

# Betonda UK, GYFC ve SD'nin Rolü: Mevcut Bilgi Birikimi\*

Mustafa Tokyay<sup>1</sup>

## Özet

Betonda kullanılan üç önemli mineral katkı olan uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanının (SD) beton malzemesi olarak kullanımı sürekli artmaktadır. Gerek çimento bileşeni olarak gerekse betona doğrudan katılarak kullanılan her üç malzeme de betonların taze ve sertleşmiş haldeki davranışları ve dayanıklılık özellikleri açıklanmıştır. Betonda kullanımlarına ilişkin uluslararası standartlar gözden geçirilmiştir.

## GİRİŞ

Uçucu kül (UK), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ve silis dumanının (SD) beton malzemesi olarak kullanımı sürekli artmaktadır. Gerek çimento bileşeni olarak gerekse betona doğrudan katılarak kullanılan her üç malzeme de betonların taze ve sertleşmiş haldeki tüm özelliklerine etki eder.

Üçü de birer endüstriyel yan ürün olan bu malzemelerin betonda kullanımına ilişkin dünyadaki ilk çalışma ve araştırmalar YFC için 1800'lerde, UK için 1930'larda, SD içinse 1940'ların sonunda başlamıştır [1]. Ülkemizdeyse ilk iki malzeme için 1950'lerin sonunda üçüncü malzeme içinse 1980'lerde araştırmalara başlanmıştır.

Bu malzemelerin betonda kullanılmasının ekonomik, teknik ve ekolojik yararları bulunmaktadır. Başlangıçta çimento ve betonda mineral katkıların daha çok ekonomik kaygılarla kullanıldığı söylenebilir. Ancak, bugün geldiğimiz aşamada söz konusu malzemelerin bilinçli kullanılmasıyla, betonların hemen hemen tüm mühendislik özelliklerine olumlu etkiler yapabileceği; genellikle bağlayıcı malzeme içindeki portland

çimentosu miktarını düşürerek CO<sub>2</sub> salınımını azalttıkları ve kullanılmamaları durumunda birer atık olan bu malzemelerin geri dönüşümüyle sağlanan çevresel yararlar bilinmektedir.

## 2. UK, GYFC VE SD'NİN ÜRETİMLERİ

Kömür yakan termik santraller ve demir, silikon metal ve ferrosilikon alaşım üretimlerinde kullanılan fırınlar bu malzemelerin kaynaklarıdır. UK, GYFC ve SD'nin üretimleri ayrı ayrı aşağıdaki alt bölümlerde verilmiştir.

### Role of FA, GBFS and SF In Concrete: Present Accumulation of Knowledge

The production, properties, and functions in concrete of the three important mineral admixtures for concrete, namely fly ash, ground granulated blast furnace slag and silica fume are presented. Properties of fresh and hardened concretes containing these admixtures are explained. Relevant international standards are reviewed.

### 2.1. UK Üretimi

UK yakıt olarak öğütülmüş kömür kullanılarak elektrik enerjisi üreten termik santrallerin yan ürünlerinden bir tanesidir. Buhar türbinlerinden elektrik enerjisi elde etmek için gereken buharı sağlamak üzere suyun ısıtılması için kömür yakılmaktadır. Böylece kömürün ısı enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Bu maksatla linyit ve antrasit gibi farklı kömür türleri kullanılmaktadır [2]. Yanma işlemi sırasında kömürün içerdiği karbon ve yanıcı

diğer maddeler dışında kalan kil, şeyl, kuvarz, feldspat, vb. safsızlıklardan oluşan kül baca gazları içinde askıda kalır. Bir kısmı bir araya gelerek taban külünü oluştururken, uçucu kül olarak adlandırılan çok daha büyük bir kısmı baca gazlarıyla taşınarak mekanik ve elektrostatik filtrelerde tutulurlar [3]. Söz konusu malzemenin boyutları 0,5-100 µm arasındadır. %50-85 arasında değişen amorf faza sahiptir.

Ülkemizdeki toplam elektrik enerjisi üretiminin yaklaşık %29'u kömür yakan termik santrallerden sağlanmaktadır.

\* Beton 2013 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, mtokyay@metu.edu.tr

Bu santrallerin toplam kurulu gücü 10097 MW'tır [4]. Söz konusu kurulu güçten yola çıkılarak, ülkemizde yılda yaklaşık 14 milyon ton uçucu kül üretildiği tahmin edilmektedir.

## 2.2. GYFC Üretimi

Pik demir üretiminde yüksek fırınlarda demir filizinin içerdiği safsızlıklar, yakıt olarak kullanılan kokun külü ve filizin demire indirgenmesini kolaylaştırmak üzere kullanılan kalke- rin yanma sonrası kalıntılarından oluşan yüksek fırın cürufu 1400-1600°C'de eriyik halde elde edilir. Özellikleri yüksek fırından çıktıktan sonra uygulanan soğutma yöntemine bağlıdır. Havada yavaş soğutulduğu takdirde kristal yapıya sahip  $C_2AS-C_2MS_2$  katı eriyiği halindedir [5]. Suda ani soğutma yapıldığında hemen hemen tamamıyla camsı yapıya sahip olur. Ani soğutma su havuzuna boşaltılarak (100m<sup>3</sup> su/ton cüruf) veya basınçlı su püskürterek (3 m<sup>3</sup> su/ton cüruf) yapılabilir. Ani soğutma işlemi sonrasında cüruftaki fazla su filtreleme ve kurutma değirmenleri vasıtasıyla atılır. Öte yandan, peletleme yöntemi veya yarı kuru yöntem olarak adlandırılan daha modern bir hızlı soğutma yönteminde eriyik haldeki cüruf önce basınçlı suyla (1 m<sup>3</sup> su/ton cüruf) daha sonra da döner kazanlarda havayla soğutulur. Bu yöntem kullanılarak 4-15 mm ve < 4mm boyutlarında granüle yüksek fırın cürufu elde edilir [6]. Büyük boyutlu olan granüller çok gözenekli olup kısmen kristal yapıya sahiptir. Küçük boyutlu olanlarsa tamamıyla camsı yapıya sahip olup, öğütüldüğünde betonda ve çimentoda mineral katkı olabilecek niteliklere sahiptir [7]. Kesin verilere ulaşmak mümkün olmamakla birlikte, ülkemizdeki granüle yüksek fırın cürufu üretimi 350000 ton/yıl civarında tahmin edilmektedir.

## 2.3. SD Üretimi

Silikon metal veya ferrosilikon alaşım endüstrisinin bir yan ürünüdür. Elektrik ark fırınlarında 2000°C'ye varan sıcaklıklarda kuvarzın silikona indirgenmesi sırasında oluşan SiO buharı fırının daha düşük sıcaklıktaki bölümlerine geldiğinde oksitlenir ve küçük küresel tanecikler şeklinde yoğunlaşır. Malzemenin hemen hemen tamamı amorf yapıdadır. Ortalama tane boyutu 0,1 µm civarındadır. Baca gazlarıyla fırın dışına çıkan SD torba filtrelerde toplanır [5].

Ülkemizde SD Antalya Ferrokrom tesislerinde elde edilmekte olup yıllık üretim miktarı 500-1000 ton civarındadır.

## 3. UK, GYFC VE SD'NİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde UK, GYFC ve SD'nin mineralojik ve kimyasal kompozisyonları ve çeşitli fiziksel özellikleri ayrı ayrı verilmiştir.

### 3.1. Uçucu Küller

Uçucu küllerin kompozisyonları ve fiziksel özellikleri termik santralde yakılan kömürün karakteristiklerine ve kompozisyonuna, yakma sıcaklığına ve toplama yöntemine bağlıdır.

**Mineralojik Kompozisyon:** Baca gazlarıyla taşınan uçucu küllerin, hızlı soğuma sonucunda büyük bir kısmı (%50-85) amorf yapıdadır. Termik santrallerdeki yakma sıcaklığı 1000-1400°C arasındadır. Bu aralıklarda yakılan kömürlerden elde edilen uçucu küllerin mineral fazları gerek tür gerekse miktar açısından farklılıklar gösterir. Öte yandan, kullanılan kömürün içerdiği safsızlıklar uçucu külün mineralojik kompozisyonuna yansır. Çizelge 1'de çeşitli antrasitlerden ve linyitlerden elde edilen uçucu küllerde bulunan önemli mineraller ve miktarları belirtilmiştir.

**Çizelge 1.** Uçucu Küllerde Bulunan Önemli Mineraller [2, 8, 9].

| Mineral    |                   | Miktar Aralığı (%)                   |                                    |
|------------|-------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Adı        | Formülü           | Antrasitten elde edilen uçucu Küller | Linyitten elde edilen uçucu küller |
| Kuartz     | SiO <sub>2</sub>  | 2,0-8,5                              | 2,0-6,0                            |
| Mullit     |                   | 6,5-14,0                             | 1,0-5,0                            |
| Hematit    |                   | 1,5-7,0                              | 2,0-6,0                            |
| Magnetit   |                   | 0,5-10,0                             | 0,6-2,5                            |
| Kireç      | CaO               | ≤ 3,5                                | 5,0-30,0                           |
| Anhidrit   | CaSO <sub>4</sub> | nil                                  | 0,7-16,9                           |
| Plagioklas |                   | nil                                  | nil-28                             |
| Amorf faz  | -                 | 45,0-95,4                            | 30,0-80,0                          |

**Kimyasal Kompozisyon:** Mineralojik kompozisyonlarda olduğu gibi, uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları da elde edildikleri kömürün içerdiği safsızlıklara bağlı olarak birbirinden önemli farklılıklar gösterir. Antrasitten elde edilen uçucu küller silika ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) bakımından zengindirler. Linyitten elde edilen uçucu küllerde de genellikle bu üç oksit yüksek olmakla birlikte, kireç ( $\text{CaO}$ ) ve kükürt trioksit ( $\text{SO}_3$ ) çok miktarda bulunabilir. Bunların yanı sıra  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  vb oksitler de uçucu küllerde az miktarlarda vardır.

Alonso ve Wesche [2] uçucu külleri, betonda kullanıma uygunlukları bakımından içerdikleri ana oksit miktarlarına bağlı olarak dört ana sınıfa ayırmışlardır. Bu sınıflandırma Çizelge 2’de verilmiştir. Çizelge 2’de belirtilen Tip I ve II uçucu külleri betonda puzolanik malzeme olarak kullanmak uygundur.

**Çizelge 2.** Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonlarına Göre Sınıflandırılması [2].

| Oksit                   | Miktar (%) |                  |              |            |
|-------------------------|------------|------------------|--------------|------------|
|                         | Tip I UK   | Tip II UK        | Tip III UK   | Tip IV UK  |
| $\text{SiO}_2$          | >50        | 35-50            | <35          | düşük      |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 10-20      | yüksek           | Tip I’den az |            |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ |            | orta             |              |            |
| $\text{CaO}$            | <7         | Tip I’den yüksek | yüksek       | çok yüksek |
| S. $\text{CaO}$         | düşük      | düşük            |              | yüksek     |
| $\text{SO}_3$           |            |                  |              | yüksek     |
| Diğer                   |            |                  |              |            |

Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonlarının ne ölçüde farklılıklar gösterebileceğine bir örnek olarak Çizelge 3 verilmiştir. Bu çizelgede antrasit, bitümlü, az bitümlü ve linyit kömürlerinden elde edilen uçucu küllerin oksit miktar aralıkları belirtilmiştir.

**Çizelge 3.** Değişik Kömürlerden Elde Edilen Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyon Aralıkları [2].

| Oksit (%)               | Uçucu Küllerin Elde Edildiği Kömür Cinsi |         |            |        |
|-------------------------|------------------------------------------|---------|------------|--------|
|                         | Antrasit                                 | Bitümlü | Az Bitümlü | Linyit |
| $\text{SiO}_2$          | 47-68                                    | 7-68    | 17-58      | 6-45   |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 25-43                                    | 4-39    | 4-35       | 6-23   |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 2-10                                     | 2-44    | 3-19       | 1-18   |
| $\text{CaO}$            | 0-4                                      | 1-36    | 2-45       | 15-44  |
| $\text{MgO}$            | 0-1                                      | 0-4     | 0-8        | 3-12   |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | -                                        | 0-3     | -          | 0-11   |
| $\text{K}_2\text{O}$    | -                                        | 0-4     | -          | 0-2    |
| $\text{SO}_3$           | 0-1                                      | 0-32    | 3-16       | 6-30   |

**İncelik ve Tane Şekli:** Uçucu küllerin inceliği çoğunlukla elek analiziyle ölçülür. 45  $\mu\text{m}$  göz açıklığındaki eleğin üstünde kalan UK miktarı bir çok standart tarafından önemli bir ölçü olarak belirtilmiştir. Uçucu küllerin inceliği termik santralde yakılan toz kömürün inceliğiyle doğrudan ilişkilidir. Tane boyutları 0,2-200  $\mu\text{m}$  arasındadır. Blaine yöntemiyle saptanan uçucu kül incelikleri 250-550  $\text{m}^2/\text{kg}$  arasındadır. Uçucu kül tanecikleri elde edildiği kömürün cinsine ve granülometrisine ve termik santralin yakma sıcaklığına bağlı olarak küresel, köşeli, düzgün olmayan vb. şekillerde olabilir. Yakma sıcaklığının düşük olduğu durumlarda ( $\sim 1100^\circ\text{C}$ ) düzgün olmayan şekilli tanecikler ortaya çıkar. Yüksek sıcaklıklarda ( $>1600^\circ\text{C}$ ) kömürün içerdiği safsızlıklar eriyerek senosfer adı verilen içi boş kürecikler oluşturur. Zaman zaman büyük küre taneciklerin içi daha küçük kürelerle dolabilir. Bu tür tanelere plerosfer adı verilir. 1300-1500 $^\circ\text{C}$  yakma sıcaklıklarında yuvarlak, içi boş, dış yüzeyi pürüzlü veya pürüzsüz uçucu kül taneleri elde edilir [2].

**Yoğunluk:** Uçucu küllerin görünür ortalama yoğunluğu 1,80 ile 2,50 g/cm<sup>3</sup> arasında değişir. Farklı tane aralıkları için yoğunluk değerleri en az 0,50 g/cm<sup>3</sup> en çok ise 2,60 g/cm<sup>3</sup> olarak saptanmıştır. Yüksek yoğunluk değerlerinin temel nedeni olarak uçucu külün içerdiği Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı belirlenmiştir.

