

YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARDA DURABİLİTE

Mario COLLEPARDI

Celal KOZANOĞLU

Cevdet YANARDAĞ

Prof. of Materials
and Applied Chemistry
Universty of Ancona
Ancona, İTALYA

Dr. İnş. Yük. Müh.
Technical Manager
SET BETOYA
Manisa, TURKEY

İnşaat Mühendisi
Boykim A.Ş.
İstanbul
TURKEY

ÖZET

Yüksek dayanımlı betonların durabilitesinin de yüksek olacağı, ya da yüksek durabiliteli betonların yüksek dayanıma sahip olacağı bilinmektedir.

Burada sözü edilen durabilite " doğal " kimyasal zararlı etkilere karşı koyabilme yeteneğidir. Sülfatlar, klorlar, karbon dioksit ve alkaliler doğada bulunan " doğal " zararlı kimyasallardır. "Sunı" zararlı kimyasallar, yani insan tarafından üretilenler konusunda beton durabilitesi, konuma ve duruma bağlı olarak ele alınmalıdır. Özel yapılarda (kimyasal tesis, bazı sıvıları depolama tankları gibi)örneğin kuvvetli asitlerle temas edecek betonların anti-asit kaplamalarla korunması gerekir.

Doğal kimyasal zararlara karşı dayanıklı betonlar elde edilmesinde, pozzolanik etkinliğe sahip doğal ya da diğer malzemeler, çimento ile önceden karıştırılarak veya betona doğrudan katılarak kullanılmaktadırlar.

Bu yazıda, endüstriyel bir yan ürün olarak ortaya çıkan silis dumanının kullanımı üzerinde durulacaktır. Bu malzemeye beton üretiminde yer verilmesi ile birlikte dayanım, durabilite ve taze beton reolojisi konularında çok olumlu sonuçlar görülmektedir.

I. GİRİŞ

Uçucu kül, curuf, silis dumanı ve doğal pozzolanlar gibi malzemeler Avrupa'da inşaat sektöründe geniş biçimde kullanılmaktadır. [1].

Doğal pozzolan-kireç karışımı harç ve betonlar, portland çimentosunun 19.yy.da icadından çok önceleri, kullanılmaktaydı. Romalılar, Napoli körfezinde yer alan Pozzuoli'de bulunan volka-

nik bir malzemeyi yaygın olarak kullanmışlar, daha sonra Avrupa ve dünyanın başka bölgelerinde bulunan ve kireçle reaksiyon yapan diğer malzemeler de pozzolan olarak adlandırılmışlardır.[1]

Roma dönemine ait birçok yapılar, Roma şehrindeki Pantheon, meşhur Roma su kemerleri gibi su yapıları, bugün dahi sağlamlıklarını koruyabilmektedir, bu da pozzolan esaslı bağlayıcı ürünlerin uzun süreli dayanıklılığına adedilebilir. [1].

Pozzolan katkılı portland çimentosu üretimi ve kullanımı, tüm dünyada çok uzun bir süredir, yukarıda sözü edilen yararlara ek olarak ekonomikliği de gözönüne alınarak yaygınlaşmıştır. Son dönemlerde, özellikle sanayi atıkları olan uçucu kül ve silis dumanı gibi pozzolanik maddelerin beton karışımına doğrudan katılması pozzolan katkılı çimentoların özellikle erken yüksek dayanımlar yönündeki yetersizliği açısından önem kazanmaktadır. [1].

Silis dumanı kullanımı genellikle yüksek dayanımlı beton üretiminde söz konusu olurken, uçucu kül normal dayanımlı betonlarda göz önüne alınır. Bunun nedeni silis dumanının pozzolanik etkinliğinin daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. [2].

Silis dumanına olan talebin yüksek, üretimin düşük olması fiyatının artmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda silis dumanı, ancak çok yüksek dayanım ve durabiliteye sahip çok kaliteli betonların istendiği özel yapılarda kullanılabilir. [2].

1.1. Pozzolanik Etkinlik

Bir maddenin pozzolanik etkinliği, betonda hidratasyon ürünü olarak daima mevcut bulunan kalsiyum hidroksiti ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), kalsiyum silikat hidrata (C-S-H) dönüştürebilme yeteneğidir. Daha yüksek silis içeriği ve bunun daha amorf ve küçük taneciklerden oluşması pozzolanik etkinliği arttırır. [3].

