

# Puzolanik malzemelerin betonun mekanik özellikleri ve klor iyonu yayılımına etkisi

Özkan ŞENGÜL\*, Mehmet Ali TAŞDEMİR, Odd E. GJØRV\*\*

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

## Özet

Yapılan deneysel çalışmada iki farklı seri beton üretildi. İlk seri betonlarda; portland çimentosu ince öğütülmüş *F* tipi uçucu kül ile yer değiştirildi, ikinci seri betonlarda ise çimentonun yer değiştirilmesi ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile yapıldı. Çalışmanın ilk bölümünde ince öğütülmüş (Blaine özgül yüzeyi  $604 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) uçucu kül miktarının betonun basınç dayanımına ve hızlı klor geçirimsizliğine etkisi incelendi. Sabit 0.35 su/bağlayıcı oranında betonlar üretilerek her üretimdeki toplam bağlayıcı madde miktarı sabit tutuldu ve uçucu kül çimento ile %70'e kadar yer değiştirilerek kullanıldı. Uçucu külün çimentoyla yer değiştirilmesi bire bir ağırlık esasına göre ve %10'luk adımlarla yapıldı. Üretilen betonların çeşitli yaşlarındaki basınç dayanımları bulundu. Bu betonların üzerinde ayrıca ASTM C 1202 standardına göre hızlı klor geçirimsizlik deneyleri de yapıldı. Çimentonun % 40 oranında ince uçucu külle yer değiştirilmesi durumunda beton basınç dayanımları yaklaşık aynı oldu. Betonda ince öğütülmüş uçucu kül kullanımı ile klor geçirimsizlikleri önemli ölçüde azaldı. Çalışmanın ikinci bölümünde ise; aynı su/çimento oranına sahip betonlarda, çimento ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile %40, %60 ve %80 oranlarında yer değiştirildi. Blaine özgül yüzeyi  $5000 \text{ cm}^2/\text{gr}$  olan cürufun çimentoyla yer değiştirmesi yine bire bir ağırlık esasına göre yapıldı. Üretilen bu betonlarda ise klor iyonu yayılımı ve elektriksel özdirenç deneyleri yapıldı. Elde sonuçlar cüruf ilave edilmesinin betonların klor iyonu geçirimsizliklerinin önemli oranda azalttığını ortaya koydu. Cüruf içeren betonların elektriksel özdirençleri de, sadece portland çimentosu ile üretilen betonlara göre büyük oranlarda arttı. Elektriksel özdirenç ölçümlerinin, yapı inşaa sürecinde, elde edilen beton klor geçirimsizliklerinin izlenmesi ve kalite kontrolü için uygun bir yöntem olduğu sonucuna varıldı.

**Anahtar Kelimeler:** Puzolan, mekanik özellikler, dürabilite, klor yayılımı, elektriksel özdirenç.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Özkan ŞENGÜL. osengul@ins.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 37 56.

\*\*Odd E. GJØRV: Norwegian University of Science and Technology, Department of Structural Engineering, Trondheim, Norway.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Effect of pozzolanic materials on the mechanical properties and chloride diffusivity of concrete" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 02.05.2006 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 30.05.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.10.2007 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Effect of pozzolanic materials on the mechanical properties and chloride diffusivity of concrete

### Extended abstract

*The primary objective of the present work is to study the effects of pozzolans on the mechanical and durability properties of concrete. Fly ash and granulated blast furnace slag were used in the study. In order to utilize the potential of these materials and obtain better concrete performance, pozzolans with smaller particle sizes were used, which were obtained by grinding.*

*The experimental study consists of two parts. In the first part, effects of ground fly ash on the concrete properties were investigated. The effect of ground granulated blast-furnace slag on the chloride diffusivity of concrete was the main focus of the second part of the study.*

*In the first part, a coarse F type fly ash was ground to a Blaine surface area of 604 m<sup>2</sup>/kg. The test results show that the physical properties such as density and fineness changed. The physical changes due to grinding are: i) the fineness of fly ash increases, ii) there is a remarkable increase in density by reducing the porosity of the fly ash particles, iii) the spherical fly ash particles transform into the mostly irregular shapes; some small fly ash particles keep their original shapes.*