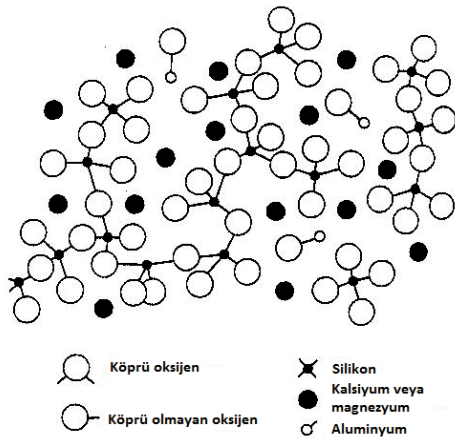
**Radyoaktivite:** Mineral, kayaç, kömür, vb. bir çok malzemede radyoaktivite bulunabilir. Bu özellik malzemelerin içerdiği, çekirdeği kendiliğinden bozunarak parçacık veya elektromanyetik radyasyon yayan iz elementlerin varlığından kaynaklanır. Radyoaktivite çoğunlukla bir kararsız elementin birim zaman içinde birim kütledeki bozunma sayısı (Bequerel) olarak ölçülür. Beretka ve Brown'a göre [10] yapı malzemelerindeki radyoaktivite Ra<sup>226</sup>, Th<sup>232</sup> ve K<sup>40</sup> miktarlarıyla ölçülür ve Ra<sup>226</sup> eşdeğeri (Ra<sub>esd</sub>) olarak belirtilir. 1998 ve 2010 yıllarında yapılmış olan iki araştırmada [11, 12] Türkiye uçucu küllerinin Ra<sub>esd</sub> aktiviteleri, sırasıyla, 286-1166 ve 72,5-2760 arasında belirlenmiştir.

### 3.2. Granüle Yüksek Fırın Cürufu

GYFC'nin özellikleri yüksek fırında kullanılan demir filizinin, kalkerin ve kokun özellikleri ve miktarlarına bağlı olarak çok geniş bir çeşitlilik gösterebilir.

**Mineralojik Kompozisyon:** Granüle yüksek fırın cürupları ani soğutulmuş sıvı silikat gibi tanımlanabilir [6]. Camı silikanın bazı Si-O-Si bağları kopmuş, bazı Si<sup>4+</sup> iyonlarının yerini Al<sup>3+</sup> almıştır. Bu durumda nötr elektriksel yük eksi hale dönüştüğünden yeniden nötr yapıyı sağlayabilmek araya giren Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> katyonlarıyla mümkün olmaktadır [6, 7, 13]. Söz konusu yapı Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.

GYFC'nin çok büyük bir miktarı camı yapıya sahip olmakla birlikte, az miktarlarda merwinite (C<sub>3</sub>MS<sub>2</sub>), melilit [gehlenit (C<sub>2</sub>AS) ve akermanit (C<sub>2</sub>MS<sub>2</sub>) kompozisyonları aralığındaki kalsiyum alüminyum magnezyum silikat katı eriyiği] gibi kristal fazlar da içerebilir. Cürufun camı yapısı X-ışını difraktogramlarında (Cu K $\alpha$ ) 20-30° 2 $\theta$ 'ya karşı gelen geniş bir kamburla kendini gösterir (Şekil 2).



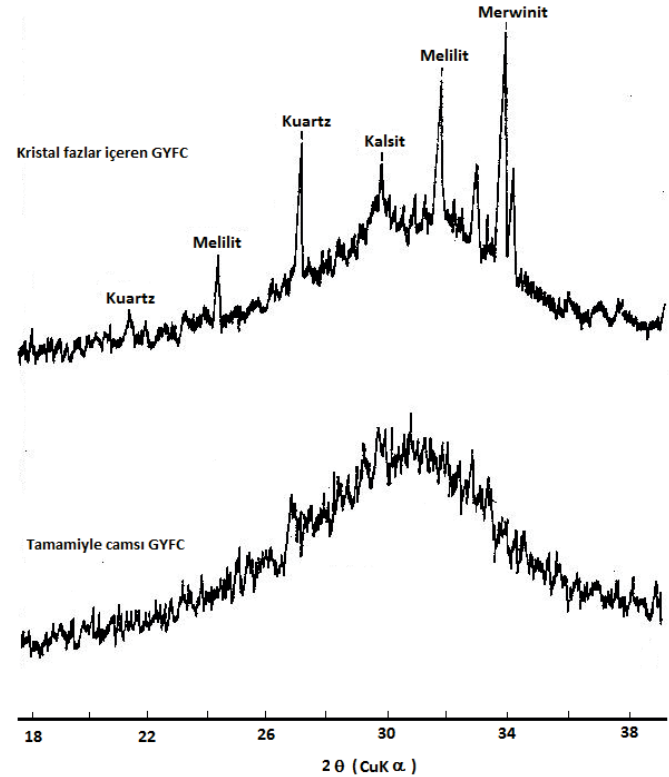
**Şekil 1.** Camı GYFC'nin şematik yapısı [6].

**Kimyasal Kompozisyon:** Bir GYFC'nin çimento ve betonda kullanıma uygunluğunda en önemli parametre içerdiği camı fazın miktarıdır. Bunun yanı sıra kimyasal kompozisyonları da önem taşımaktadır. Örneğin, CaO+SiO<sub>2</sub>+MgO miktarının en az %67 olması beklenir. GYFC'lerin tipik kimyasal analizleri Çizelge 4'de verilmiştir.

Bazı GYFC'lerde MgO miktarının yüksek olması, bu oksitin serbest halde bulunmaması nedeniyle, betonda kullanım açısından sorun yaratmaz [6].

**İncelik:** GYFC çimentolu sistemlerde, değirmenlerde öğütülerek istenilen inceliğe getirildikten sonra kullanılır. Söz konusu incelik genellikle 350-600 m<sup>2</sup>/kg civarındadır.

**Renk:** GYFC'ye has bir özellik olarak, dökümden iki ila dört gün sonra betonda yeşilimsi mavi bir rengin oluşması mümkündür. Söz konusu renk değişimine cürufun içerdiği sülfitle çimentonun tepkimesinin yol açtığı belirtilmektedir. Oluşan bileşenlerin zamanla oksitlenmesiyle bu renk kaybolur. Renk değişiminin betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerine olumsuz bir etkisi saptanmamıştır [14].



**Şekil 2.** GYFC X-ışını difraktogramları [13].

**Çizelge 4.** GYFC'lerin Tipik Kimyasal Kompozisyonları.

| Oksit (%)                      | Aralık [15] | Türkiye GYFC'leri (2010-2011) |        |        |
|--------------------------------|-------------|-------------------------------|--------|--------|
|                                |             | GYFC 1                        | GYFC 2 | GYFC 3 |
| SiO <sub>2</sub>               | 30-40       | 35,7                          | 41,6   | 39,6   |
| CaO                            | 35-48       | 31,8                          | 32,7   | 33,4   |
| MgO                            | 2-15        | 7,5                           | 7,0    | 6,1    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5-17        | 13,5                          | 13,9   | 15,8   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,2-1       | 3,11                          | 1,1    | 0,7    |
| Kükürt                         | 0,6-2       | 0,1*                          | 1,6*   | 0,2*   |

\*SO<sub>3</sub> miktarı.

### 3.3. Silis Dumanı

Silikon metal ve alaşımlarının üretiminde elektrik ark fırınının şarjı elde edilmek istenen ürüne göre değişir. Örneğin, silikon metal üretimi için fırına yüksek saflıkta kuvarz, kömür ve ahşap yonga verilir; ferrosilikon alaşımların üretimi için bunlara demirli malzemeler ilave edilir. Ferrokrom silikon veya siliko-manganez alaşımları içinse krom ve mangan filizleri de eklenir. Kalsiyum-silikon alaşımları üretiminde kireç kullanılması gerekir. Fırından elde edilmek istenen ana ürünün kompozisyonu ya ürün olan SD'nin kompozisyonunu etkiler.

**Kimyasal Kompozisyon:** Değişik alaşımların üretiminden elde edilen silis dumanlarının kimyasal kompozisyonları Çizelge 5'de verilmiştir.

Yukarıda belirtilen hususların yanı sıra yakma sisteminde ısı geri kazanım ünitesi bulunup bulunmaması SD'lerin kızdırma kaybını etkiler. Bu ünitenin bulunduğu fırınlarda baca gazı çıkış sıcaklığı ~800°C, bulunmadığı fırınlarda ise ~200°C'dir. Birincisinde karbonun tamamına yakını yandığı için elde edilen SD'nin kızdırma kaybı ikincisine göre çok daha düşük olur. Öte yandan, geri kazanım ünitesi bulunan fırınlardan çıkan SDler diğerlerine göre daha açık renkli olur [16].

Çizelge 5'de verilen CaSi ve SiMn alaşımları üretiminden elde edilen SDler betonda kullanım için uygun değildir.

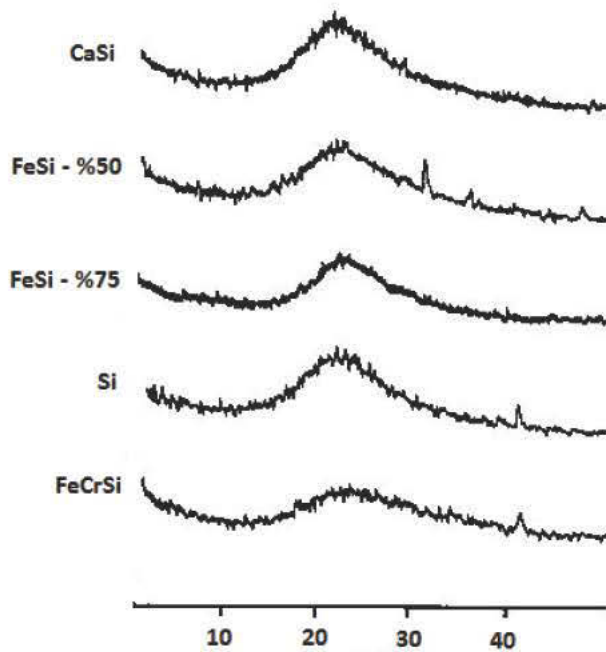
Silis dumanının diğer yapay puzolanlara göre öne çıkan bir özelliği, kimyasal kompozisyonunun zaman içinde çok az varyasyon göstermesidir [18].

**Çizelge 5.** Çeşitli Silikon Metal ve Alaşımları İşlemlerinden Elde Edilen SDlerin Tipik Kimyasal Kompozisyonları [17].

| Bileşen                        | Farklı Metal ve Alaşım Üretimlerinden Elde Edilen SDlerdeki Miktar (%) |            |                               |            |        |      |      |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------|------------|--------|------|------|
|                                | Si                                                                     | FeSi (%75) | FeSi (%75) ısı geri kazanımlı | FeSi (%50) | FeCrSi | CaSi | SiMn |
| SiO <sub>2</sub>               | 94,0                                                                   | 89,0       | 90,0                          | 83,0       | 83,0   | 53,7 | 25,0 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,03                                                                   | 0,6        | 2,9                           | 2,5        | 1,0    | 0,7  | 1,8  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,06                                                                   | 0,4        | 1,0                           | 2,5        | 2,5    | 0,9  | 2,5  |
| CaO                            | 0,5                                                                    | 0,2        | 0,1                           | 0,8        | 0,8    | 23,2 | 4,0  |
| MgO                            | 1,1                                                                    | 1,7        | 0,2                           | 3,0        | 7,0    | 3,3  | 2,7  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,04                                                                   | 0,2        | 0,9                           | 0,3        | 1,0    | 0,6  | 2,0  |
| K <sub>2</sub> O               | 0,05                                                                   | 1,2        | 1,3                           | 2,0        | 1,8    | 2,4  | 8,5  |
| C                              | 1,0                                                                    | 1,4        | 0,6                           | 1,8        | 1,6    | 3,4  | 2,5  |
| S                              | 0,2                                                                    |            | 0,1                           |            |        |      | 2,5  |
| MnO                            |                                                                        | 0,06       |                               | 0,2        | 0,2    |      | 36,0 |
| KK                             | 2,5                                                                    | 2,7        |                               | 3,6        | 2,2    | 7,9  | 10,0 |

**Mineralojik Kompozisyon:** Değişik türdeki SDlerin X-ışınları difraktogramları Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu şekilden anlaşılacağı üzere, türü ne olursa olsun SDlerin hepsi yaklaşık 23° 2θ (CuKα) açısına karşı gelen bölgede gösterdikleri kambur nedeniyle, neredeyse tamamen amorf silikadan oluşmaktadır.





**Şekil 3.** Farklı silis dumanlarının X-ışınları difraktogramları [17]

**İncelik ve Tane Şekli:** Silis dumanının, elektron mikroskopla analizi sonucunda, hemen hemen tamamının 0,01-0,3 µm boyutunda küresel taneciklerden oluştuğu görülür. Ortalama tane boyutu 0,1-0,2 µm arasındadır. Elek analizi ve Blaine yöntemi bu malzemelerin inceliğinin saptanmasında uygun değildir. Azot absorpsiyonu yöntemiyle (BET) saptanan özgül yüzey değerleri 14000-25000 m<sup>2</sup>/kg arasındadır.

Öte yandan, küresel taneciklerden oluşan bir malzemenin özgül yüzey alanıyla ortalama tane çapı arasındaki ilişki olarak yazılabilir. Burada,  $\rho$ : yoğunluk, D: ortalama tane çapı, S: özgül yüzey alanıdır. Elektron mikroskopla görüntü analizi yapılan SD'lerin yukarıdaki ifade kullanılarak hesaplanan özgül yüzeyleriyle BET yöntemiyle saptanan özgül yüzeyleri

arasında oldukça yakın bir ilişki olduğu belirlenmiştir [16].

**Yoğunluk:** Silis dumanlarının yoğunluğu amorf silika yoğunluğuyla (2,2 g/cm<sup>3</sup>) hemen hemen aynıdır ancak, değişik alaşım üretimlerinden kaynaklanan SD'lerin yoğunluklarının 3,1 g/cm<sup>3</sup> gibi nispeten yüksek değerlere vardığı da görülmüştür.