1.2. Reolojik Özellik - Tiksotropik Etkinlik

Tiksotropik etkinlik, akışkan betona kohezif ve yapışkan özellik kazandırma yeteneğidir.[3]. Silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcıların birlikte betona katılmaları çok düşük su/çimento oranlarında bile pompalanabilir tiksotropik karışımların elde edilmesine olanak verir. [1].

1.3. Yüksek Dayanımlı Betonlarda Kırılğanlık

Silis dumanı, betonun duktilitesi üzerinde kendi başına önemli bir değişiklik yapmamasına karşın, süper akışkanlaştırıcı ve silis dumanı ile elde edilen yüksek dayanımlı betonlar kırılğan bir malzeme gibi davranır. Ancak kırılğan malzemenin kullanılması yapının kırılğan olmasını gerektirmez çünkü donatı yardımıyla tamamen duktil bir yapı oluşturulabilir. [1].

Silis dumanı-süperakışkanlaştırıcı katkılı, yüksek dayanımlı betonlar, genellikle betonarme yapılarda kullanım amaçlı olduğundan, bu problem uygun çözümlerle ortadan kaldırılabilir.

1.4. ÇATLAMAYA KARŞI DUYARLILIK

Genelde, silis dumanı katkılı çimento karışımları katkısız olanlara göre daha yüksek rötre potansiyeli içerir. Karıştırma yönteminin, silis dumanı katkılı betonlarda çatlak oluşması üzerinde önemli etkisi olduğu deneylerde görülmüştür. [1]. Çimento ve silis dumanı normal biçimde suyla karıştırıldığında, kalıplanan ve nemli ortamda saklanan numunelerde ilk 24 saat içerisinde bile çatlaklar oluşmuş; buna karşılık suyla silis dumanı önceden karıştırılarak elde edilen şerbete çimento katıldığında bu çatlaklara rastlanmamıştır. Böylece ön-ıslatma yapılmadığı takdirde silis dumanının çimento şerbetinden su çekerek "dahili" kuruma rötresine ve dolayısı ile görünür çatlaklara neden olduğu düşünülebilir. [1].

2. YÜKSEK DAYANIM

Değişik dozajlarda iki çeşit portland çimentosu kullanılarak katkısız, sadece süperakışkanlaştırıcı katkılı ve süperakışkanlaştırıcı ile silis dumanı önceden karıştırılarak kullanıma hazır toz bir ürün katkılı olarak hazırlanan çeşitli beton karışımların 1, 7, 28 günlerdeki basınç dayanımları Şekil 1-6 da verilmektedir.

3. YÜKSEK DURABİLİTE [1]

Önceki bölümde söz edilen, kullanıma hazır silis dumanı-süperakışkanlaştırıcı karışımı toz ürün (SF-SP olarak anılacaktır) ile katkılı olarak hazırlanan betonlar üzerinde "doğal" kimyasal zararlı etkenlere karşı dayanıklılık araştırması yapılmıştır.

3.1. SULFAT ETKİSİ

Sülfatlar betonlarda ciddi hasarlara yol açabilirler. Nemli ve soğuk ortamlarda sülfat etkisi büyük boyutlara ulaşır. Sülfatların varlığının sebebi betonun bulunduğu çevreye bağlıdır (deniz suyu, endüstriyel çevre, vb. gibi). Bazı durumlarda ise agregalarda "istenmeyen" yabancı madde olarak betonun içerisinde de yer alabilirler. Alçı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) veya anhidrit (CaSO_4) damarlarının kaya katmanları arasında bulunması olasıdır ve bunların şantiye şartlarında tespiti oldukça zordur. Şekil 7 sülfat etkisiyle betonun tamamen parçalanabileceğini göstermektedir.

Etringit ($\text{C}_3\text{A} - 3\text{CaSO}_4 - 32\text{H}_2\text{O}$) ve taumasit ($\text{CaSiO}_3 - \text{CaSO}_4 - \text{CaCO}_3 - 15\text{H}_2\text{O}$) oluşurken hacim artışı gösterirler ve sülfatların etkisi sonucu beton içerisinde meydana gelirler. Bu olay nemli ve soğuk ortamda ($0 - 10^\circ\text{C}$) hızlanır.

Şekil 8'de sülfat içeren agregalarla üretilip 28 günlük kür

sonrasında 5°C su içinde tutulan betonların davranışını göstermektedir. Görüldüğü gibi SF-SP betonu sülfat etkisine karşı dayanabilmektedir.