*For investigating the effects of ground fly ash, eight concrete mixtures were prepared using the same batch of ordinary portland cement (OPC) and ground low-lime fly ash. The aggregate grading used in the mixtures of concrete, water-binder ratio, and the maximum particle size of aggregate were kept constant in all concretes, but the partial replacement of cement by fly ash was varied from 0 % (OPC concrete) to 70 %, in steps of 10 %. The replacement was on one to one weight basis. Compressive strengths of the concretes were obtained for different ages. Rapid chloride permeability test was also carried out on the 1 year old specimens.*

*At 28 days, there was little reduction in compressive strength up to 40 % cement replacement by ground fly ash; then significant decrease was recorded for the further fly ash dosages. At 56 and 120 days, however, the compressive strength up to 40 % cement replacement by fly ash was almost identical to*

*that of the no fly ash concrete and for one year it was even higher. Beyond 40 % replacement, the compressive strength decreased significantly for the age of 1 year. The results of the rapid chloride penetration tests indicated that high volume ground fly ash concrete had much better resistance to the penetration of chloride ions.*

*The main objective of the second part of the experimental study was to investigate the effect of ground granulated blast-furnace slag on the chloride diffusivity of concrete.*

*Concretes with constant water/binder ratio were produced, in which an ordinary portland cement was partially replaced by a ground granulated blast-furnace slag with the replacement ratios of 40%, 60% and 80%, respectively. The slag used had a high fineness with a Blaine specific surface of 5000 cm<sup>2</sup>/gr. Accelerated chloride diffusivity tests based on migration testing were carried out on the concretes. In parallel, testing of electrical resistivity was also conducted. The resistivity of the concretes were obtained by two different test methods; i) two electrode method, and ii) four electrode method.*

*The concretes containing granulated blast - furnace slag showed a significantly better resistance against chloride penetration when compared to that of the pure portland cement. Results proved that slag replacement ratio is a major factor for reducing the chloride diffusivity and the diffusivity decreased with the increasing slag amount. Incorporation of slag had an important effect also on the electrical resistivity of concrete and the resistivity of the concretes containing slag were substantially higher than that of the portland cement concrete. This increase in resistivity became more distinct with the increase in replacement ratio.*

*For a given type of concrete and test conditions, the test results confirmed that there is a linear relationship between chloride diffusivity and electrical resistivity. Hence, as soon as this relationship is established, the test results also confirmed that a monitoring of electrical resistivity may be a very appropriate way for monitoring the chloride diffusivity as part of a general quality control during the concrete construction.*

**Keywords:** Pozzolan, mechanical properties, durability, chloride diffusivity, electrical resistivity.

## **Giriş**

Beton günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesidir. Betonda kullanılan çimentonun üretilmesi fazla miktarda enerji gerektirir. Bu üretim sırasında çevreye önemli zarar da verilmektedir. 1 ton çimento üretimi sırasında yaklaşık 1 ton CO<sub>2</sub> gazı açığa çıkar (Roumain ve Sarkar, 2000). Betonun ana bileşenlerinden olan çimento beton maliyetinde önemli bir yer tutar. Günümüzde çimentonun çeşitli puzolanik malzemelerle yer değiştirilerek hem daha ekonomik, hem de çevreye karşı daha duyarlı bir beton üretimi gündemdedir.

Puzolan; tek başına bağlayıcılık özeliği olmayan ancak ince öğütülüp normal sıcaklıktaki nemli ortamda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özeliği gösteren malzeme olarak tanımlanır (ASTM C618-85). Puzolanlara örnek olarak, uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, tras, silis dumanı gösterilebilir. Bu puzolanların kullanımı yalnızca ekonomik değil, teknik olarak da büyük yararlar gösterir ve birçok beton özelliğini etkiler. Puzolanik malzemelerin betonda iki önemli etkisi vardır: i) puzolanik etki, ii) filler etkisi (boşlukları doldurma etkisi). Bazı araştırmacılara göre filler etkisi puzolanik etkiden daha önemlidir (Goldman ve Bentur, 1993).

