalı bilgiler edinilmesini sağlamıştır. Bunun yanında SD içeren veya içermeyen yüksek dayanımlı betonların daha iyi anlaşılması için daha fazla araştırmaya ve kantitatif ölçümlere gereksinim vardır. Özellikle, daha gerçekçi bir yaklaşımla, harç içeren model agregaya yerine gerçek betonun davranışlarının incelenmesi gerekir (Taşdemir, 1995).

Yoğun SD, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi silisli yan ürünler Portland çimentosu ile karıştırılıp su ile reaksiyona sokulduğunda, su katılmış çimento hamurundan daha aralıklı ve daha az geçirgen bir gözenek oluştururlar. Mikro yapısal çalışmalar, SD içeren harçlarda, gözenek dağılımında meydana gelen değişikliğin bir kısmının nedeninin, SD'nın, kum tanelerinin etrafında oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girmesi olduğunu göstermiştir. Harçtaki SD'nın ayrıca, çimentonun kum gibi küçük taneli agregaların bağlanmasını sağladığı ve donma-çözülme direncini arttırdığı görülmüştür (Cheng-yi, 1985). Betona SD katılmasıyla basınç dayanımı artmakta, rötre azalmakta, aşınma direnci artmakta, adereans artmakta, permabilite ise azalmaktadır (Li, 1998).

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 artırırken diğer taraftan içerdiği aktif silis sayesinde hidrasyon ürünlerinden $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'i bağlayarak betonun kimyasal dayanıklılığını arttırmaktadır. Bu artış SD'nın puzolanik reaksiyonu sonucu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'i C-S-H jeli halinde suda çözünmez bir yapıya dönüştürülmesine bağlanır (Erdoğan, 1996).

Deneysel Çalışma

Kullanılan Malzemeler

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

Çimento: Eskişehir Çimento Fabrikasının (EŞÇİM) üretimi olan, TS 12143 nolu TSE standartlı PKÇ/B 32.5R Portland Kompoze Çimentosu ve Set Çimento Anonim Şirketi Afyon Çimento Fabrikasının Ürettiği TS 10156 nolu TSE standartlı KÇ 32.5 katkılı çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentolara ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

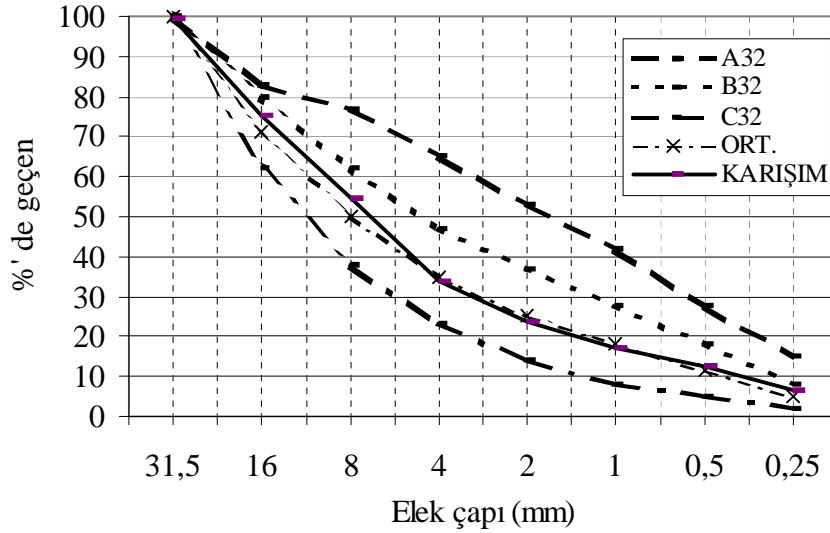
Süperakışkanlaştırıcı katkı: Karışımların tamamında toplam bağlayıcı miktarının % 1.6'sı kadar, TS 3452'ye göre sınıfı F tipi olan Sikament FF-N kullanılmıştır. Sikament FF-N süperakışkanlaştırıcı ve su azaltıcı katkı maddesi olarak kullanılmıştır.

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 ve TS 707'de belirtilen referans

eğrilerine uygun olarak yapılmıştır. Agreganın birim ağırlığı TS 3529, özgül ağırlığı ise TS 3526'ya göre her karışım için bir deneme yapılmıştır. Buna göre birim ağırlıklar kum için 1550, çakıl (8-16) için 1720, çakıl (16-32) için 1770 kg/m³, özgül ağırlıklar ise kum için 2660, çakıl (8-16) için 2760, çakıl (16-32) için 2770 kg/m³ olarak bulunmuştur.