3.2. Klorun Donatı ve Beton Üzerindeki Etkisi

Klorun donatı üzerindeki etkisi iyi bilinmektedir. Ancak beton üzerindeki etkisi daha az bilinir çünkü henüz yeni tesbit edilmiş bir olgudur.

Betonun karşılaşabileceği klor bileşikleri genellikle sodyum klorür (NaCl) ve kalsiyum klorür (CaCl_2) tuzlarıdır. Her ikisi de buz çözücü olarak karayollarında kullanılır ve ayrıca NaCl deniz suyunda da bulunur. Donatı üzerindeki etkileri her iki tuz için de esas olarak aynıdır, betonu etkileme mekanizması açısından farklılık gösterirler.

3.2.1. Beton Üzerinde CaCl_2 Etkisi

CaCl_2 çözeltisi ile temas halindeki beton oldukça hızlı bir şekilde bozulur. Çözelti konsantrasyonu arttıkça ve ortam ısısı düştükçe bozulma hızlanır.

Başlangıçta bozulma, agrega-harc yüzeyinde çimento şerbetinin bağlayıcılığını yitirmesiyle çatlak şeklinde ortaya çıkar. CaCl_2 nin zararlı etkisi kalsiyum hidroksiti (CaOH), kalsiyum oksiklorite ($3 \text{CaO} - \text{CaCl}_2 - 15 \text{H}_2\text{O}$) dönüştürmesinden ibarettir. CaCl_2 nin sebep olduğu beton bozulması sülfatlarınkinden çok daha hızlı gelişir. Şekil 9, zamana karşı bu olayın gelişimini vermektedir. Görüldüğü gibi bir kaç gün içerisinde ilk çatlaklar görülmekte ve bir kaç ay içerisinde numuneler parçalanmaktadır. SF-SP beton numunesi su/çimento oranı oldukça yüksek (0.50) olmasına karşın zarar görmeden dayanabilmektedir. Ancak donatı korozyonu söz konusu ise geçirimsizliği arttırmak amacıyla su/çimento oranının düşürülmesi gerekir.

Kullanılan ürünün esas içeriğini teşkil eden amorf silis, süper pozzolanik etkinliği sonucu beton içerisindeki kalsiyum hidroksit ile reaksiyon yaparak kalsiyum hidrosilikat oluşturur, böylece CaCl_2 nin zararlı reaksiyonu gerçekleşmez.

3.2.2. Beton Üzerinde NaCl Etkisi

Sodyum klorür önceki paragrafta açıklanan beton bozulmasına doğrudan sebep olmaz; agrega-alkali reaksiyonuna katkıda bulunarak dolayısıyla betonun parçalanmasına sebep olabilir.

Agregalar belli miktarlarda amorf silis içerdiği takdirde (ASTM C-289), sodyum, potasyum gibi alkalilerle reaksiyona girerler; eğer ortam nemli ve kalsiyum hidroksit açısından zengin ise hidrate sodyum silikat oluşur. Bu olay da beraberinde agrega ve beton hacimlerinde genleşme getirir.

Alkali-agrega reaksiyonu, betona zararlı reaksiyonlar arasında belki de en sinsi olanıdır.

Öncelikle agregaların reaktivitesinin tespit zorluğu, akabinde bu reaksiyonun sonucunun ortaya çıkması için uzun yıllar alındığından, olayın farkına varmak oldukça zordur.

Bu zararlı reaksiyonda önemli olan tek kriter sadece reaktif silis miktarı değildir, beton içerisindeki sodyum ve potasyum konsantrasyonu da çok önemlidir. Bu durum Şekil 10 da açıklanmaktadır. Aynı özelliklere sahip iki beton numuneden su içinde saklanan önemli bir değişiklik göstermezken, % 10 NaCl çözeltisine bırakılan numune bozulmaktadır. Boyut değiştirme oranı NaCl çözeltisindeki numune için ASTM C-227 standardında belirtilen sınırın çok üzerine çıkmaktadır.

Süperakışkanlaştırıcı kullanımıyla su/çimento oranının düşürülmesi de problemi çözmemektedir. (Şekil-11).

SF-SP betonunda ise problem çözülmekte ve NaCl çözeltisinde bekletilen beton numune, su içinde saklanmış gibi sonuç vermektedir. (Şekil-12)

SF-SP betonlarında alkali-agrega reaksiyonun önlenebilmesine sebep olarak üç mekanizmadan söz edilebilir:

A) Su/çimento oranının düşürülmesi ve aynı zamanda çok küçük boyutlu silis taneciklerinin mükemmel dolgu yapması sayesinde, boşluksuz çok yoğun bir mikro yapıya ulaşılır ve alkalin tuzların betona sızması önlenir.