**Elleçleme:** Çok küçük tane boyutları nedeniyle, SD'nin birim hacim ağırlığı 200-250 kg/m<sup>3</sup> civarındadır. Böylesi düşük birim ağırlığı SD'nin taşınması ve kullanılmasında sorunlar yaratır. Taşıma, depolama ve kullanım sırasında karşılaşılan sorunları azaltmak maksadıyla, peletleme, toplama veya bulamaç haline getirme gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Öte yandan, çok ince silis içermesi nedeniyle silikosis rahatsızlığına yol açabileceği düşünülen bu malzeme üzerinde yapılan çalışmalar [16, 19, 20] sonucunda küçük boyutlu kristal silikanın tehlikeli olabileceğini, amorf silikanın zararsız olduğunu göstermiştir. Buna karşın, üretimi ve kullanılması sırasında gerekli koruyucu önlemlerin alınmasında yarar vardır.

#### 4. UK, GYFC VE SD'NİN ÇİMENTO VE BETONDA KULLANIMINA İLİŞKİN ULUSLARARASI STANDARTLAR

Uluslararası kabul görmüş iki standardizasyon kuruluşu olan Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN) ve Amerikan Test ve Malzemeler Birliği (ASTM) UK, GYFC ve SD'nin çimento ve betonda kullanımı hususlarını içeren standartlarını çimento ve beton standartları olarak iki ana grupta toplamak mümkündür. Buna göre, birinci grupta söz konusu malzemelerin çimento bileşeni olmaları, ikinci grupta ise beton malzemesi olarak kullanılmaları durumunda istenilen özellikleri belirtilmektedir. İlgili standartlar Çizelge 6'da belirtilmiştir.

**Çizelge 6.** UK, GYFC ve SD'nin Çimento ve Betonda Kullanımına İlişkin EN ve ASTM Standartları.

| Malzeme | Kullanım Alanı |               |         |        |
|---------|----------------|---------------|---------|--------|
|         | Çimento        |               | Beton   |        |
|         | EN             | ASTM          | EN      | ASTM   |
| UK      | 197-1          | C 595, C 1157 | 450-1   | C 618  |
| GYFC    | 197-1          | C 595, C 1157 | 15167-1 | C 989  |
| SD      | 197-1          | C 595, C 1157 | 13263-1 | C 1240 |

EN 197-1 "Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri" standardında UK, GYFC ve SD CEM II, CEM III, CEM IV ve CEM V çimento tiplerinin ana bileşeni olarak tanımlanmıştır. Bu malzemeler, ayrıca minör ilave bileşen olarak da kullanılabilir.

Her üç malzeme de ASTM'nin hidrolik çimentolar terminolojisine ilişkin standardında [ASTM C 219] çimento üretiminde kullanılan iki katkı türünden (işlevsel katkılar ve proses katkıları) işlevsel katkılara dahil edilebilir. Söz konusu standardın tanımlamasına göre işlevsel katkılar "hidrolik çimentonun bir veya daha fazla özelliğini değiştirmek üzere klinkerle birlikte öğütülerek veya daha sonra çimentoya katılan" malzemelerdir. ASTM C 595 "Katkılı Hidrolik Çimentolar" standardında belirtilen Tip IS "Portland Yüksek Fırın Cürufu Çimentosu",

Tip IP ise "Portland Puzolan Çimentosu"dur. Dolayısıyla, UK, GYFC ve SD bu çimento standardı kapsamında yer almaktadır. Tip IS çimentolarında kütlece %95'e kadar yüksek fırın cürufu, Tip IP çimentolarında da %40'a kadar puzolan bulunabileceği belirtilmiştir. Öte yandan bir performans standardı olan ASTM C 1157 "Hidrolik Çimentoların Performansı" standardında tanımlanan katkılı çimentolar kapsamında, iki grup altında çeşitli mineral katkıların ağırlıkça %15'e kadar (Modifiye Portland Çimentoları) ve %15'den fazla (diğer Katkılı Çimentolar) kullanılması mümkündür. Performansa dayalı bu standartta kullanılacak mineral katkıların kompozisyonu açısından her hangi bir sınırlama bulunmamaktadır.

EN 197-1 ve ASTM C 595 standartlarında UK, GYFC ve SD için belirtilen koşullar sırasıyla, Çizelge 7 ve 8'de verilmiştir.

**Çizelge 7.** EN 197-1'de UK, GYFC ve SD için Koşullar

| Özellik                                         | UK                                |                   |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
|                                                 | Silissi UK (V)                    | Kalkersi UK (W)   |
| Reaktif CaO (%)                                 | < 10                              | ≥ 10              |
| Reaktif SiO <sub>2</sub> (%)                    | ≥ 25                              | ≥ 25 <sup>a</sup> |
| Serbest CaO (%)                                 | ≤ 1 veya<br>>1, <2,5 <sup>b</sup> | -                 |
| 40 µm elek bakiyesi (%) <sup>c</sup>            | -                                 | 10-30             |
| UK harcı 28G Basınç Dayanımı (MPa) <sup>c</sup> | -                                 | ≥ 10              |
| Le Chatelier Genleşmesi (mm) <sup>d</sup>       | -                                 | ≤ 10              |
|                                                 | GYFC                              |                   |
| Camsı Madde (kütlece)                           | ≥ 2/3                             |                   |
| CaO+MgO+SiO <sub>2</sub> (kütlece)              | ≥ 2/3                             |                   |
|                                                 | ≥ 1                               |                   |
|                                                 | SD                                |                   |
| Amorf SiO <sub>2</sub> (%)                      | ≥ 85                              |                   |
| Elemental Si (%)                                | ≤ 0,4                             |                   |
| Kızdırma Kaybı (%)                              | ≤ 4                               |                   |
| BET Özgül Yüzey (m²/g)                          | ≥ 15                              |                   |

<sup>a</sup> Reaktif CaO miktarı %10-15 arasında geçerlidir.

<sup>b</sup> Serbest CaO miktarı %1-2,5 arasında olduğu takdirde kütlece %30 UK + % 70 CEM I içeren karışımın Le Chatelier genleşmesi ≤ 10 mm olmalıdır.

<sup>c</sup> Reaktif CaO miktarı % 15'ten büyük uçucu küller için geçerlidir.

<sup>d</sup> Kütlece %30 UK + % 70 CEM I içeren karışım kullanılır.

**Çizelge 8.** ASTM C 595'de GYFC ve Puzolanlar için Koşullar

| Özellik                                                                                                             | Koşul  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 45 µm elek bakiyesi (ıslak yöntem) (%)                                                                              | ≤ 20   |
| 91 günde harç çubuğu (ASTM C 227) genleşmesi (%15'den az puzolan veya cüruf içeren IP veya IS çimentoları için) (%) | ≤ 0,05 |
| PÇ ile 28 günlük aktivite endeksi (%)                                                                               | ≥ 75   |

Uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanının doğrudan beton bileşeni olarak kullanılmalarına ilişkin standart koşulları Çizelge 9'da belirtilmiştir.

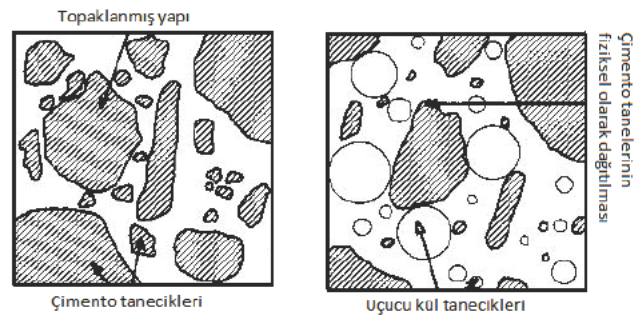
## 5. UK, GYFC VE SD'NİN TAZE BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

### 5.1. İşlenebilme

Her üç malzemenin de yoğunluklarının çimentoya göre daha düşük olması nedeniyle, çimentonun bir kısmını ikame etmek üzere kullanıldıklarında hamur miktarı artar. Dolayısıyla, sabit bir su-bağlayıcı oranı için plastisitesi ve kohezyonu daha yüksek betonlar elde edilir. Söz konusu mineral katkıların diğer bazı özellikleri işlenebilmeye olan etkilerinde bazı farklılıklara yol açar. Bu nedenle, yukarıda belirtilen genel etkiyi her bir malzeme için ayrı ayrı ele almak gerekir:

**Uçucu Kül:** Uçucu küllerin taze betonun işlenebilmesindeki olumlu etkilerini fiziksel ve fizikokimyasal olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Birinci grupta üç etkinin birlikte yararlı olduğu söylenebilir: (1) Çimento tanelerinin arasına girerek topaklaşmasını önler (Şekil 4); (2) serbest suyun kılcal boşluklardaki hareketini sınırlandırarak plastik betondaki kanamayı azaltır (Şekil 5); (3) küresel uçucu kül taneciklerinin yol açtığı kayganlaştırıcı etkiyle işlenebilmeyi artırır. İkinci gruptaki etki ise uçucu kül taneciklerinin hidrofilik karakteri dolayısıyla yüzeylerinde bir ince su filmi adsorbe olması sonucunda suyun betonda daha homojen ve yaygın dağılmasını sağlaması olarak açıklanabilir.

**Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu:** ÖGYFC içeren betonların işlenebilmesi ve kohezyonu daha yüksek olmaktadır. Taneciklerin yüzeylerinin pürüzsüz ve sert olması nedeniyle ortaya çıkan kayganlaştırıcı etkinin yanı sıra karışım suyunu emmeleri de işlenebilmeyi olumlu etkilemektedir [14]. Fulton [22] tarafından, yaklaşık kırk yıl önce yapılmış olan deneylerde ÖGYFC kullanımının taze betonun yerleştirme ve sıkıştırılmasını kolaylaştırdığı belirlenmiştir (Şekil 6). Daha sonra yapılan bir çok araştırmada da ÖGYFC'nin işlenebilme ve kıvamı olumlu yönde etkilediği saptanmıştır [23, 24, 25].



**Şekil 4.** Uçucu külün taze betonda çimentonun topaklaşmasını önleyen dağıtıcı etkisinin şematik gösterimi [21].

**Çizelge 9a.** Beton Bileşeni Olarak Kullanılacak UK, GYFC ve SD'ye İlişkin Standart Koşulları (Kimyasal)

| Koşul                                                                                | UK                                   |                    |        | GYFC       |           | SD                       |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|--------|------------|-----------|--------------------------|-------------|
|                                                                                      | EN 450-1                             | ASTM C 618         |        | EN 15167-1 | ASTMC 989 | EN 13263-1               | ASTM C 1240 |
|                                                                                      |                                      | Tip F              | Tip C  |            |           |                          |             |
| Kızdırma Kaybı (%)                                                                   | A: ≤ 5,0<br>B: 2,0-7,0<br>C: 4,0-9,0 | ≤ 6,0 <sup>b</sup> | ≤ 6,0  | ≤ 3,0      |           | ≤ 4,0                    | ≤ 6,0       |
| Cl <sup>-</sup> (%)                                                                  | ≤ 0,10                               |                    |        | ≤ 0,10     |           | ≤ 0,3                    |             |
| SO <sub>3</sub> (%)                                                                  | ≤ 3,0                                | ≤ 5,0              | ≤ 5,0  | ≤ 2,5      | ≤ 4,0     | ≤ 2,0                    |             |
| S (%)                                                                                |                                      |                    |        | ≤ 2,0      | ≤ 2,5     |                          |             |
| Serbest CaO (%)                                                                      | ≤ 1,0                                |                    |        |            |           | ≤ 1,0                    |             |
| Reaktif CaO (%)                                                                      | ≤ 10,0                               |                    |        |            |           |                          |             |
| Reaktif SiO <sub>2</sub> (%)                                                         | ≥ 25,0                               |                    |        |            |           |                          |             |
| SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | ≥ 70,0                               | ≥ 70,0             | ≥ 50,0 |            |           |                          |             |
| SiO <sub>2</sub> (%)                                                                 |                                      |                    |        |            |           | S1: ≥ 85,0<br>S2: ≥ 80,0 | ≥ 85,0      |
| Elemental Si (%)                                                                     |                                      |                    |        |            |           | ≤ 0,4                    |             |
| CaO+MgO+SiO <sub>2</sub> (kütlece)                                                   |                                      |                    |        | ≥ 2/3      |           |                          |             |
| (CaO+MgO)/SiO <sub>2</sub>                                                           |                                      |                    |        | ≥ 1,0      |           |                          |             |
| (Na <sub>2</sub> O) <sub>esd</sub> toplam alkali (%)                                 | ≤ 5,0                                |                    |        |            |           |                          |             |
| MgO (%)                                                                              | ≤ 4,0                                |                    |        | ≤ 18,0     |           |                          |             |
| Çözünebilir P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg)                                    | ≤ 100,0                              |                    |        |            |           |                          |             |

a UK'nin serbest kireç miktarı %'in altındaysa bu koşul sağlanmış sayılır.

b F tipi UK'lerde uygun laboratuvar veya performans raporlarıyla olumsuz etkisi bulunmadığı kanıtlanırsa %12'ye kadar kabul edilebilir.