Tablo 1. Deneyde kullanılan SD ve çimentoların özellikleri

Malzeme Türü	PKÇ/B 32.5/R	KÇ 32.5	FeSi		PKÇ/B 32.5/R	KÇ 32.5	FeSi
Kimyasal Analiz (%)				Fiziksel Özellikler			
SiO ₂	30.88	29.7	88.8	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2.85	2.96	2.36
Al ₂ O ₃	6.75	8.01	0.17	Özgül Yüzey (cm ² /g)	3574	3948	302
Fe ₂ O ₃	3.57	3.79	0.11	Basınç Dayanımları MPa			
CaO	47.78	48.5	1.01	2 Günlük	12.8	13.2	-
MgO	1.30	1.39	0.88	7 Günlük	26.9	25.2	-
Fe ₂ O ₅	0.07	-----	-----	28 Günlük	42.5	38.4	-
K ₂ O	1.33	1.00	5.08	Elek Analizi (mm)			
Na ₂ O	0.12	0.65	0.19	+0.250	0.00	0.00	0.04
SO ₃	1.67	2.89	0.42	-0.250 +0.125	0.40	1.40	0.26
Cl	0.011	-----	-----	-0.125 +0.074	7.00	10.00	1.57
TiO ₂	0.24	-----	0.30	-0.074 +0.044	25.00	28.50	1.04
Kızdırma kaybı	6.20	3.86	2.40	-0.044 +0.032	33.00	33.27	97.0
Tayin Edilemeyen	0.05	0.50	1.48	-0.032 +0.003	55.00	52.05	-
Çözülmez Kalıntı	0.27	0.29	2.16				



Şekil 1. Eskişehir-Osmaneli agregası karışımının granulometri eğrisi.

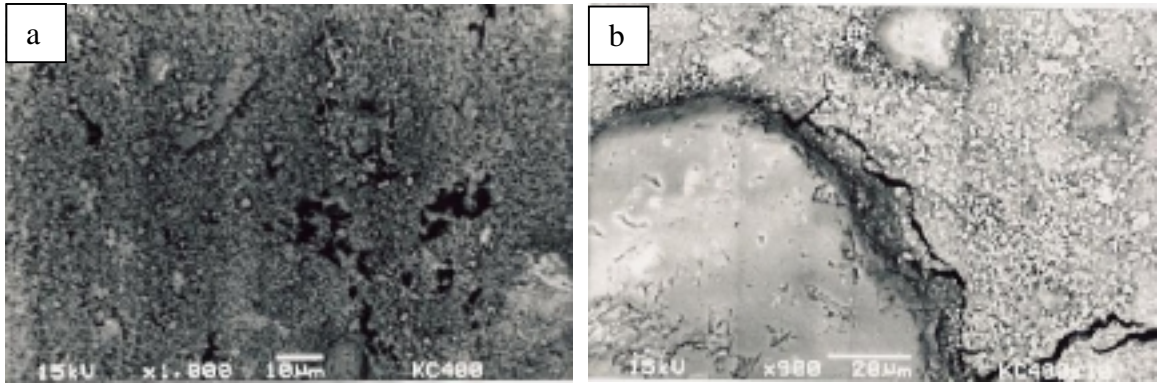
Deney yöntemi: PKÇ/B 32.5R ve KÇ 32.5 çimentolarından 350 ve 400 dozajlı SD'sız ve her dozaj için çimento ağırlığının % 5, 10 ve 15'i SD kullanılarak SD'lı olmak üzere 8 tip silindirik beton numuneler üretilmiştir. Üretilen beton numuneleri üzerinde mekanik ve fiziksel özellikler deneyleri yapıldıktan sonra mikro yapı analizi için örnekler alındı. Alınan örneklerin SEM analizi için yüzeyleri hazırlandı. SEM ile mikro yapı fotoğrafları çekildi. EDS ile atom miktarları bulundu. PKÇ/B32.5R ile üretilen % 15 SD katkılı ve katkısız çimento numunesi ile 350 dozajlı beton numunesinden alınan toz örneklerinin XRD ile kimyasal yapısı bulundu.