B) Amorf silis taneciklerinin pozzolanik etkinliği sonucu beton içerisindeki Ca(OH)_2 ortamdan çekilir ve agrega-alkali reaksiyonu gelişemez.

C) SF-SP katılması ile betondaki amorf silis miktarında artış olur ve bunlar da alkali reaksiyonuna açıktırlar, ancak beton içerisinde çok düzgün bir dağılım gösterdiklerinden dolayı reaksiyon sonucu oluşacak gerilmelerin agrega taneleri etrafında yoğunlaşması önlenmiş olur.

3.2.3. DONATI ÜZERİNDE KLOR ETKİSİ

Klor tuzlarının kation ne olursa olsun (Na veya Ca) beton pas payını geçerek donatıya ulaştıklarında, demir üzerinde bulunan koruyucu tabakayı yok ederek korozyona sebep olduğu bilinmektedir.

Bu konudaki dayanıklılığı arttırmamanın yolu, klorların donatıya ulaşma süresini arttırmaktır. Bu amaçla iki olasılık göz önüne alınabilir. Birincisi yolu uzatmak, yani pas payını kalınlaştırmak; ikincisi ve daha uygun olanı ise bu yolu geçirimsiz hale getirmektir.

SF-SP betonlarda elde edilen boşluksuz, yoğun mikro yapı sayesinde 25 mm pas payı ağır şartlarda dahi yeterli korumayı sağlamaktadır.

3.3. KARBONDİOKSİTİN BETON VE DONATI ÜZERİNE ETKİSİ

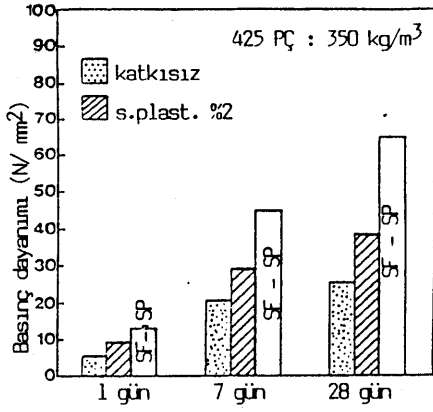
Havada ve doğal sular da bulunan karbondioksit (CO_2), betonla iki değişik mekanizma içinde etkil e ş i r: ı s l a n m a (leach-out) ve karbonasyon. Birinci mekanizma ço ğ u n l u k l a su yapılarında görü l ü r ve fazla CO_2 içeren doğal suların çözücü etkisini içerir. Betondaki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile birleşerek, kolay-çözünür bir tuza (kalsiyum bikarbonat) dönüşerek ortamdan kolayca ayrılabilir. Özellikle akar suların bu tip etkil e ş i m i y l e başta kalsiyum hidroksit olmak üzere betonda malzeme kaybı olur. Bu olay çok yavaş seyreder ve genellikle sadece beton yüzeyini etkiler. Pozzolan katkılı çimentoyla orta kalitede üretilip sıkıştırılmış betonlar bu etkiye karşı koyabilir. Özel dayanıklı beton hazırlamaya gerek yoktur.

İkinci mekanizma, yani karbonasyon olgusu, havada bulunan CO ile ilgilidir. Beton içerisindeki demir donatının korozyonunu kolaylaştırarak betonarme yapının hasarına yol açar. Beton içerisine gömülü demir donatının, çevresindeki pH 12 mertebesindeki bazı ortam dolayısıyla korozyona karşı yüksek düzeyde korunmaya sahip olduğu bilinmektedir. Havadaki CO_2 , betona sızarak $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'i nötrale etmesi sonucu pH 10 civarına düşer, bu şartlarda demirin etrafındaki koruyucu kalkan (demir-oksit) kırılır. Ancak demiri pas a (demir-hidroksit) dönüştüren oksijen ve nem betona sızmadan önce korozyon başlamaz. Yani karbonasyon, demirin korozyonu için gerekli fakat yetersiz bir koşuldur. ACI Committee 20'e göre kaliteli üretilip iyi yerleştirilmiş ve kuru yapılmış betonlarda karbonasyon tehlike oluşturmaz. Gözenekli, geçirimli ve ince pas payı olan betonlar ile inşa edilmiş betonarme yapılarda karbonasyon tehlikesinden korkulmalıdır.