Çizelge 9b. Beton Bileşeni Olarak Kullanılacak UK, GYFC ve SD'ye İlişkin Standart Koşulları (Fiziksel)

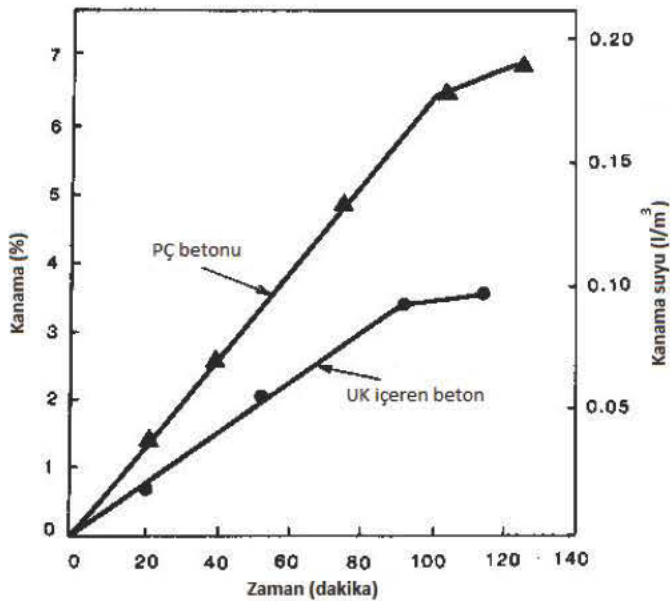
| Koşul                                    | UK                               |                                |                                | GYFC                           |                                                                    | SD           |             |
|------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------|-------------|
|                                          | EN 450-1                         | ASTM C 618                     |                                | EN 15167-1                     | ASTMC 989                                                          | EN 13263-1   | ASTM C 1240 |
|                                          |                                  | Tip F                          | Tip C                          |                                |                                                                    |              |             |
| Rutubet (%)                              |                                  | ≤ 3,0                          | ≤ 3,0                          | ≤ 1,0                          |                                                                    |              | ≤ 3,0       |
| 45 µm elek bakiyesi (yaş eleme) (%)      | N: ≤ 40,0<br>S: ≤ 12,0           | ≤ 34,0                         | ≤ 34,0                         |                                | ≤ 20,0                                                             |              | ≤ 10,0      |
| Blaine inceliği (m <sup>2</sup> /kg)     |                                  |                                |                                | ≥ 275                          |                                                                    |              |             |
| BET inceliği (m <sup>2</sup> /g)         |                                  |                                |                                |                                |                                                                    | 15,0 - 35,0  | ≥ 15,0      |
| Aktivite Endeksi (%) <sup>a</sup>        | 28 gün: ≥ 75,0<br>90 gün: ≥ 85,0 | 7 gün: ≥ 75,0<br>28gün: ≥ 75,0 | 7 gün: ≥ 75,0<br>28gün: ≥ 75,0 | 7 gün: ≥ 45,0<br>28gün: ≥ 70,0 | S80 -<br>S100 7G: ≥ 75<br>28G: ≥ 75<br>S120 7G: ≥ 95<br>28G: ≥ 115 | 28gün: ≥ 100 | 7gün: ≥ 105 |
| Le Chatelier genişmesi (mm) <sup>a</sup> | ≤ 10                             |                                |                                |                                |                                                                    |              |             |
| Otoklav genişmesi (%)                    |                                  | ≤ 0,8                          | ≤ 0,8                          |                                |                                                                    |              |             |
| Su ihtiyacı (% kontrol)                  | S: ≤ 95,0<br>N: -                | ≤ 105,0                        | ≤ 105,0                        |                                |                                                                    |              |             |

a Aktivite endeksi farklı çimento:mineral katkı oranlarında yapılmaktadır.

UKler için EN 450-1'de kütlece 75:25, ASTM C 618'de 80:20;

GYFC için her iki standartta da 50:50;

SD için her iki standartta da 90:10'dur.



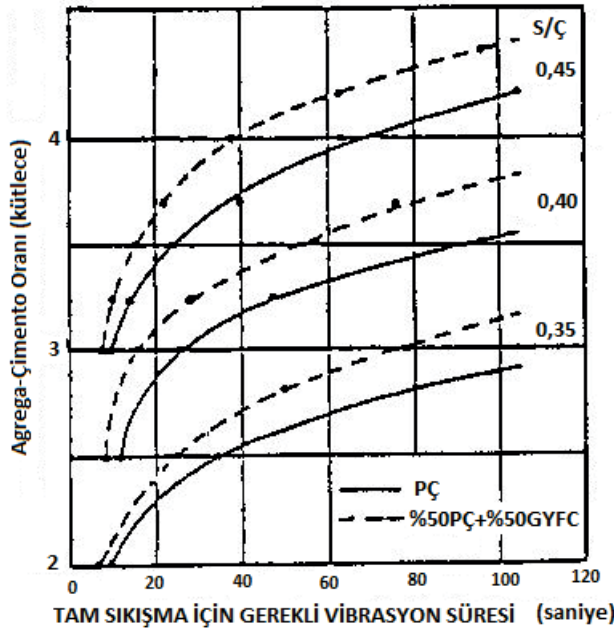
Şekil 5. Uçucu külün betonda kanamayı azaltıcı etkisi [21].

**Silis Dumanı:** SD'nin betonun işlenebilmesine etkisini diğer iki mineral katkıdan daha farklı olarak değerlendirmek gerekir. Her ne kadar SD tanecikleri küresel yapıda olsa da, çimento-ya oranla çok daha ince olan bu malzeme kullanıldığında betonun su gereksinmesi artar. Bu nedenle SD kullanılması durumunda akışkanlaştırıcı katkı kullanımı da hemen hemen kaçınılmaz olur. Buna karşılık SD içeren betonların kohezyonu daha yüksek olduğundan ayrışmaya daha az yatkındırlar.

SD içeren betonlarda ilk çökme değerinin, portland çimentosu betonlarına göre, 50mm'ye kadar daha yüksek tutulması önerilmektedir [26].

## 5.2. Priz Süresi

Genel anlamda ele alındığında, çimentonun bir kısmını ikame etmek üzere kullanıldıklarında gerek düşük kireçli UK gerekse ÖGYFC betonun priz süresini uzatır. Buna karşılık, yüksek kireçli uçucu küllerin, kimyasal ve mineralojik kompozisyonlarına bağlı olarak, bu süreyi uzatabileceği veya kısaltabileceği saptanmıştır [3]. SD'nin priz süresine etkisi ise önemli boyutta değildir. Yukarıda kullanılan ifadelerin genel olduğu, betonun priz süresinin sıcaklık; çimento tipi, miktarı, inceliği; su miktarı; kullanılan kimyasal katkıların türü ve miktarı; mineral katkının inceliği, miktarı ve tipi gibi bir çok parametreden etkilenebileceği unutulmamalıdır.



**Şekil 6.** PÇ ve %50 ÖGYFC+%50PÇ içeren taze betonlarda eşdeğer sıkışma için gerekli sürelerin karşılaştırması [22].

### 5.3. Hava Miktarı

Hava sürüklenmiş betonlarda uçucu küllerin hava miktarını çoğunlukla azalttığı ve hava kabarcıkları arasındaki mesafeyi artırdığı, dolayısıyla portland çimentosu betonlarına göre daha fazla hava sürükleyici katkıya ihtiyaç gösterdiği genel kabul görmüş hususlar olmakla birlikte bu etkilerin boyutu kullanılan uçucu külün niteliklerine bağlıdır. Örneğin, suda eriyen alkali miktarı yüksek olan ASTM C-sınıfı uçucu küllerin hava sürükleyici katkı miktarında azalmaya yol açtığı saptanmıştır [27]. Öte yandan, uçucu külün karbon miktarı veya kızdırma kaybı miktarı arttıkça hava sürüklenmesi üzerindeki olumsuz etkisi de artar [27]. Dolayısıyla, hava sürüklenmiş betonlarda uçucu kül kullanılması durumunda hava miktarı tespitinin daha sık yapılmasında yarar vardır.

## 6. UK, GYFC VE SD'NİN BETONDAKİ KİMYASAL AKTİVİTELERİ

Her üç mineral katkının betonda kalsiyum hidroksit ve alkalilerle girdiği tepkimeler sonucunda ortaya çıkan ürünler portland çimentosunun hidratasyonu ile elde edilen ürünlerle benzerler. Diğer bir deyişle, bu malzemelerin rutubetli ortamda gerçekleşen pozolanik tepkimelerinden kalsiyum silikat hidratlar (C-S-H) ve kalsiyum aluminat hidratlar elde edilir. Ancak, gerek kimyasal ve mineralojik kompozisyonlarında ve gerekse fiziksel özelliklerindeki farklılıklar nedeniyle, bu malzemelerin hidratasyona etki dereceleri ve mekanizmaları birbirlerinden olduğu gibi aynı malzeme grubunda dahi önemli farklılıklar gösterir.

### 6.1 Uçucu Kül

Uçucu küllerin hidratasyona etkilerini fiziksel ve kimyasal olarak iki ana grupta toplamak mümkündür. İşlenebilmeye olan etkilere söz edildiği gibi (Şekil 3), uçucu kül tanecikleri daha fazla çimento yüzey alanının ortaya çıkmasına yol açarak çimento hidratasyonunu artırır ve böylece daha yoğun bir matris yapısı oluşmasını sağlar [Mehta CRM]. Diğer bir deyişle, uçucu kül sabit bir çimento miktarı için daha fazla çimentonun hidrate olmasını sağlar. Bunun yanı sıra karışım suyunun matris içinde daha homojen yayılmasına yol açarak hidratasyonu kolaylaştırır. Düşük kireçli uçucu küllerin bir çoğu daha az suya gereksinim gösterdiğinden daha yoğun bir matris yapısı elde edilmesini sağlar.

Uçucu küllerin hidratasyona kimyasal etkilerini iki boyutta incelemek gerekir: Birincisi, portland çimentosu fazında kalsiyum silikatların hidratasyonunu kolaylaştırıcı etkisi; ikincisi ise pozolanik etkisidir. UK tanelerinin yüzeyinden açığa çıkan  $Ca^{2+}$  iyonları  $C_3S$  tarafından adsorpsiyonuyla bu bileşenin ayrışmasını kolaylaştırır [28]. Öte yandan, meydana gelen C-S-H'nin kompozisyonu uçucu kül tanelerine yakın bölgelerde, portland çimentosu hidratasyonundan elde edilenlere göre C/S molar oranı bakımından farklılıklar gösterebilir. Normalde 1,5-2,0 arasında olan bu oran uçucu kül tanelerinin çevresinde 1,0'ın altına dahi düşebilir [28, 29]. Bunun yanı sıra, portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan  $Ca(OH)_2$  rutubetli ortamda uçucu külle tepkimeye girecek bilinen pozolanik etkiye yol açar ve daha fazla kalsiyum silikat ve kalsiyum aluminat hidratlar elde edilmesini sağlar.

Uçucu küllerin hidratasyon ısısına etkileri kimyasal ve mineralojik kompozisyonlarına bağlı olarak, farklılıklar gösterebilir. Nitekim, uçucu küllerin hidratasyon ısısını azalttığı yönünde çeşitli araştırmalara karşın artırdığı veya önemli bir değişikliğe yol açmadığı yönünde de araştırma sonuçları bulunmaktadır [30]. Genel olarak, düşük kireçli uçucu küllerin hidratasyon ısısını azalttığı, yüksek kireçli uçucu küllerin ise artırdığı söylenebilir [31].

### 6.2. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

GYFC'nin kendi başına suyla tepkimesi çok yavaştır. Bu tepkime, cürufun su içinde kısmi olarak erimesiyle C-S-H, hidrate aluminatlar ve alümin silika hidratların çökmesi olarak tanımlanabilir. Cürufun hidratasyonunda ilk olarak silikat iyonları eriyiğe geçer. C-S-H çökmeye başladıktan sonra eriyiğin kireç konsantrasyonu artar ve ardından hidrate aluminat kristallerinin oluşumuna kadar, alümina konsantrasyonu artar. Son derece yavaş seyreden bu tepkimeler bir çok araştırmacıyı bu tepkimeleri hızlandırabilecek aktivatörler konusunda çalışmaya yöneltmiştir. Yürütülen çok sayıda araştırma sonucunda cürufun kimyasal aktivasyonu için kullanılan malzemeler (a) alkali aktivatörler (soda, kireç, sodyum karbonat, sodyum silikat, vb) ve (b) sülfat aktivatörler (alçı, anhidrit, fosfojips, vb) olarak iki ana grupta toplanmıştır [7].

GYFC'nin portland çimentosuyla birlikte kullanıldığı durumlarda, yukarıda belirtilen iki tür aktivatör de (alçı ve kalsiyum hidroksit) çimentolu sistemde mevcuttur. Bütün ticari olarak üretilen cüruflu çimentolarda klinker kısmı cüruftan daha hızlı hidrate olur. Ancak, cüruf da çok erken yaşlar da suyla tepkimeye girmektedir.

ÖGYFC'nin aktivitesi, kimyasal kompozisyonuna, camı yapısına, inceliğine, birlikte kullanıldığı klinkerin kompozisyonuna ve inceliğine ve ortam sıcaklığına da bağlıdır. Cürufun camı madde miktarı ne kadar yüksek olursa aktivitesi de o kadar yüksek olduğu kabul edilir. Ancak, Demoulian ve arkadaşlarının yaptığı bir araştırmada cürufun %3-5 kristal merwinite ( $C_3MS_2$ ) içerdiği durumlarda daha aktif olduğu saptanmıştır [32]. Öte yandan, aynı portland çimentosu ve yedi farklı GYFC kullanılarak üretilen cüruflu çimentolarda yapılan bir mikroyapı araştırmasında cürufun hidratasyon hızıyla, eritilip yavaş soğutulularak kristalize edildiğinde içerdiği akermanit ( $C_2MS_2$ ) miktarı arasında kuvvetli bir ilişki saptanmıştır. Buna göre, rekristalize edilmiş cüruf içindeki akermanit miktarı ne kadar yüksekse cüruf o kadar yavaş hidrate olmaktadır [33].

### 6.3. Silis Dumanı

SD'nin hidratasyona olan etkileri fiziksel ve puzolanik etki olarak ikiye ayrılabilir. Reaktif olsun veya olmasın, bütün diğer ince mineral maddeler gibi silis dumanı da çimentonun hidratasyonunu hızlandırır [34]. Bu durum çok ince taneciklerin çimento hidratasyonu için birer çekirdek görevi yapmalarından kaynaklanır [35]. Öte yandan, silis dumanının çimentolu sitemlerdeki asıl etkileri onun puzolanik karakteriyle ilişkilidir. Silis dumanını diğer puzolanik malzemelerden ayıran temel husus puzolanik tepkimelerin daha erken yaşlarda başlaması ve daha hızlı olmasıdır [16].