Deneysel Çalışmanın Sonuçları

SEM ile yapılan çalışmaların sonuçları: Fotoğraf 1a'da 1000 kat büyütme yapılarak çekilmiş KÇ ile üretilen betonun mikro yapı fotoğrafı görülmektedir. Bu fotoğraftan da görülebileceği gibi çimento hamurunda düzgün bir yapı oluşmuştur. Numunenin yüzeyinde küçük ve çimento hamuruna dağılmış boşluklar görülmektedir. Agregalar ve çimento hamuru arayüzeyinde aderans büyük ölçüde sağlanmış, agregalarda çimento hamuru ile birlikte hareket etmeye başlamıştır. Çatlakların büyük çoğunluğu çimento hamurundadır. Çatlak genişlikleri oldukça büyük olup çoğu agreganın ara yüzeyinde çatlak meydana gelmemiştir. Fotoğraf 1b'de 900 kat büyütme yapılarak çekilmiş KÇ ile üretilen % 10 SD katkılı betonun mikro yapı fotoğrafı görülmektedir. Mikro yapı 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 yapıli tanelerin çimento hamurunda yayıldığı gözlemiştir. Tablo 2 incelendiğinde KÇ ile üretilen 400 dozajlı betonda % 10 SD katılması ile Si, O ve Al miktarında artış görülürken, Ca miktarında azalmalar görülmüştür.

Tablo 2. KÇ 400 ve KÇ 400 SD 10 Betonunun Kimyasal Analizi (uyarma voltajı 20kV)

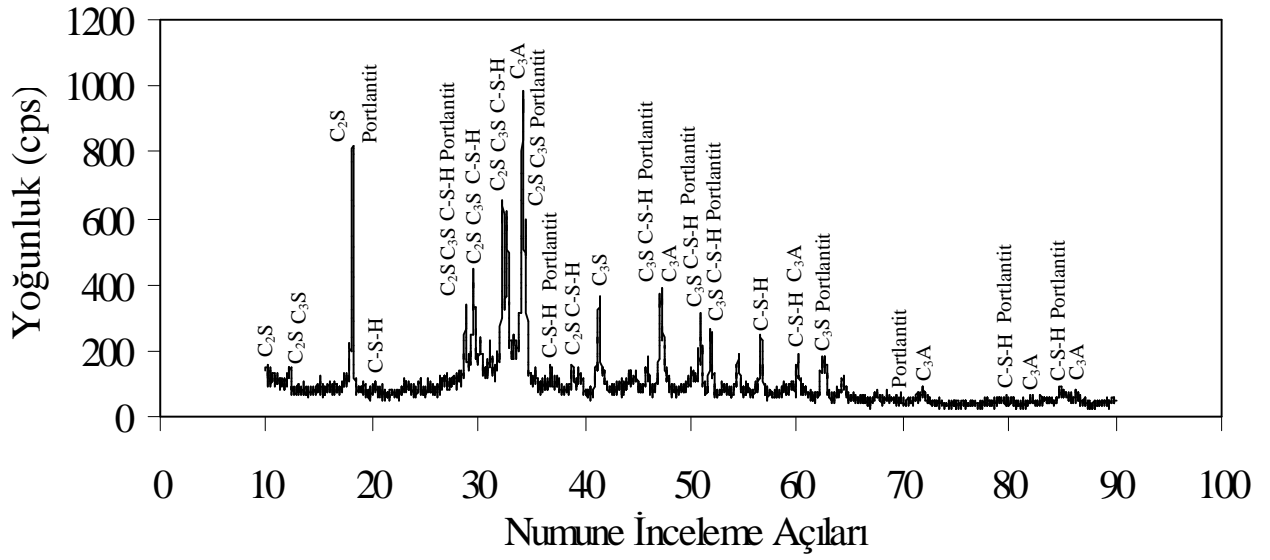
Element Simgesi	Al	Si	P	O	Na	Mg	K	Ca	Fe	S	Cl	Ti	Σ	
KÇ 400	Atomal %	2.42	8.76	0.37	52.45	0	0	0.81	32.44	0.99	1.2	0.27	0.27	100
	Ağırlıkça %	2.5	9.43	0.44	32.14	0	0	1.21	49.8	2.12	1.48	0.36	0.5	100
KÇ 400 S10	Atomal %	3.39	13.38	0.17	60.77	0.83	0.49	0.95	18.85	0.22	0.89	0	0.06	100
	Ağırlıkça %	3.96	16.25	0.23	42.05	0.82	0.51	1.61	32.68	0.52	1.23	0	0.13	100