Uçucu kül termik santrallerde kömürün yakılması sonucu, bacalardan çıkan külün toplanması ile edilen bir atık malzemedir. Taneler genellikle küresel olup çapları 1 ile 150 µm arasında değişir (Berry ve Malhotra, 1986). Uçucu külün kimyasal bileşimi ve özellikleri kullanılan kömürün yapısına ve külün oluştuğu yakılma işlemine bağlı olarak değişir. Uçucu kül inceliği puzolanik aktiviteyi önemli ölçüde etkiler. Uçucu küller F tipi ve C tipi olarak sınıflandırılabilir. Türkiye’de aktif olarak çalışan 11 adet termik santral vardır ancak bunlardan sadece 1 tanesinden, Çatalağzı Termik Santrali’den F tipi uçucu kül elde edilmektedir, diğer tüm santrallere ait küller ise C tipidir.

Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (ÖYFC) demir üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde

edilen yüksek fırın cürufu yüksek fırınlarda, daha hafif olmasından dolayı, ham demirin üzerinde yer alır. Demir filiz gangı, kok ve kireçtaşının yanma sonrası artıkları yüksek fırın cürufunu meydana getirirler (Tokyay ve Erdoğan, 1997). Yüksek fırın cürufu portland çimentosunun inceliğine yakın derecede öğütülerek çimento ve beton endüstrisinde kullanılabilir (Bijen, 1998).

Cüruf inceliğinin puzolanik aktiviteyi önemli derecede etkilediği bilinmektedir (Swamy, 2000). Cürufu çimento üretiminde cüruf ve klinkerin birlikte öğütülmesi klinkerin daha ince, buna karşılık cürufun daha kaba kalmasına yol açar. Ayrı ayrı öğütme durumunda ise her bir malzeme optimum incelikte öğütülebilir. Böylece çimento ve betonda istenen miktarlarda kullanma kolaylığı sağlanır.

Yapı tasarımında yapının servis ömrünün gözönüne alınması şarttır. Servis ömrü süresince yapı çeşitli çevresel etkiler altında kalmaktadır. Bunlar fiziksel, kimyasal veya fiziko – kimyasal veya mekanik etkiler olabilir. Yurdumuzda yaşanan deprem felaketiyle birlikte yapılarımızın durabilite problemleri de belirgin hale geldi. Donatı korozyonu gibi durabilite kaynaklı çatlama veya kapak atmalar yapılarında daha açık görüldü. Betondaki donatı korozyonu nedeniyle donatı hacmi artar ve beton paspayını çatlatır. Zararlı kimyasalların çatlamış betondan donatıya ulaşması ise daha kolay olur.

Çimentonun suyla olan hidrasyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan Ca(OH)<sub>2</sub> betonun pH’ının 13 civarında olmasını ve bu durum da donatının korozyona karşı korunması için iyi bir ortam sağlar. Ancak çeşitli etkilerle betonun pH değeri azalır ve donatıyı koruyan pasivasyon tabakası da kaybolur ve donatı korozyon etkisine açık hale gelir. Ortamda su ve oksijen bulunması durumunda da korozyon başlar (Neville, 1997). Betonda korozyona yol açan etkenlerden bir tanesi karbonatlaşma diğeri ise klor etkisidir.

Klor betona çeşitli şekillerde etkiyebilir; i) kullanılan agrega veya katkı maddelerinden ve ii) yapının bulunduğu çevreden (örneğin deniz su-

yu etkisiyle ya da kışın kullanılan buz çözücü tuzların etkisiyle).

Sunulan bu çalışmanın temel amacı ince öğütülmüş uçucu kül ve yine ince öğütülmüş yüksek fırın curufunun betonun klor geçirimsizliği ve basınç dayanımına etkisini incelemektedir.