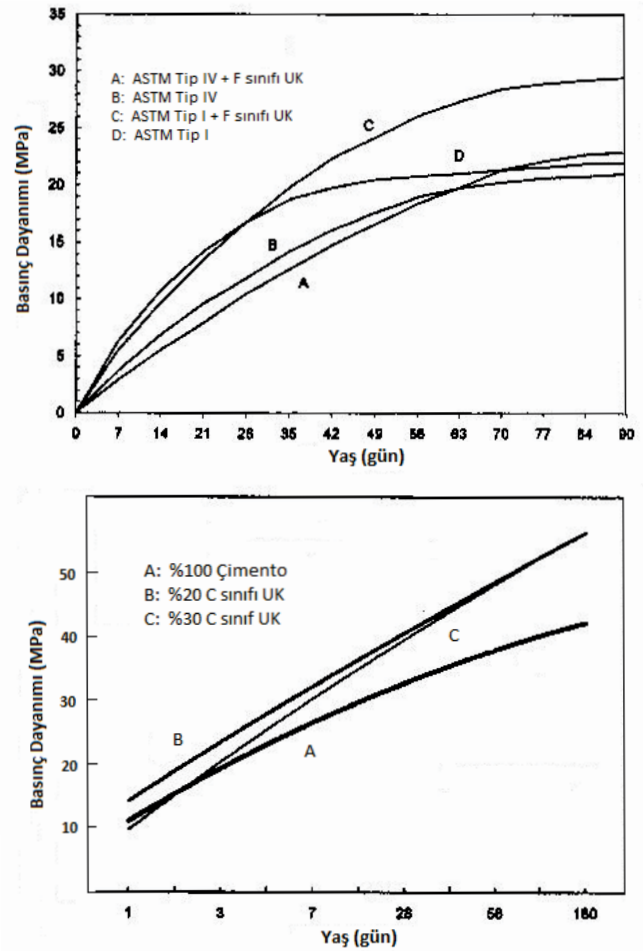
## 7. UK, GYFC VE SD'NİN SERTLEŞMİŞ BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

### 7.1. Uçucu Kül

**Basınç Dayanımı:** Uçucu kül içeren betonların hem belirli bir yaştaki dayanımları hem de zaman içindeki dayanım gelişimleri kullanılan uçucu külün özellikleri, birlikte kullanıldığı çimentonun özellikleri ve bunların kullanım oranları ile ilişkilidir [27]. Aynı 28 günlük basınç dayanımına sahip düşük kireçli uçucu küllü betonların erken yaşlardaki dayanımları portland çimentosu betonlarına göre genellikle daha düşük olur. Ancak, beton karışım oranlarında gerekli değişiklikleri yaparak, hızlandırıcı veya su azaltıcı kimyasal katkıları ya da aktivatörler kullanarak eşdeğer erken dayanımlar elde etmek mümkündür [27].

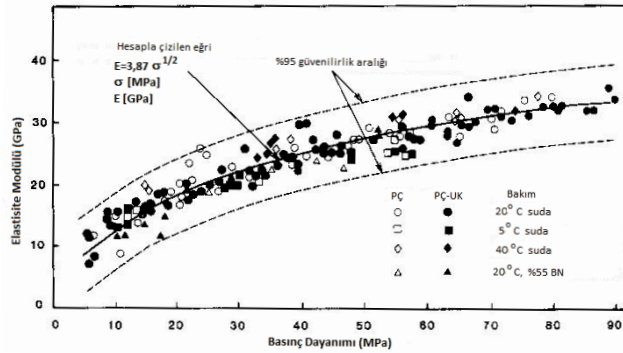
Betonda uçucu kül kullanımı portland çimentosunun dayanım kazanma hızına etkisinin azalmasıyla kendini gösterir ve puzolanik tepkimeyle daha fazla C-S-H jeli oluşturarak geç yaşlarda da dayanım artışının sürmesine yol açar. Söz konusu geç dayanım kazanımı daha fazla çimento kullanılarak elde edilebilecek değerlerden daha yüksek olur [36]. 28 günlük dayanımlar esas alınarak yapılan karşılaştırmalı bir çalışmada %30 uçucu kül kullanılan betonlarda bir yıldaki dayanım artışının %50, uçucu kül içermeyen kontrol betonlarındaysa %30 civarında olduğu belirlenmiştir [37]. Uçucu küllerin betonların nihai dayanımlarına olan bu olumlu etkisi yüksek dayanımlı betonlarda da kullanımlarına yol açmıştır [27].

Yüksek kireçli uçucu küllerin erken yaşlardaki reaktiviteleri düşük kireçli uçucu küllere göre daha fazladır [3, 27]. Düşük kireçli ve yüksek kireçli uçucu küllerin çimentonun bir kısmını ikame etmek üzere kullanıldıklarında dayanım gelişimine etkilerine birer örnek Şekil 7'de gösterilmiştir.



**Şekil 7.** Uçucu küllü betonlarda dayanım gelişiminin kontrol betonlarıyla karşılaştırılması [38, 39].

**Elastisite Modülü:** Uçucu kül kullanımının betonun elastisite modülü üzerindeki etkisi dayanım üzerindeki etkisi kadar önemli değildir. Değişik bakım koşullarında uçucu kül içeren ve içermeyen betonların dayanım-elastisite modülü ilişkileri Şekil 8’de gösterilmiştir. Çimentonun bir kısmı yerine uçucu kül kullanılması durumunda erken yaşlardaki elastisite modülü kontrol betonlarıninkine göre bir miktar düşük olurken geç yaşlarda da bir miktar yüksek olmaktadır.



**Şekil 8.** Uçucu küllü ve portland çimentosu betonlarının dayanım-elastisite modülü ilişkisi [21].

**Sünme:** Betonda sünme ortam koşulları (sıcaklık ve nem), dayanım, elastisite modülü, agrega miktarı, bağlayıcı miktarı, yaş ve sünme gerilmesi-dayanım oranı gibi parametrelere bağlı olduğundan, uçucu küllerin betonun sünmesine etkisini dayanım ve dayanım gelişimine etkileriyle ilişkilendirmek mümkündür. Sabit bir bağlayıcı hacmi söz konusu olduğunda, uçucu küllü betonlarda erken yaşlarda daha yüksek sünme deformasyonları oluşur. Bu durumun temel nedeni uçucu küllü betonların erken dayanımlarının genelde daha düşük olmasıdır. Öte yandan, sünme gerilmesinin uygulandığı yaşta kontrol betonuyla aynı dayanıma sahip olan uçucu küllü betonlardaki sünme deformasyonu daha az olmaktadır [37].

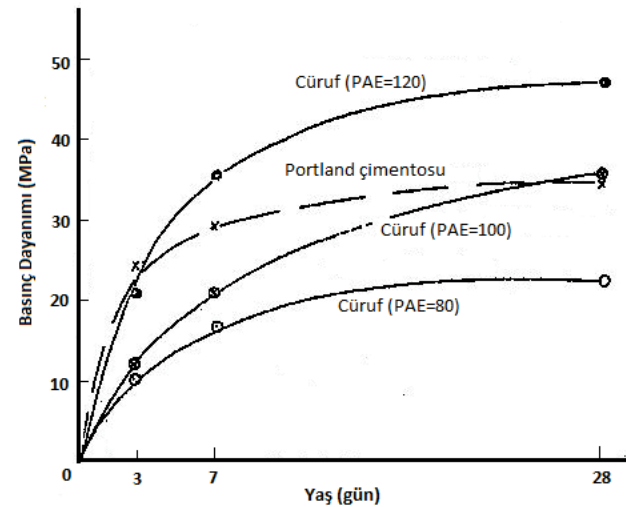
Yüksek kireçli uçucu küller kullanılarak yapılan bir çalışmada kütlece %20’ye kadar çimentonun bir kısmını ikame etmek üzere uçucu kül kullanıldığında sünme deformasyonlarının kontrol betonlarıyla hemen hemen aynı olduğu; bu miktarın üstüne çıktığında uçucu küllü betonların daha yüksek sünme değerleri verdiği belirtilmiştir [40].

**Kuruma Rötresi:** Betonda kuruma rötresini etkileyen faktörler olarak ortam koşulları, çimento hamuru hacmi, kullanılan çimentonun özellikleri, su miktarı, agrega özellikleri olarak sıralanabilir. Uçucu kül kullanımı bağlayıcı hamur miktarını artırdığı takdirde ve kullanılan karışım suyu aynı olursa kontrol betonuna göre az miktarda rötreye artışı söz konusu olabilir [27]. Konuyla ilgili yapılan bir çok araştırmada uçucu kül kullanımıyla betonda rötrenin azaldığı saptanmıştır [38, 40, 41, 42]. Çimentonun kütlece yaklaşık %20’sinin uçucu külle

ikame edilmesi en düşük rötreye değerlerine yol açmıştır [38, 40]. Yüksek kireçli uçucu küllerin rötreyi azaltma bakımından düşük kireçli uçucu küllere oranla daha az etkin olduğu söylenebilir [40]. Sonuç olarak, diğer parametreler sabit tutulduğunda, uçucu kül kullanımının betonda rötreyi azaltıcı etkisi bulunmaktadır [43].

## 7.2. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

**Basınç Dayanımı:** Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren betonlarda dayanım gelişimi kullanılan cürufun aktivite endeksine ve miktarına bağlı olarak değişir. ASTM C 989 “Betton ve Harçta Kullanılan Yüksek Fırın Cürufu” na göre (kütlece %50 ÖGYFC ve PC) hazırlanmış olan standart harç numunelerinde aktivite endeksleri 80, 100 ve 120 olan üç cürufun dayanım gelişmesine olan etkileri Şekil 9’da gösterilmiştir.



**Şekil 9.** Farklı aktivite endekslerindeki ÖGYFC içeren %50 PC+%50 cürüflü harçların zaman-dayanım ilişkileri [14].

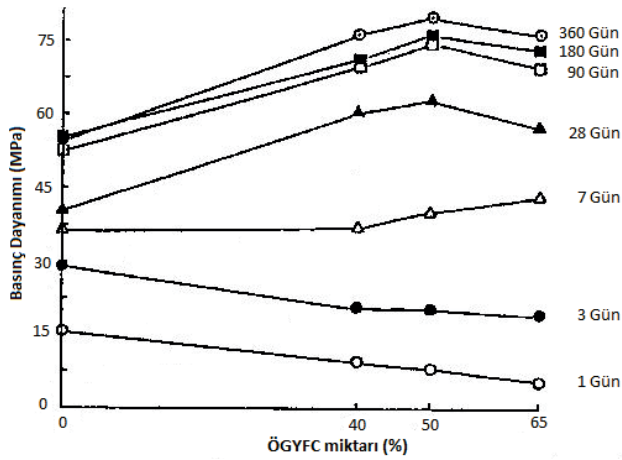
ÖGYFC içeren betonların dayanımını etkileyen diğer faktörler su-bağlayıcı oranı, kullanılan portland çimentosunun ve cürufun incelikleri ve kimyasal kompozisyonları ve bakım koşulları olarak sıralanabilir.

Su-bağlayıcı oranı yüksek olan ÖGYFC’li betonlarda göreceli dayanım kazanma hızı düşük su-bağlayıcı oranına sahip olanlara göre daha yüksek olmaktadır [14, 44].

Normal ve düşük sıcaklıklarda bakımı yapılan cürüflü betonların erken dayanımlarının portland çimentosu betonlarına göre daha düşük olmasına karşın, yüksek sıcaklıklarda yapılan bakımın cürüflü betonlarda kontrol betonlarına göre daha yüksek erken dayanımlar elde edilmesine yol açtığı saptanmıştır [22, 45]. Özellikle erken yaşlarda eşdeğer dayanımlar elde edilebilmesi için GYFC’nin portland çimentosuna göre daha ince öğütülmesi gereklidir [7].



Kullanılan cüruf miktarı dayanımı etkileyen önemli parametrelerden bir tanesidir. Yüksek aktiviteye sahip bir cüruf kullanılarak yapılan bir çalışmada kütlece %40-50 civarında ÖGYFC kullanımının en yüksek 28 günlük ve daha geç yaşlardaki dayanımların elde edilmesini sağladığı, daha düşük ve daha yüksek miktarların dayanımı düşürebileceği saptanmıştır. Öte yandan, 7 güne kadar olan erken yaşlarda dayanımın her ikame düzeyi için düştüğü belirlenmiştir (Şekil 10) [45].



**Şekil 10.** ÖGYFC'nin çimentonun bir kısmını ikame etmesi durumunda harç basınç dayanımına etkisi [45]

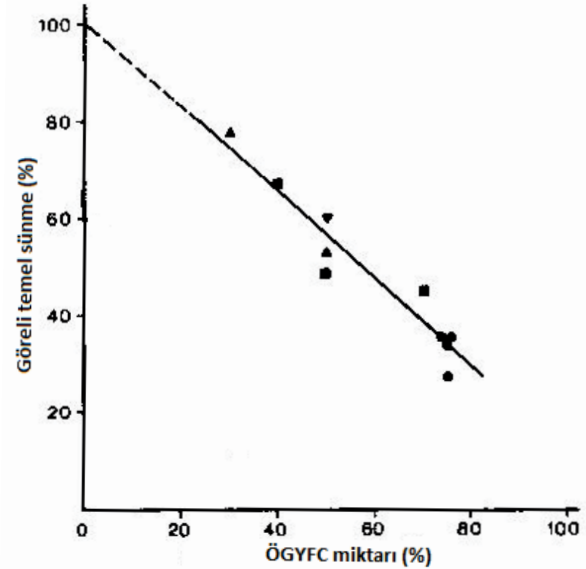
**Elastisite Modülü:** Aynı dayanıma sahip betonlar üzerinde yapılan çalışmalar ÖGYFC içeren betonların elastisite modüllerinin portland çimentosu betonlarına göre ya küçük bir miktar ( $\leq$  GPa) daha yüksek ya da aynı olduğunu göstermektedir [22, 46, 47, 48]. Öte yandan, çimentonun bir kısmını ikame etmek üzere ÖGYFC kullanıldığında, normal sıcaklıklarda, erken yaşlarda elastisite modülü gelişimi portland çimentosu betonlarıninkine göre daha yavaştır. Söz konusu yavaşlatıcı etki ÖGYFC miktarı arttıkça artar. Buna karşılık, yüksek sıcaklıklarda cürufllu betonların elastisite modülü gelişimi portland çimentosu betonlarına göre daha hızlı olur [49].

**Sünme:** Betondan herhangi bir rutubet kaybı olmadığı durumlarda (temel sünme) ÖGYFC'li betonlarda sünme portland çimentosu betonlarına göre daha az olmaktadır. Bu durumun temel nedeni, sabit işlenebilirlik için cürufllu betonların daha az suya ihtiyaç göstermesi ve dolayısıyla daha az çimento hamuru oluşması olarak gösterilmektedir [50]. Öte yandan, cürufllu betonların portland çimentosu betonlarına göre, yük altında daha hızlı bir dayanım gelişmesi gösterdikleri saptanmıştır. Böylece görelî gerilme-dayanım oranı azaldığından temel sünme daha az olmaktadır [50].

Toplam sünme miktarıysa cürufllu betonlarda bir miktar daha yüksek olmaktadır. Cürufllu betonların erken yaşlarda daha yavaş dayanım kazanması söz konusu olan görelî fazla sünmenin temel gerekçesidir.

Temel sünme-ÖGYFC miktarı ve %50 cüruf %50 PÇ kullanılan betonda toplam sünme-zaman ilişkilerine örnekler, sırasıyla Şekil 11 ve 12'de verilmiştir.