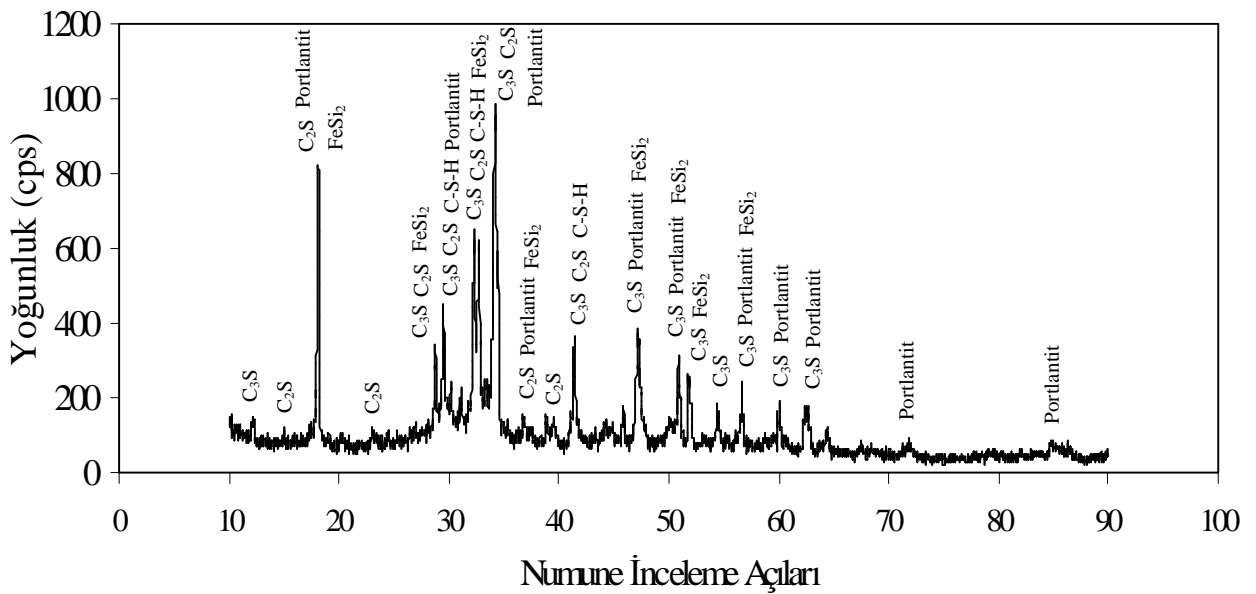
Fotoğraf 1. KÇ 400 ile Üretilen SD katkısız ve % 10 SD Katkılı Betonun Mikro Yapısı.

Fotoğraf 2a'da 1000 kat büyütme yapılarak çekilmiş PKÇ ile üretilen betonun mikro yapı fotoğrafı görülmektedir. Fotoğraflar incelendiğinde çimentonun kum tanelerini bağlayamadığı harç fazında bir bütünlük sağlanamadığı görüldü. Harç fazındaki mikro boşluklar çok olması nedeniyle genelde çatlaklar buralarda gerçekleşmiş agrega çevresinde daha az çatlağa rastlanmıştır. Çatlak genişlikleri fazla olduğu ve boşluklardan dolayı dallanamadığı görülmüştür. Fotoğraf 2b'de 1000 kat büyütme yapılarak çekilmiş PKÇ ile üretilen % 15 SD katkılı betonun mikro yapı fotoğrafı

PKÇ-B 32.5/R çimentosu kullanılarak üretilen çimento hamuru 10 gün kür edildikten sonra XRD çekimleri için numuneler hazırlanmıştır. Şekil 3'te silis dumansız çimento hamurunda meydana gelen reaksiyonlar görülmektedir. Daha sonra çimentonun yaklaşık % 15 oranında silis dumanı kullanılarak numuneler üretilmiş ve yine 10 gün kür edildikten sonra XRD çekimleri yapılmıştır. Şekil 4'te silis dumanı ilave edilmiş çimento hamurunda meydana gelen reaksiyonlar görülmektedir. Hidratasyonunu tamamlamış sertleşmiş hamur numuneleri XRD çekimlerinde görülen portlandit piklerinin varlığı silis dumanı içeriğini gösterir. Tüm portlanditlerin C_3S ve C_2S 'in hidratasyonu ile oluşan ve silis dumanı ile birleşerek C-S-H'yi oluşturduğu gibi bir hatalı sonuca varmamak gerekir. Difraktogramda portlandit piklerinin eksikliği onun hiç olmadığı anlamına gelmediği gibi, bu olay portlandit kristallerinin zayıf olarak kristalleştiği şeklinde açıklanabilir (Topçu, 2002).