### Deneysel çalışmalar

Yapılan çalışmada iki farklı seri beton üretildi. İlk seri betonlarda portland çimentosu ince öğütülmüş F tipi uçucu kül ile yer değiştirilmiş, ikinci seri betonlarda ise çimentonun yer değiştirilmesi ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile yapılmıştır.

### Kullanılan malzemeler

**Öğütülmüş uçucu kül** - Bu çalışmada kullanılan uçucu kül, Karadeniz'in batı sahilinde bulunan Çatalağzı Termik Santralinden sağlanmıştır. Standart RİLEM-Cembureau portland çimento harçlarının 7 ve 28 günlük dayanımları sırasıyla, 45.8 ve 57.3 MPa'dır. Çalışmanın ilk bölümünde kullanılan çimento ve uçucu külün bileşimi Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Çalışmanın ilk bölümünde kullanılan portland çimentosu ve uçucu külün kimyasal bileşimleri

Oksitler	Bileşim (%)	
	Portland çimentosu	Uçucu kül
SiO <sub>2</sub>	20.0	60.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.6	6.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.1	21.8
CaO	63.2	2.5
MgO	1.1	1.6
SO <sub>3</sub>	2.8	0.5
K <sub>2</sub> O	0.8	4.9
Na <sub>2</sub> O	0.3	0.5
Cl	0.03	0.006
Kızdırma kaybı	2.8	0.3

Uçucu kül bilyalı bir laboratuvar değirmeninde öğütülmüştür. Öğütülmüş uçucu külün bazı fiziksel özellikleri Tablo 2'de gösterilmektedir. Öğütme öncesi uçucu külün tane boyutunun ol-

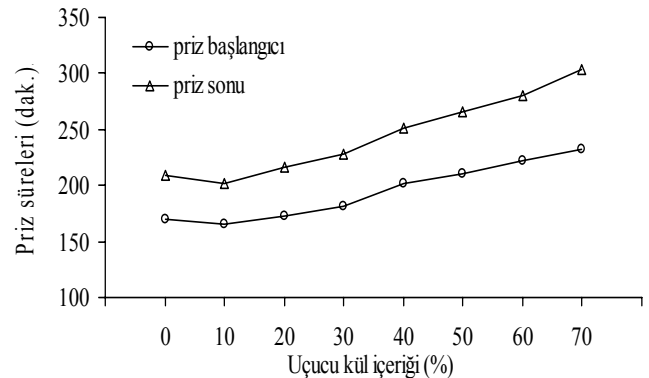
dukça iri ve düşük yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Uçucu külün öğütme öncesi ve sonrası bazı fiziksel özellikleri

Özellik	Uçucu kül	
	Öğütme öncesi	Öğütme sonrası
Blaine özgül yüzey (m <sup>2</sup> /kg)	222	604
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	2.0	2.51
200 µm'luk elek üzerinde kalan (%)	12.0	0.0
90 µm'luk elek üzerinde kalan (%)	33.0	0.7
45 µm'luk elek üzerinde kalan (%)	50.0	3.7

Uçucu külün öğütülmesiyle birlikte yoğunluk ve incelik değişmektedir. Öğütme sonucu şu fiziksel değişimler oluşmaktadır: i) uçucu külün inceliği azalmaktadır, ii) uçucu kül tanelerinin porozitesinin azalması sonucunda özgül ağırlıkta belirgin bir artış olmaktadır, iii) öğütmeden önce küresel şekle sahip uçucu kül taneleri öğütme sonucu şekilsiz taneler haline gelmektedir, bazı küçük taneler ise orjinal şekillerini korur.

Uçucu kül içeren çimento hamurlarının priz başlangıç ve bitiş süreleri de bulunmuştur. Şekil 1'de görüldüğü gibi uçucu kül miktarının artmasıyla birlikte priz süreleri uzamaktadır.



Şekil 1. Çimento hamuru priz sürelerinin uçucu kül içeriği ile değişimi

Uçucu külün öğütme öncesi ve öğütme sonrası tane boyut dağılımı ise Şekil 2’de gösterilmektedir. Öğütme ile birlikte uçucu külün ortalama tane boyutu azalmaktadır.