**Kuruma Rötresi:** ÖGYFC'nin kuruma rötresine ilişkin araştırmaların sonuçları bir genelleme yapmaya olanak tanımamaktadır. Bunlardan bazıları ÖGYFC'nin rötreyi azalttığı [51] bazılarıysa artırdığı [45] yönünde sonuçlar içermektedir. Ancak, bütün bu çalışmaların belirttiği bir başka husus da portland çimentosu betonlarına göre farkın önemli bir miktarda olmadığıdır.



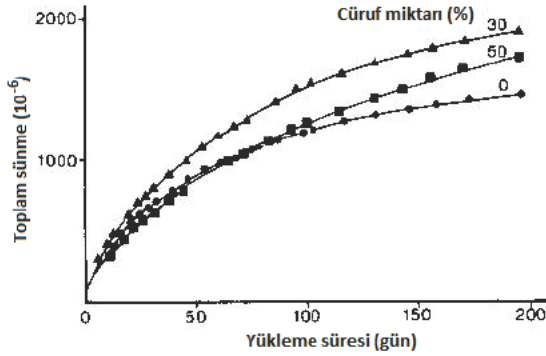
**Şekil 11.** Çimentonun kısmen ÖGYFC ile ikamesi durumunda betonun temel sünmesine etkisi [48].

### 7.3. Silis Dumanı

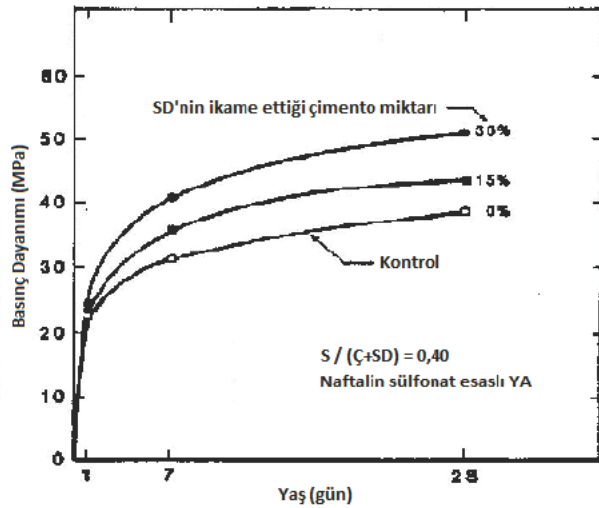
**Basınç Dayanımı:** Silis dumanının betonda dayanım gelişmesine olan etkisi 3-28 gün yaşları arasında görülür. 1 günlük dayanım portland çimentosu betonuyla hemen hemen aynıdır. Diğer pozulanik malzemelerin aksine, 28 günden sonra bir etki söz konusu olmamaktadır. Çimentonun kısmen silis dumanı tarafından ikamesi durumunda dayanım gelişmesine örnek olarak Şekil 13 verilmiştir.

Silis dumanının dayanıma etkisinden söz edilirken unutulmaması gereken önemli bir husus bu malzemenin hemen hemen her zaman akışkanlaştırıcı veya yüksek akışkanlaştırıcı kimyasal katkılarla birlikte kullanılması zorunluluğudur.

Silis dumanı çimentoya ilave olarak kullanıldığında ise dayanımlar her yaşta portland çimentosu betonlarınkinden yüksek olmaktadır.



Şekil 12. Çimentonun kısmen ÖGYFC ile ikamesi durumunda betonun toplam sünmesine etkisi (%60 BN + 21°C) [51].



Şekil 13. Çimentonun kısmen SD ile ikamesi durumunda betonun dayanım gelişmesi [52].

**Elastisite Modülü:** Silis dumanı kullanımının betonun elastisite modülü üzerindeki etkisi konusunda yapılan çalışmaların [34, 53, 54] genel sonucu eşdeğer dayanıma sahip silis dumanlı ve portland çimentosu betonlarının eşdeğer elastisite modüllerine sahip olduğu şeklinde özetlenebilir.

**Sünme:** Betonda sünme miktarının dayanımla ters orantılı olduğu göz önünde bulundurulduğunda silis dumanı içeren betonların kontrol betonlarına göre daha az sünme deformasyonu gösterdikleri söylenebilir. Nitekim, konu üzerindeki araştırmalar da bu genel yaklaşımı desteklemektedir [54, 55].

**Kuruma Rötresi:** Betonda kullanılan su miktarı eşit veya daha az olduğu sürece, silis dumanı içeren betonların rötresi portland çimentosu betonlarına göre aynı veya daha az olmaktadır. Ancak, yüksek miktarlarda (> %10) silis dumanı kullanılması ve/ya da yüksek su-bağlayıcı oranlarında (> 0,60) çok erken yaşlarda kuruma söz konusu olduğunda silis dumanlı betonların yüksek rötre gösterdiği saptanmıştır [56].

## 8. UK, GYFC VE SD'NİN BETONUN DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Beton çeşitli değişik çevresel etkiler altında, gerekli önlemler alınmadığı takdirde, bozulmaya uğrayabilir. Bu etkileri Çizelge 10'da belirtildiği gibi sınıflandırmak mümkündür.

Çizelge 10. Betonun Dayanıklılığına Etki Edebilecek Koşullar

| Kimyasal Etkiler                                 | Fiziksel Etkiler     |
|--------------------------------------------------|----------------------|
| Ca(OH) <sub>2</sub> 'nin taşınması ve çiçeklenme | Donma-Çözülme        |
| Sülfat etkisi                                    | Islanma-Kuruma       |
| Alkali-Agrega Tepkimesi                          | Sıcaklık değişimleri |
| Asit etkisi                                      | Aşınma               |
| Donatı korozyonu                                 |                      |

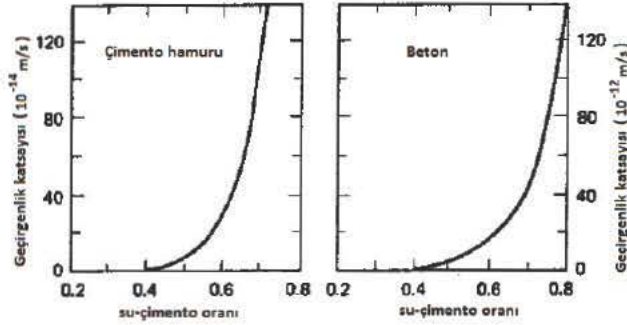
### 8.1. Geçirgenlik

Betonun geçirgenliği dayanıklılığını etkileyen en önemli faktördür. Geçirgenlik ne kadar azsa dış etkiler nedeniyle betonun bozulması da o kadar az olur. Betonun geçirgenliği bağlayıcı madde miktarı, su-bağlayıcı oranı, agregra granülo-metrisi, sıkıştırma derecesi ve uygulanan bakımın süresi ve etkinliği gibi parametrelerden etkilenir. Çimento hamuru ve betonun geçirgenliğinin su-çimento oranıyla değişimi Şekil 14'de gösterilmiştir.

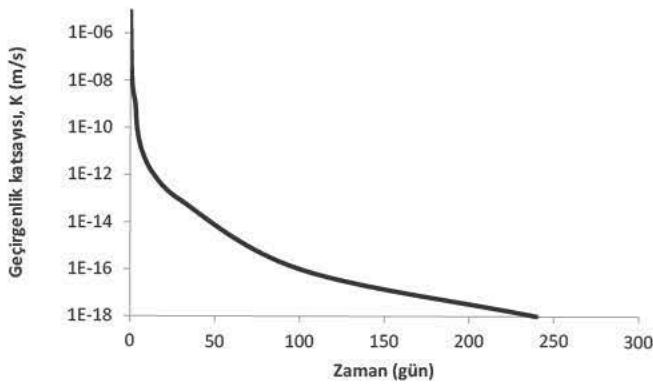
Sabit bir su-çimento oranı için hidrasyon derecesi ilerledikçe geçirgenlik azalır. Bu duruma örnek olarak su-çimento oranı 0,51 olan bir çimento hamurunun geçirgenlik katsayısının zamanla değişimi Şekil 15'de verilmiştir.

Daha önce UK, GYFC ve SD'nin Betondaki Kimyasal Aktiviteleri ve İşlenebilmeye Etkileri bölümlerinde belirtildiği gibi her üç mineral katkı da gerek fiziksel gerekse kimyasal bakımlardan betonun geçirgenliğini azaltıcı özelliklere sahiptir. Bir yandan küçük mineral katkı taneciklerinin kılcal boşlukları tıkayıcı etkisi diğer yandan da puzolanik tepkime sonucunda Ca(OH)<sub>2</sub>'yi kullanarak daha fazla C-S-H oluşturmaları nedeniyle gözeneklerin dolması betonun kılcal gözenekliliğinin azalmasına yol açar.

UK, GYFC ve SD'nin geçirgenlik üzerine etkilerini araştıran bir çok çalışmadan [36, 54, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72] elde edilen sonuçlar yukarıda belirtilen genel ifadeyi doğrular niteliktedir.



**Şekil 14.** Su-Çimento oranının çimento hamuru ve betonun geçirgenliğine etkisi [57].



**Şekil 15.** Çimento hamurunda geçirgenlik katsayısının zamanla değişimi [57].

## 8.2. Sülfat Etkisi

Çimentolu sistemlerde bulunan monosülfat hidrat ( $C-S-H$ ), kalsiyum alüminyum hidrat ( $C-A-H$ ) ve kalsiyum hidroksit ( $CH$ ) rutubetli ortamda sülfat iyonlarıyla yaptıkları tepkimeler sonucunda etrenjit ( $C-S-H$ ) ve alçı ( $CH_2$ )nin meydana gelmesi sülfat etkisi olarak adlandırılır. Bu tepkimeler sonucunda oluşan ürünler bunları meydana getiren bileşenlerden daha fazla bir hacim kapsam durumunda olduklarından betonun genişmesine, çatlamasına ve bozulmasına yol açar [73, 74, 75, 76]. Söz konusu zararlı etkiyi azaltmanın veya önlemenin yolu çimento içindeki  $C_3A$  miktarını sınırlamaktan ve çimentolu sistemin alkalinitesini düşürmekten geçer. Bir başka önemli husus da betonun geçirgenliğinin azaltılmasıdır. UK, GYFC ve SD kullanımının yukarıda belirtilen üç husus üzerinde de olumlu etkisi bulunur.

**Uçucu Kül:** Uçucu küllü betonların sülfat direncini portland çimentosu betonlarının sülfat direncini etkileyen aynı faktörlere bağlıdır: Kullanılan çimentonun kompozisyonu, bakım koşulları, sülfat etkisinin şiddeti ve su-bağlayıcı oranı. Uçucu külün etkisi ise külün tipine, miktarına, kimyasal, fiziksel ve mineralojik karakteristiklerine bağlıdır. Düşük kireçli uçucu küllerin betonun sülfat direncini artırdığı artık bir genel kural olarak kabul edilmektedir. Buna karşılık, yüksek kireçli uçucu küllerle yapılan araştırmalardan birbirinden farklı sonuçlar elde edilmiştir. Kullanım miktarı çimentonun kütlece %15'ini aşmadığı sürece yüksek kireçli uçucu küllerin sülfat direncini olumlu etkilediği, daha yüksek miktarlarda bazı yüksek kireçli uçucu küllerin olumsuz sonuçlar verdiği belirtilmektedir [27].

Uçucu küllerin betonun sülfat direnci performansına etkisini belirleyebilecek bazı kimyasal göstergeler geliştirilmeye çalışılmıştır. Bunlardan ilki Dunstan [77] tarafından önerilen uçucu külün  $CaO$  ve  $Fe_2O_3$  miktarlarıyla ilişkilendirilen R-faktörüdür:  $R = \frac{\%CaO - 5}{\%Fe_2O_3}$ . Uçucu külün R değeri 1,5'in altında olduğu takdirde betonun sülfat direncini olumlu, 3,0'ün üstünde olduğunda ise olumsuz etkileyeceği öngörülmüştür. Ancak, R-faktörü daha sonra çeşitli araştırmacılar tarafından tartışılmış uçucu külün sülfat direncine etkisinin içerdiği reaktif alumina fazı ve diğer genişleyen fazların miktarıyla daha çok ilişkili olabileceği, demir oksit miktarının fazla bir etkisi olmadığı saptanmıştır [78, 79, 80]. Erdoğan, Tokyay ve Ramyar yaptıkları çalışmada çimento-uçucu kül karışımlarının  $C_3A$ , reaktif alumina ve serbest kireç miktarlarıyla sülfat direnci arasında daha kuvvetli bir ilişki bulmuşlardır:  $\frac{C_3A + reaktif Al_2O_3}{serbest CaO}$  arttıkça sülfat etkisi nedeniyle meydana gelen genişleme azalmaktadır (Şekil 16). Söz konusu ilişki yüksek kireçli uçucu küllerin kullanımı için güvenilir sonuçlar vermiştir [80].

**Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu:** ÖGYFC'nin betonun sülfat direncini artırdığı genel kabul görmüştür. Buna karşılık, yüksek bir sülfat direnci elde edebilmek için kullanılan ÖGYFC miktarının toplam bağlayıcı miktarının en az %50'si, cürufun alumina miktarının %11'in altında olması öngörülmektedir [71].

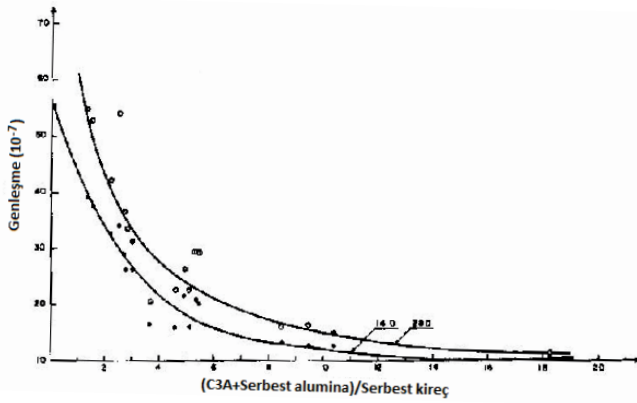
ÖGYFC kullanıldığında sülfat etkisi bakımından betonda meydana gelen olumlu bazı değişiklikler aşağıda özetlenmiştir: 1)  $C_3A$  miktarı, kullanılan cüruf miktarına bağlı olarak azalır; 2) çimentonun hidratasyonu ile elde edilen kalsiyum hidroksit cürufu tepkimeye girerek daha fazla  $C-S-H$  oluşumunda kullanılır ve bu suretle etrenjit oluşumu



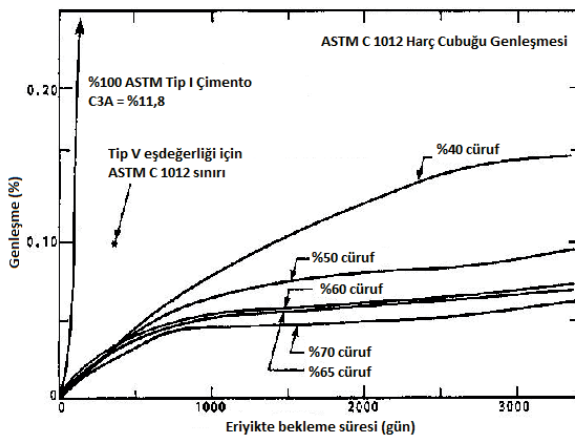
için gerekli olan ortam alkalinitesi azaltılır; 3) Oluşan daha fazla C-S-H betondaki gözenekliliği azaltarak geçirgenliğin düşmesine yol açar [14]. ÖGYFC'nin sülfat direncine etkisini ASTM C 1012 "Sülfat Eriyiğine Maruz Bırakılmış Hidrolik Çimento Harçları İçin Test Yöntemi"ne göre yapılan deneylerle gösteren bir araştırmanın sonucu Şekil 17'de verilmiştir.