Şekil 3. PKÇ-B 32.5/R Çimento Hamuru Numunesinin XRD İle Yapılan Kalitatif İncelemesi.



Şekil 4. PKÇ-B 32.5/R+% 15 SD Numunesinin XRD İle Yapılan Kalitatif İncelemesi.

Sonuçların İrdelenmesi

SEM ile Yapılan Çalışmaların İrdelenmesi: PKÇ ile üretilen betonlarda % 15 SD katıldığında Si ve Al atomları artarken Ca miktarı azalmış O_2 miktarında önemli değişiklik olmamıştır. KÇ ile üretilen betonlarda 400 dozaja % 10 SD katılması durumunda Si miktarı % 53, 350 dozaja % 5 SD katılması durumunda % 15'lik bir artış olmuştur. Ca miktarları ise 400 dozajlı betonlarda çok düşük olarak bulunmuştur. O_2 400 dozajlı betonlarda oldukça yüksek bir oranda bulunmakta diğer betonlarda yaklaşık aynı miktarlardır. Al miktarı % 2.42-% 5.65 arasında düzensiz olarak değişmektedir.

Taşdemir ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda SD'li betonlarda çatlakların genellikle agreganın içinden geçtiği ve kırılğan olduğu görülmüştür. SD'sız betonlarda çatlaklar agregaların etrafında, taneler arasında ve daha dolambaçlı bir şekilde oluşmuştur. SD'sız betonlarda Ca ve Si başka Al, S ve K'da görülmüştür (Taşdemir, 1995). Çalışmamızda SD'sız betonlara göre ara yüzeylerde aderans daha iyi sağlanmasına rağmen yinede agrega çevresinde çatlaklar görülmüştür. SD katkılı ve katkısız betonlarda Ca, Si, O ve Al'dan başka Mg, Fe, S, Cl, K ve Na atomlarına da rastlandı. Ekinci'nin yaptığı çalışmada 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 (Ekinci, 1995). Çalışmamızda SD katkılı betonlarda SD katkısız betonlara göre genel olarak bakıldığında Si atomlarında meydana gelen artışlar ve Ca miktarındaki azalmalar SD'nin $Ca(OH)_2$ ile reaksiyon yaparak C-S-H'ları oluşturduğu şeklinde açıklanabilir.

XRD ile Yapılan Çalışmaların İrdelenmesi: SD'sız üretilen beton numunesinin harç kısmında yapılan incelemede C_2S , C_3S , C_3A ve C_3AF 'ye rastlanmamıştır. CaO , SiO_2 oldukça büyük piklere sahiptir. Ayrıca Fe_2O_3 ve Al_2O_3 harç kısmında görülmüştür. Azda olsa C-S-H kristalleri görülmüş fakat portlandite rastlanmamıştır. SD'sız çimento hamuru numunesinde C_2S , C_3S ve C_3A pikleri görülürken, C_3AF 'ye rastlanmamıştır. Hidratasyon reaksiyonlarının hızla devam ettiği oluşan portlandit ve C-S-H'den anlaşılmaktadır. Çimento hamuru erken yaşta olduğu için pik boyları fazla değildir. C_2S gibi bazı bileşiklerin farklı fazları da görülmüştür. Fakat bu kristaller zayıf oldukları için kuvvetli olanı difraktogramda gösterilmiştir. SD katılması ile 10. günde daha az portlandit ve C-S-H oluştuğu görülmüştür.