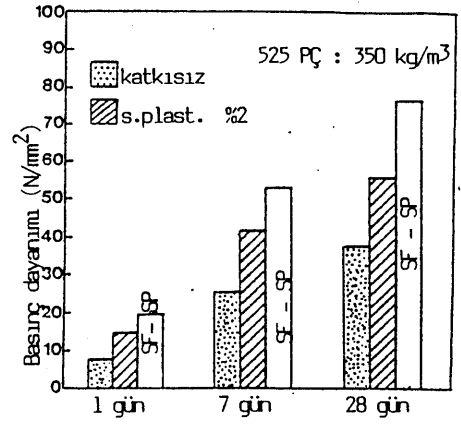
SF-SP katkılı ve en fazla 0.50 su/çimento oranıyla üretilmiş betonlar, CO_2 nin yukarıda açıklanan her iki tehlikesine karşı etkili bir korumaya sahip olurlar.

SONUÇ

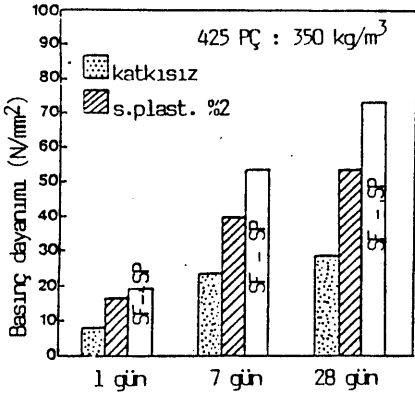
SF-SP katkılı betonlarda boşluksuz çok yoğun bir mikro yapı elde edilebilmektedir. Bu sayede çok yüksek basınç dayanımlarına ve doğal kimyasallara karşı yeterli durabiliteye sahip betonlar üretilmektedir. Yoğun mikroyapı zararlı kimyasalların betona sızmasına fiziksel açıdan engel olmakta, pozzolanik etkinlik sayesinde ortamdan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çekilmesi ile de zararlı kimyasal reaksiyonlar önlenmektedir. Sözü edilen şekilde katkılı üretilmiş taze betonların reolojik özellikleri de üstün nitelikte olmaktadır. Tiksotropik karakter yani akışkan olmasına karşın çok kohezif olması, su altı dökümlerinde de malzemenin sürüklenip ayrışma eğilimine engel olur.