**Silis Dumanı:** Yukarıdaki diğer iki mineral katkıdan biraz farklı olarak, silis dumanının betonun sülfat direncine olumlu etkisi daha çok kalsiyum hidroksiti ve geçirgenliği azaltıcı rolüyle açıklanmaktadır. SD, diğerlerine göre çok daha az miktarlarda kullanıldığından C<sub>3</sub>A'yı azaltıcı etkisi önemli bir boyutta değildir [57].

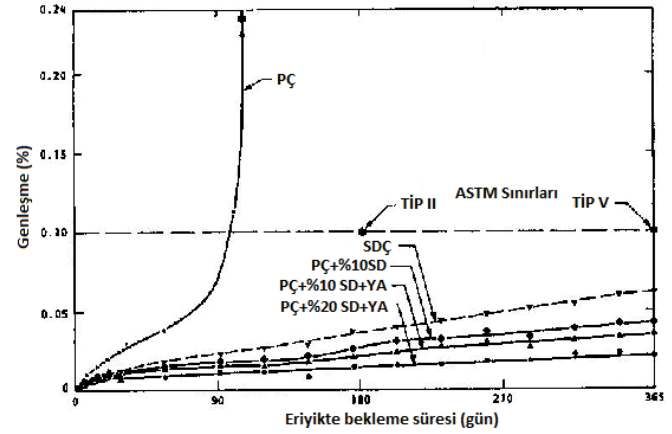
Konu üzerinde yapılan çok sayıda araştırmanın belirttiği olumlu sonuçlara örnek olarak Şekil 18 verilmiştir.



Şekil 16.  $\frac{C_3A + \text{reaktif } Al_2O_3}{\text{serbest } CaO}$  - sülfat genişmesi ilişkisi [83].



Şekil 17. Portland çimentosunun çeşitli miktarlarda ÖGYFC ile ikamesinin sülfat genişmesine etkisi ( 50000 mg/l SO<sub>4</sub> içeren Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> eriyesi ortamında; çüruf alumina miktarı (%8,4) [14].



Şekil 18. SD içeren harç çubuklarının %5 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> eriyeğindeki genişmelerinin ASTM Tip I ve ASTM Tip V çimentolarıyla karşılaştırılması [57].

### 8.3. Alkali-Silika Tepkimesi

Alkali-silika tepkimesi amorf yapıdaki silisli agregalarla betonun gözeneklerindeki suyla çimentonun içerdiği alkali oksitlerin oluşturduğu alkali hidroksitlerin tepkimesidir. Bu tepkime sonucunda alkali-silika jeli olarak adlandırılan bir jel meydana gelir:



Oluşan jelin çok yüksek miktarda su emme kapasitesi bulunur. Dolayısıyla, genişerek betonun çatlamasına ve bozulmasına yol açar. Yukarıda belirtilen tepkime yavaş gerçekleştiğinden, farkedildiğinde çoğu zaman önlem almakta gecikilmiş olur.

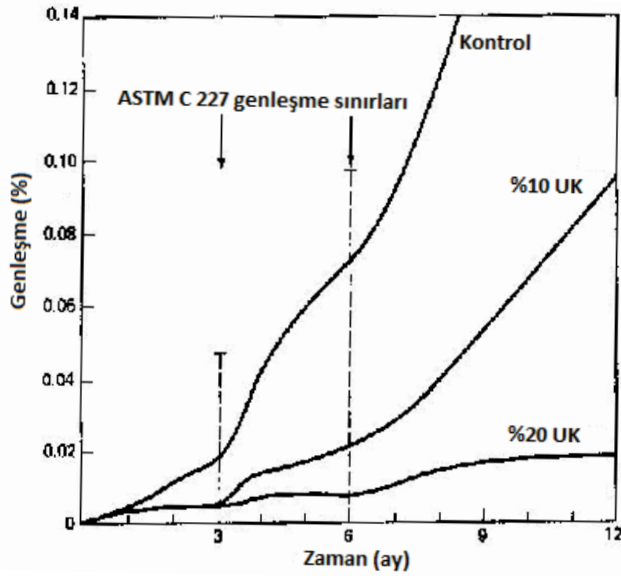
Puzolanik özelliklere sahip mineral katkıların alkali-silika tepkimesinin olumsuz etkilerini önlemekte yararlı olduğu uzun süredir bilinmektedir. UK, ÖGYFC ve SD'nin bu olumlu etkisi 1) kalsiyum hidroksitle yaptıkları puzolanik tepkime sonucunda ortamın alkalinitesini azaltması ve 2) hidratasyonun çok erken evresinde alkaliyle hızlı bir tepkimeye girerek oluşan jelin su emmesine fırsat vermemesi şeklinde açıklanmaktadır [59].

**Uçucu Kül:** Uçucu küllerin alkali-silika genişmesini azaltmak maksadıyla kullanılması üzerine yapılan araştırmalar [81, 82, 83, 84, 85] bu malzemenin portland çimentosunun kütlege en az %15'i oranında kullanılması gerektiği sonucuna varmıştır. Thomas ve Innis araştırmalarında iki düşük kireçli ve 12 yüksek kireçli uçucu külü değişik oranlarda kullanarak iki yıl süresince alkali-silika genişmelerini takip etmişler ve %13-56 arasında değişen kullanım oranlarında tüm uçucu küllerin genişmeyi azaltmakta etkin olduğunu saptamışlardır [84].



Uçucu küllerin alkali oksit miktarının olası etkilerini araştıran bir çalışmada %0,57-4,35 arasında alkali oksit içeren uçucu küller kullanılmış ve alkali-silika genleşmesi bakımından emniyetli tarafta kalınabilmesi için uçucu küllerin alkali oksit içeriğinin %15'tan az olması önerilmiştir [81].

Uçucu kül kullanımının alkali-silika genleşmesine olumlu etkisi Şekil 19'da örneklenmiştir.



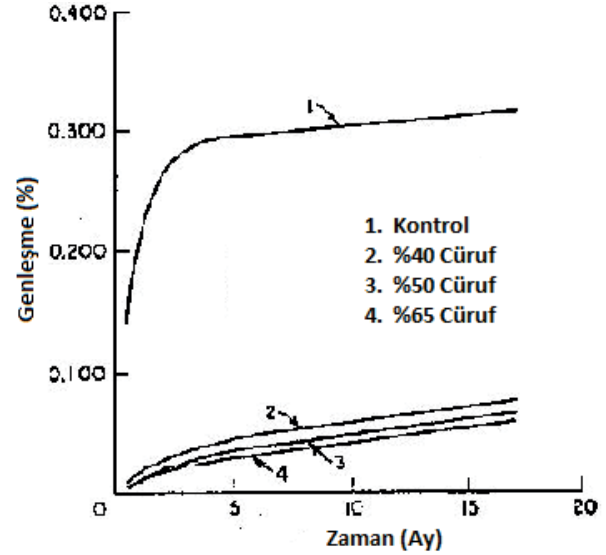
Şekil 19. Uçucu külün alkali-silika genleşmesine etkisi [57].

**Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu:** ÖGYFC'nin toplam bağlayıcı malzeme miktarının %40-65'ini oluşturacak şekilde kullanılması durumunda alkali-silika genleşmesinin neredeyse bütünüyle önleildiği belirtilmektedir [14, 47].

**Silis Dumanı:** SD'nin alkali-silika reaktivitesine olumlu etkisi bu malzemenin alkalilerle hızla birleşmesi ve puzolanik tepkimeyle oluşan C-S-H bünyesinde Ca iyonlarının bir kısmı yerine alkali yerleştirmesiyle açıklanmaktadır. Böylece, gözeneklerdeki eriyikte alkali konsantrasyonu yeterince yüksek olmayacağından zararlı genleşmeler meydana gelmez [55]. Çimentonun kütlece %10'u oranında SD tarafından ikame edilmesiyle C-S-H jelinde bulunan alkali miktarının yalnızca çimento kullanılması durumunda C-S-H jelinde bulunandan üç kat daha fazla olduğu belirlenmiştir [55].

Yüksek alkalili bir portland çimentosunun reaktif agregayla kullanıldığında %0,43 olan 14 günlük genleşmesi kütlece %5, 10 ve 15'i oranlarında SD ile ikamesi sonucunda, sırasıyla %0,12, %0,01 ve %0,01'e; % 0,51 olan bir yıllık genleşmesi de sırasıyla %0,21, %0,05 ve %0,04'e düşmüştür [55].

Silis dumanı kullanımının alkali-silika genleşmesine olumlu etkisi Şekil 21'de örneklenmiştir.



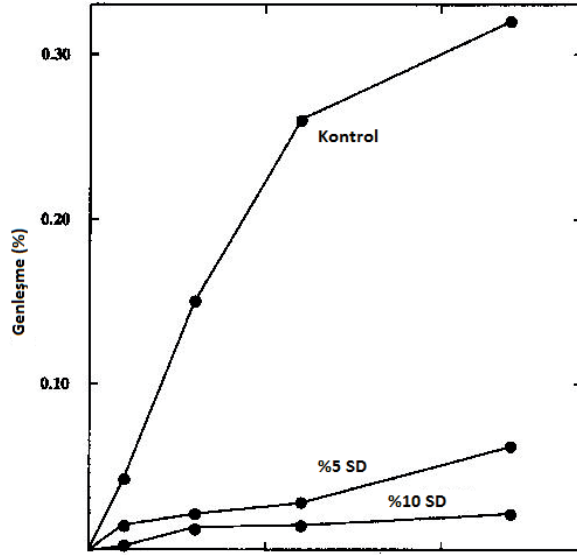
Şekil 20. ÖGYFC'nin alkali-silika genleşmesine etkisi üzerine ASTM C 227'ye göre yapılan bir deneysel çalışmanın sonuçları [45].

#### 8.4. Donatı Korozyonu

Her üç malzeme de, betonun geçirgenliğini azalttıklarından suyun, korozyona neden olan kimyasalların ve oksijenin betona nüfuzunu önemli ölçüde düşürerek donatı korozyonu açısından olumlu etki yaratırlar [14, 27, 55]. Öte yandan, bu mineral katkıların puzolanik etkileri nedeniyle kalsiyum hidroksiti kullanmak suretiyle betonun alkalinitesini azalttığı ve bu nedenle donatı korozyonunu önleyici pasivasyon tabakasını zayıflattığı kaygılarına karşılık yapılan araştırmalar betonların pH değerinin donatı pasivasyonunu etkileyecek ölçüde değişmediği saptanmıştır [14, 87]. Silis dumanının donatı korozyonu bakımından değerlendirilmesi hakkındaki çalışmaların bir çoğu elektriksel rezistivite deneyleriyle yapılmış ve SD kullanımının betonda elektriksel rezistiviteyi, kullanım miktarıyla orantılı olarak artırdığı dolayısıyla donatı korozyon direncini artırdığı saptanmıştır [55].

#### 8.5. Donma-Çözülme Direnci

Betonun donma-çözülme direnci içerdiği sürüklenmiş hava sisteminin uygunluğu, kullanılan agregaların hacim sabitliği, yaş, olgunluk ve nem durumu gibi parametrelerden etkilenir. Bu durum, mineral katkı içersin veya içermesin bütün betonlar için geçerlidir. Donma-çözölmeye karşı yeterli direncin oluşabilmesi için betonun dayanımının yaklaşık 25 MPa düzeyine gelmiş olması pratik bir ölçü olarak kabul edilebilir [27]. UK, ÖGYFC ve SD kullanılan betonların donma-çözölme dirençleri konusunda yapılan çok sayıda araştırmanın genel sonucu olarak, uygun şekilde ve miktarda hava sürüklenmiş ve eşdeğer dayanıma sahip betonların bu malzemeleri içersin veya yalnızca portland çimentosu kullanılarak yapılsın, donma-çözölme davranışları çok benzerdir [14, 27, 55].



**Şekil 21.** Yüksek alkali içeren bir çimentonun alkali silika genleşmesine SD kullanımının etkisi [86].

## Kaynaklar

- Lewis, R., Sear, L., Wainwright, P. And Ryle, R., "Cementitious Additions", Advanced Concrete Technology Set, V.3, Butterworth & Heinemann, 2003.
- Alonso, J.L. And Wesche, K., "Characterization of Fly Ash", Fly Ash in Concrete Properties and Performance, (Ed. K. Wesche), E&FN Spon, 1991.
- Tokyay, M., Effect of A High-Calcium Fly Ash and A Low-Calcium Fly Ash on the Properties of Portland Cement Fly Ash Pastes and Mortar, PhD Thesis, METU, 1987.
- www.maden.org.tr, Tuncer, K., "Türkiye'de Termik Santraller", (2012)
- Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M., Concrete Microstructure, Properties, and Materials, 3rd Ed., McGraw Hill, 2006.
- Moranville-Regourd, M. "Cements Made From Blastfurnace Slag", Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th Ed., (Ed. P.C. Hewlett), Elsevier, 1988.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K., Cürüşar ve Cürüşu Çimentolar, TÇMB AR-GE/Y 97.2, 1997
- Massazza, F., "Pozzolana and Pozzolanic Cements", Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th Ed., (Ed. P.C. Hewlett), Elsevier, 1988.
- Tokyay, M. and Hubbard, F., "Mineralogical Investigations of High-Lime Fly Ashes", 4th CANMET/ACI Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, V. 1, 65-78., İstanbul, Turkey, 1992.
- Beretka, J. and Brown, T., "Properties and Pozzolanic Behavior of Australian Fly Ash", J. of Aus. Cer. Soc., 12 (1), 3-19, 1976.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K., Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB AR-GE/Y 98.3, 1998.
- Turhan, Ş., Parmaksız, A., Köse, A., Yüksel, C., Arıkan, İ.H., and Yücel, B., "Radiological Characteristics of Pulverized Fly Ashes Produced in Turkish Coal-Burning Thermal Power Plants", Fuel, 89, 3892-3900, 2010.
- Regourd, M., "Slags and Slag Cements", Cement Replacement Materials, (Ed. R.N. Swamy), Surrey University Press, 1986.
- ACI 233R-95, "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete", 18pp, 2000.
- Von Schraemli, W., Zement-Kalk, Gips, 16, 140, 1963.
- Mehta, P.K., "Condensed Silica Fume", Cement Replacement Materials, (Ed. R.N. Swamy), Surrey University Press, 1986.