ASTM C 618-85 ile EN 450 sınırlamaları Tablo 3’de verilmiştir. Kullanılan uçucu küle ait deney sonuçları da bu tabloda son sütunda gösterilmektedir. Burada S: Si<sub>2</sub>O, A: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olup bu çalışmada kullanılan uçucu kül tablodan da anlaşılacağı üzere F tipi olarak sınıflandırılabilir.

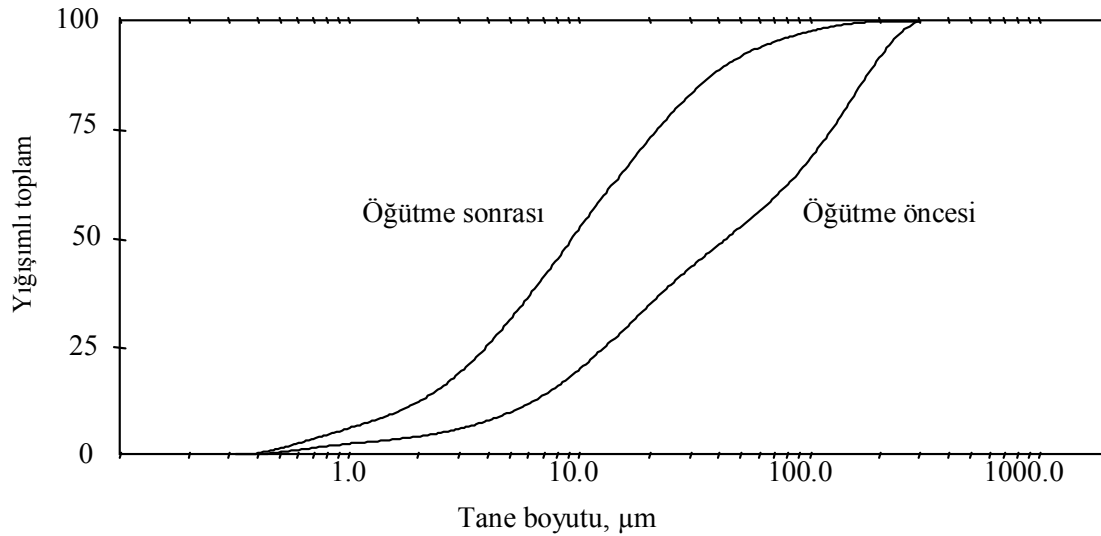
Tablo 3. EN 450 ve ASTM C 618-85’e göre uçucu kül şartnamesi

	EN 450	ASTM C 618		Kullanılan uçucu kül
		F tipi	C tipi	
S+A+F, min. (%)	70.0	70.0	50.0	88.6
SO <sub>3</sub> , maks. (%)	3.0	5.0	5.3	0.5
Nem içeriği, maks. (%)	3.0	3.0	3.0	0.1
Kızdırma kaybı, maks. (%)	5.0	6.0	6.0	0.4
Na <sub>2</sub> O olarak mevcut alkali, maks. (%)	-	1.5	1.5	0.3
45 µm’luk elek üzerinde kalan, maks. (%)	40.0	34.0	34.0	3.7

Tablo 3’den görüldüğü gibi, EN 450 ve ASTM C 618-85 standartları F tipi için S+A+F’in mi-

nimum değerini %70 ile sınırlandırır. C tipi uçucu kül için ise ASTM C 618-85’de S+A+F miktarı %50 ile sınırlıdır. Uçucu külleri S+A+F içerikleri ve elde edildikleri kömürlerin cinslerine göre sınıflandıran ASTM C 618-85 standardına göre; Türkiye’deki 11 termik santralden elde edilen uçucu küllerden sadece bir tanesi; Çatalağzı’nda üretilen ve bu çalışmada kullanılan uçucu kül F tipi şartlarını sağlamaktadır. Diğer uçucu küller ise linyit kömürlerinden elde edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan uçucu külün S+A+F miktarı yukarıda belirtilen sınırlamaları sağlamaktadır. BS 3892 standardına göre kızdırma kaybı en fazla %7 olmalıdır. EN 450 ve BS 3892’deki sülfat için istenen spesifikasyonlar, ASTM C 618 deki değerden düşüktür. Bu çalışmada kullanılan öğütülmüş uçucu kül istenilen koşullara uygun bir mineral katkıdır.