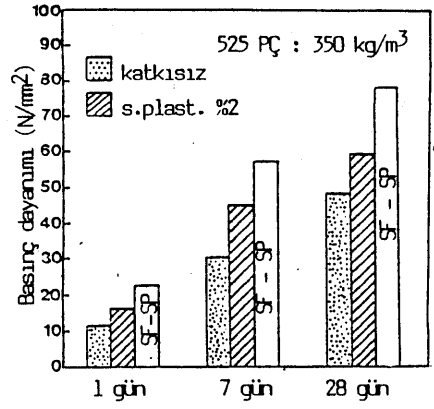
Şekil 1



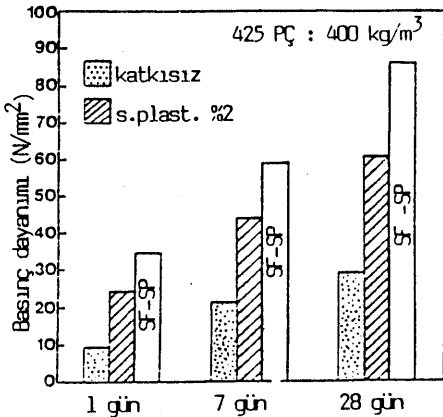
Şekil 2



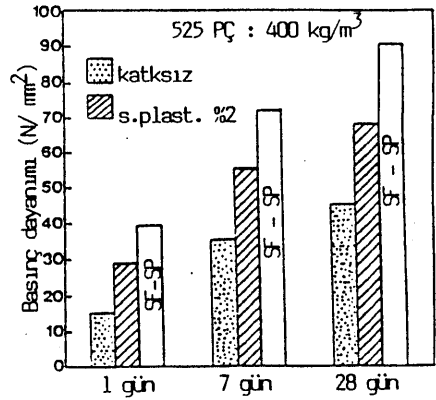
Şekil 3



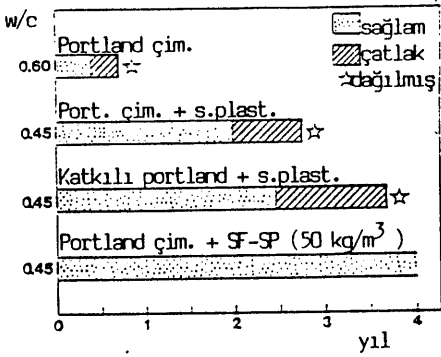
Şekil 4



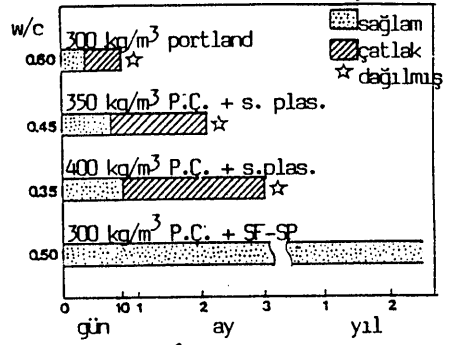
Şekil 5



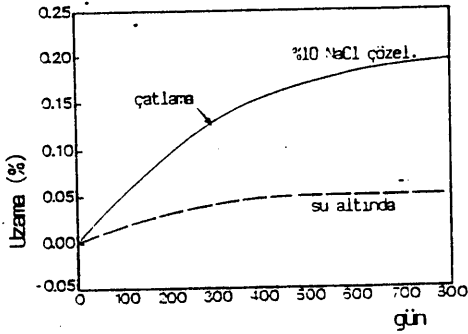
Şekil 6



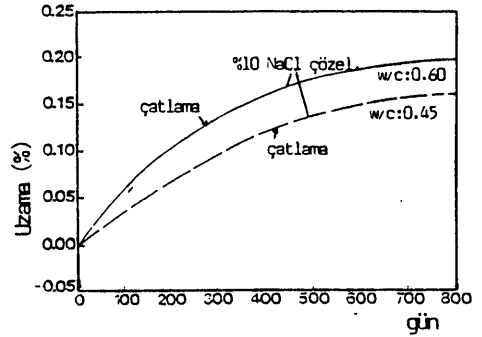
Şekil 8: Agrega bünyesindeki anhidrit dolayısı ile 5°C'de sulfat etkisi. Tüm betonlarda 350 kg/m³ çim., ϕ max 20 mm slump 200 mm.



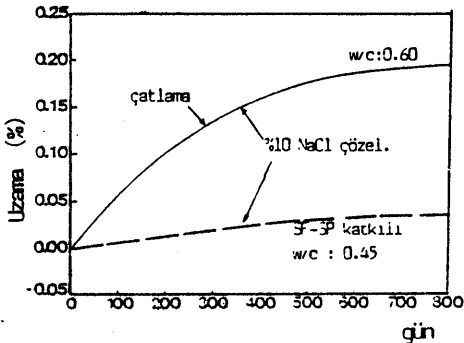
Şekil 9: 5°C sıcaklıkta %30 CaCl₂ çözeltisinde saklanan beton numunelerinin etkilenmesi.



Şekil 10: Suda ve %10 NaCl çözeltisinde saklanan betonların genişlemesi. w/c:0.60, 350 kg/m³ PÇ, 200 mm slump ϕ max 20 mm reaktif agrega.



Şekil 11: S.plast. kullanılarak düzenlenen w/c oranının alkali-agrega reaksiyonuna etkisi. 350 kg/m³ PÇ, 200 mm slump, ϕ max 20 mm reaktif agr.



Şekil 12: SF-SP katkısının alkali-agrega reaksiyonuna etkisi. 350 kg/m³ PÇ, 200 mm slump, ϕ max 20 mm reaktif agrega.

KAYNAKLAR

[1] Collepardi, M. " Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Europe: Future Directions" International Workshop on the Use of Fly Ash, Slag, Silica Fume and other Silicious Materials in Concrete, Chatswood, Australia 1988

[2] Collepardi, M., Monosi S., Valente, M. "Optimisation of Superplasticiser Type and Dosage in Fly Ash and Silica Fume Concretes" 3 rd International Conference on Superplasticisers and other Chemicals in Concrete, Ottawa, Canada 1989

[3] Collepardi, M. "Reheobuild TDS" Il Calcestruzzo Oggi-Mac Spa House Organ, Treviso Italy, vol 16, No 1, April 90, 48-63