- 17 Aitcin, P.C. , Pinsonneault, P. and Roy, D.M., "Physical and Chemical Characterization of Condensed Silica Fume", Bull. Am. Cer. Soc. 63, 1487-1491, 1984
- 18 Pistilli, M.F., Wintersteen, R., and Cechner, R., "The Uniformity and İnfluence of Silica Fume Source on the Properties of Portland Cement Concrete", Cement, concrete and Aggregate, 6 (2), 120-124, 1984.
- 19 Jahr, J., "Possible Health Hazards From Different Types of Amorphous Silicas", Proc. Symp. On Occupational Health and Safety, ASTM STP 732, 199-213, 1979.
- 20 Yeğınobalı, A., Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, TÇMB AR-GE / Y.01.01, 2009.
- 21 Dhir, R.K., "Pulverized-fuel Ash", Cement Replacement Materials, (Ed. R.N. Swamy), Surrey University Press, 1986.
- 22 Fulton, F.S., "The Properties of Portland Cement Containing Milled Granulated Blast-Furnace Slag", Monograph, PCI, Johannesburg, 4-46, 1974.
- 23 Osborne, G.J., "Carbonation and Permeability of Blast-Furnace Slag Cement Concretes From Field Structures", Fly Ash, Slag and Natural Pozzolans in Concrete (Ed. V.M. Malhotra), ACI SP-114, 1209-1237, 1989.
- 24 Wimpenny, D.E., Ellis, C.M., and Higgins, D.D., "The Development of Strength and Elastic Properties in Slag Cement Under Low Temperature Conditions" Fly Ash, Slag and Natural Pozzolans in Concrete (Ed. V.M. Malhotra), ACI SP-114, 1288-1296, 1989.
- 25 Meusel, J.W. and Rose, J.H., "Production of Granulated Blast Furnace Slag at Sparrows Point and the Workability and Strength Potential of Concrete Incorporating the Slag", Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete ACI SP-79, 867-890, 1983.
- 26 Jahren, P., "Use of Silica Fume in Concrete", Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete ACI SP-79, 625-642, 1983.
- 27 ACI 232.2R-03, "Use of Fly Ash in Concrete", 41 pp, 2003.
- 28 Takemoto, K. and Uchikawa, H., "Hydration of Pozzolan Cements", Proc. 7th Int. Congr. on the Chemistry of Cement, Paris, 3, 84-92, 1980.
- 29 Uchikawa, H. and Uchida, S., "İnfluence of Pozzolana on the Hydration of C<sub>3</sub>A", Proc. 7th Int. Congr. on the Chemistry of Cement, Paris, 4, 24-29, 1980.
- 30 Wesche, K. (ed), Fly Ash in Concrete, Rept. Of TC 67-FAB RILEM, E&FN Spon, 1991.
- 31 Tokyay, M., "Effects of Three Turkish Fly Ashes on the Heat of Hydration of PC-FA Pastes", C&CR, 18 (6), 957-960, 1988.
- 32 Demolian, E., Gourdin, R., Hawthorn, F. and Vernet, C., "İnfluence de la Composition Chimique et de la Texture des Laitier sur leur Hydraulicite", Proc. 7th Int. Congr. on the Chemistry of Cement, Paris, 2, 89-94, 1980.
- 33 Regourd, M., "Structure and Behavior of Slag Portland Cement Hydrates", Proc. 7th Int. Congr. on the Chemistry of Cement, Paris, 1, 10-26, 1980.
- 34 Selleveold, E.J., Badger, D.H., Klitgaard Jensen, K., and Knudsen, T., "Silica Fume-Cement Pastes: Hydration and Pore Structure", Condensed Silica Fume in Concrete (Ed. O. Gjörv and K.E. Løland) NIT Rept BML 82.610, 19-50, 1982.
- 35 Monteiro, P.J.M. and Mehta, P.K., "Improvement of the Aggregate-Cement Paste Transition Zone by Grain Refinement of Hydration Products", Proc. 8th Int. Congr. on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, 3, 433-437, 1986.
- 36 Berry, E.E. And Malhotra, V.M., "Fly Ash for Use in Concrete - A Critical Review", ACI J., 77 (2), 59-73, 1980.
- 37 Lane, R.O. And Best, J.F., "Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete", CI, 5 (10), 50-52, 1982.
- 38 Samarin, A., Munn, R.L., and Ashby, J.B., "The Use of Fly Ash in Concrete - Australian Experience", Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete ACI SP-79, 143-172, 1983.

- 39 Cook, J.E., "Research and Application of High Strength Concrete Using Class C Fly Ash", CI, 4 (7), 72-80, 1982
- 40 Yuan, R.L. and Cook, J.E., "Study of Class C Fly Ash Concrete", Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete ACI SP-79, 307-319, 1983.
- 41 Yamato, T. And Sugita, H., "Shrinkage and Creep of Mass concrete Containing Fly Ash", 1st Int. Conf. On the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, V.1, 87-102, 1983.
- 42 Tunçbilek, B., Effects of Turkish Fly Ashes on the Properties of Portland Cement-Fly Ash Pastes and Mortars, Y. Lisans Tezi, ODTÜ, 1998.
- 43 Ghosh, R.S. and Timusk, J., "Creep of Fly Ash Concrete", ACI J., 78 (5), 351-357, 1981.
- 44 Malhotra, V.M., "Strength and Freeze-Thaw Characteristics of Concrete Incorporating Blast-Furnace Slag", CANMET, I.R. 79-38, 1980.
- 45 Hogan, F.J. and Meusel, J.W., "Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast-Furnace Slag", Cement, Concrete, and Aggregates, 3 (1), 40-52, 1981.
- 46 Bamforth, P.B., "In Situ Measurement of the Effect of Partial Portland Cement Replacement Using Either Fly Ash or Ground Granulated Blast Furnace Slag on the Performance of Mass Concrete", Proc. ICE, 69, 777-800, 1980.
- 47 Wainwright, P.J. and Tolloczko, J.J.A., "The Early and Later Age Properties of Temperature Cycled OPC Concretes", 2nd Int. Conf. On the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, V. 2, 1293-1321, 1986.
- 48 Stutterheim, N., "Properties and Uses of High-Magnesia Portland Slag Cement Concretes", ACI J., 56, 1027-1045, 1960.
- 49 Wainwright, P.J., "Properties of Fresh and Hardened Concrete Incorporating Slag Cements", Cement Replacement Materials, (Ed. R.N. Swamy), Surrey University Press, 1986.
- 50 Neville, A.M., Dilger, W.H., and Brooks, J.J., Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, 1983.
- 51 Neville, A.M., and Brooks, J.J., "Time-Dependent Behavior of Cementsave Concrete", Concrete, 9 (3), 36-39, 1975.
- 52 Malhotra, V.M., Ramachandran, V.S., Feldman, R.F., and Aitcin, P.C., Condensed Silica Fume in Concrete, CRC Press, 221 pp, 1987.
- 53 Wolsiefer, J., "Ultra High-Strength Field Placeable Concrete With Silica Fume Admixture", C.I., 6 (4), 25-31, 1984.
- 54 Luther, M. and Hansen, W., "Comparison of Creep and Shrinkage of High Strength Silica Fume Concretes With Fly Ash Concretes of Similar Strength", CANMET/ACI 3rd Int. Conf. On the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, ACI SP-114 (Ed. V.M. Malhotra), V. 1, 573-591, 1989.
- 55 ACI 234R-96 "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete", 51 pp, 1996.
- 56 Sellevold, E.J., and Nilsen, T., "Condensed Silica Fume in Concrete: A World Review", Supplementary Cementing Materials for Concrete (Ed. V.M. Malhotra), CANMET, Ottawa, 165-243, 1987.
- 57 Mindess, S., and Young, J.F., Concrete, Prentice-Hall, 1981.
- 58 Manmoham, D. And Malhotra, P.K., "Influence of Pozzolanic, Slag and Chemical Admixtures on Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes", Cement, Concrete and Aggregates, 63 (3), 1982.
- 59 Short, N.R., and Page, C.L., "The Diffusion of Chloride Ions Through Portland and Blended Cement Pastes", Silicates Ind., 10, 237, 1982.
- 60 Gebler, S.H., and Klieger, P., "Effect of Fly Ash on Physical Properties of Concrete, ACI SP-91, 1, 1, 1986.
- 61 Plante, P., and Bilodeau, A., "Rapid Chloride Ion Permeability Data on Concretes Incorporating Supplementary Cementitious Materials", ACI SP-114, 625, 1989.
- 62 Ukita, K., Shigematsu, S., and Ishii, M., "Improvements in the properties of Concrete Utilizing Classified Fly Ash", ACI SP-114, 219, 1989.



- 63 Berry, E.E., Hemmings, R.T., Langley, W.S., and Carette, G.G., "Beneficiated Fly Ash: Hydration, Microstructure, and Strength Development in Portland Cement Systems", ACI SP-114, 241, 1989.
- 64 Page, C.L., Short, N.R., and El Tarras, A., "Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Pastes", C&CR, 11 (3), 395-406, 1981.
- 65 Li, S. and Roy, D.M., "Investigations of Relations Between Porosity, Pore Structure, and Cl Diffusion of Fly Ash and Blended Cement Pastes", C&CR, 16 (5), 749-759, 1986.
- 66 Thomas, M.D.A., "Marine Performance of PFA Concrete", Mag. of Concrete Res., 43(156), 171-185, 1991.
- 67 Dhir, R.K., and Byars, E.A., "PFA Concrete: Chloride Diffusion Rates", Mag. of Concrete Res., 45 (162), 1-9, 1993.
- 68 Hooton, R.D. and Emery, J.J., "Sulfate Resistance of a Canadian Slag", ACI Materials J., 87 (6), 547-555, 1990.
- 69 Roy, D.M. and Idorn, G.M., "Hydration, Structure, and Properties of Blast Furnace Slag Cements, Mortars, and Concrete", ACI J., 79 (6), 445-457, 1983.
- 70 Mehta, P.K., "Durability of Concrete in Marine Environment - A Review", ACI SP-65, 1-20, 1980.
- 71 Mehta, P.K. and Gjörv, O.E., "Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica Fume", C&CR, 12 (5), 587-595, 1982.
- 72 Maage, M. and Sellevold, E., "Effect of Microsilica on the Durability of Concrete Structures", C.I., 9 (12), 39-43, 1987.
- 73 Mehta, P.K., "Pozzolanic and Cementitious By-Products as Mineral Admixtures for Concrete - A Critical Review", ACI SP-79, 1, 1983.
- 74 Neville, A.M., Properties of Concrete, Halsted Press, 1973.
- 75 Lea, F.M., "The Testing of Pozzolanic Cements", Cement Technology, 4, 21, 1973.
- 76 Mehta, P.K., "Effect of Fly Ash Composition on Sulfate Resistance of Cement", ACI J., 83, 994, 1986.
- 77 Dunstan, E.R., "A Possible Method for Identifying Fly Ashes That Will Improve the Sulfate Resistance of Concretes", Cement, Concrete, and Aggregates, 2 (1), 20-30, 1980.
- 78 Mehta, P.K., "Effect of Fly Ash Composition on Sulfate Resistance of Cement", ACI J., 83 (6), 994-1000, 1986.
- 79 Tikalsky, P.J. And Carasquillo, R.L., "Fly Ash Evaluation and Selection for Use in Sulfate Resistant Concrete", ACI Materials J., 90 (6), 545-551, 1993.
- 80 Erdoğar, T.Y., Tokyay, M., and Ramyar, K., "Investigations on the Sulfate Resistance of High-Lime Fly Ash Incorporating PC-fa Mortars", 4th CANMET/ACI Int Conf on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, V.1, 271, 1992.
- 81 Farbiarz, J. and Carasquillo, R.L., "Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Containing Fly Ash", Concrete Durability ACI SP-100 (Ed. J.M.Scanlon), 1787-1808, 1987
- 82 Thomas, M.D.A., Hooton, R.D., and Rogers, C.A., "Prevention of Damage Due to Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in Concrete Construction - Canadian Approach", Cement, Concrete, and Aggregates, 19 (1), 26-30, 1997.
- 83 Lane, D.S. and Özyıldırım, H.E., "Evaluation of the Effect of Cement Alkali Content, Fly Ash, Ground Slag, and Silica Fume on Alkali-Silica Reactivity", Cement, Concrete, and Aggregates, 21 (2), 126-140, 1999.
- 84 Thomas, M.D.A. and Innis, F.A., "Use of Accelerated Mortar Bar Test for Evaluating the Efficiency of Mineral Admixtures for Controlling Expansion Due to Alkali-Silica Reaction", Cement, Concrete, and Aggregates, 21 (2), 157-164, 1999.
- 85 Ramyar, K., Çopuroğlu, O., Andıç, Ö., and Fraaij, A.L.A., "Comparison of Alkali-Silica Reaction Products of Fly Ash- or Lithium Salt-Bearing Mortar Under Long-Term Accelerated Curing", C&CR, 34, 1179-1183, 2004.
- 86 Asgierrson, H., and Gudmundsson, G., "Pozzolanic Activity of Silica Dust", C&CR, 9 (2), 249-252, 1979.
- 87 Ho, D.W.S. And Lewis, R.K., "Carbonation of Concrete Incorporating Fly Ash or a Chemical Admixture" ACI SP-79 (Ed. V.M. Malhotra), 333-346, 1983.