Sarkar, Marchand, Kovler ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda, SD'nin $Ca(OH)_2$ 'lerle reaksiyona girerek C-S-H'ları oluşturduğu, daha yoğun bir mikro yapı elde edildiği ve böylece dayanım ve dayanıklılığın arttığı belirtilmiştir. Çalışmamızda beton numunede C-S-H'lar tam olarak görülmedi. Fakat yapılan bu çalışmalarla uyumlu olarak SEM fotoğraflarında SD'li betonların daha dolu bir yapıya sahip oldukları görüldü (Sarkar, 1995; Marchand, 1996). Mitchell ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada SD'nin $Ca(OH)_2$ ile reaksiyonu yavaş olduğu 120 günün sonra bile tepkimeye girmemiş SD gözlenmiştir. SD'lerinin sadece büyük C-S-H kütleleri içinde yığınlar halinde olduğu ve kendiliğinden dağılmadığı görülmüştür. Bu nedenle SD'nin davranışının onun tane yapısı ile değil yığımsal yapısı ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Çok yığılmış SD daha az reaktif olduğu, artan su gereksinimine katkıda bulunabileceği belirtilmiştir (Mitchell, 1998). Çalışmamızda hazırlanan SD katkılı çimento hamuru 10 günlük numunesinde XRD ile yapılan incelemede SD katkısızına göre daha fazla Portlandit ve FeSi bulunması SD'nin $Ca(OH)_2$ ile reaksiyonu yavaş olduğu gösterir.

Sonuç ve Öneriler

SD kullanımı mikro yapı fotoğrafları ile ve kimyasal analizlerle incelendiği kadarıyla betonun iç yapısında mikro düzeyde doluluk, bağlayıcılığı ile düzenli bir harç yapısının oluşmasına yardımcı olması, ara yüzeylerde aderansın sağlanması mikro yapıda olumlu etkileri görüldü. Yapılan XRD çalışmalarında betonda kum gibi ince agregalardan dolayı C-S-H'lar az miktarda görülürken portlandite rastlanmamıştır. Çimento hamuru numunelerinde ise 10 günde SD ilavesiyle çimento ana bileşiklerinin hızla reaksiyon yaptığı oluşan portlanditlerden görülmektedir. Fakat SD portlanditlerle yavaş reaksiyon yaptığı söylenebilir. Endüstriyel bir atık olan SD'nin betonda kullanılması hem çevreye vereceği zararı önleyecek hem de beton özelliklerini iyileştirdiği için daha kaliteli betonlar üretilmesini sağlayacak atık bir malzeme değerlendirildiği için ülkemize ekonomik olarak katkı sağlayacaktır.

Referanslar

Cheng-yi, H. and Feldman, R.F., *Hydration Reactions in Portland Cement-Silica Fume Blends*, Cement and Concrete Research, Vol. 15, No. 15, pp. 585-592, 1985.

Ekinci, C.E., *Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Silis Dumanlarının Çimento ve Beton Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Yapı Eğitim Anabilim Dalı, 1995, Elazığ.

Erdoğan, Ş., Kurbetçi, Ş. ve Doğan, A., *Silis Dumanının Katkılı Çimento İle Kullanımı*, 4. Ulusal Beton Kongresi, ss. 257-265, İstanbul, 1996.

Li, X. and Chung, D.D.L., *Improving Silica Fume for Concrete by Surface Treatment*, Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 4, pp. 493-498, 1998.

Marchand, J., Hornain, H., Diamond, S., Pigeon, M. and Guiraud, H., *The Microstructure of Dry Concrete Products*, Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 3, pp. 427-438, 1996.

Mitchell, D.R., Hinczak, I. and Day, R.A., *Interaction of Silica Fume with Calcium Hydroxide Solutions and Hydrated Cement Pastes*, Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 11, pp. 1571-1584, 1998.

Sarkar, S.L. and Xu, A., *A Microstructural Overview of Mineral Admixtures in High-Performance Ready-Mix Concrete*, XIth European Ready Mixed Concrete Congress, pp. 420-430, İstanbul, 1995.

Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., Grimm, R. and König, G., *Microstructural Effects on the Brittleness of High Strength Concretes*, Fracture Mechanics of Concrete Structures, pp. 125-134, Freiburg, 1995.

Topçu, İ.B. and Canbaz, M., *Microstructural Analysis of Concrete with Silica Fume*, Ninth International Conference on Composites Engineering, San Diego, 2002.

Yeğınobalı, A. ve Öztok, İ., *Silis Dumanı ve Uçucu Kül İçeren Taşıyıcı Bimsbetonları*, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması, ss. 73-93, 1997, Eskişehir.