Öğütülmüş uçucu külün puzolanik aktivitesi - Puzolanik aktivite uçucu külün en kritik özeliğidir. Uçucu külün puzolanik aktivitesini belirlemek için değişik yöntemler vardır. Bu çalışmada kullanılan uçucu kül için ASTM C 311-85’e göre kireç içerikli puzolanik aktivite deneyi yapıldı. Elde edilen deney sonuçları ve ASTM C 311-85 standardı sınır değerleri Tablo 4’de verilmektedir. Yapılan son çalışmalar öğütülmüş uçucu kül inceliğinin puzolanik aktivite indisini büyük oranda etkilediğini göstermektedir. Tablo 4’te gösterildiği gibi blaine özgül



Şekil 2. Uçucu kül tane boyut dağılımının öğütme sonucu değişimi

yüzeyinin 222 m<sup>2</sup>/kg'den 604 m<sup>2</sup>/kg'e çıkartılması puzolanik aktivite deneyinde elde edilen 7 günlük basınç dayanımını % 79.7 arttırmıştır.

Tablo 4. Öğütülmüş uçucu kül puzolanik aktivite deney sonuçları

7 günlük basınç dayanımı, MPa	Uçucu kül	
	Öğütme öncesi, Blaine Ö.Y.: 222 m <sup>2</sup> /kg	Öğütme sonrası, Blaine Ö.Y.: 604 m <sup>2</sup> /kg
Deney sonucu	7.9	14.2
ASTM C618-85 standardı F türü için minimum değer	5.5	5.5

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu – Çalışmanın ikinci bölümünde kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufunun ve portland çimentosunun kimyasal bileşimi Tablo 5'te verilmektedir. Kullanılan cüruf 5000 cm<sup>2</sup>/gr Blaine özgül yüzeyine sahip olup, özgül ağırlığı 2.92 gr/cm<sup>3</sup>'dir.

Tablo 5. Çalışmanın ikinc bölümünde kullanılan portland çimentosu ve cürufun kimyasal bileşimleri

Oksitler	Bileşim (%)	
	Portland çimentosu	Cüruf
SiO <sub>2</sub>	19.9	33.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.4	0.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.7	12.0
CaO	62.4	31.5
MgO	2.1	16.8
SO <sub>3</sub>	3.2	3.5
K <sub>2</sub> O	0.9	0.6
Na <sub>2</sub> O	0.3	0.6
Cl <sup>-</sup>	0.04	0.01
Kızdırma kaybı	2.5	1.4

### Beton karışımları

Öğütülmüş uçucu kül ile üretilen beton karışımları - Aynı portland çimentosu (PÇ 42.5) ve aynı F tipi uçucu kül kullanılarak sekiz beton karışımı üretildi. Üretilen tüm betonlarda su/bağlayıcı

oranı, agrega granülometrisi ve maksimum agrega tane boyutu sabit tutuldu. Uçucu külün çimento ile kısmi yer değiştirilmesi % 70'e kadar % 10'luk adımlarla gerçekleştirildi. Yer değiştirme bire bir ağırlık esasına göre yapıldı. Beton agrega karışım eğrisi ISO A16-B16 arasında, ancak B16 eğrisine yakın seçildi. Su/bağlayıcı oranı, üretilen tüm betonlarda 0.35'di. 100±20 mm gibi aynı çökme değerlerini sağlamak için süper akışkanlaştırıcı kullanıldı.

Öğütülmüş uçucu kül ile üretilen betonlar şu şekilde isimlendirildi: NB, UKB 10, UKB 20, UKB 30, UKB 40, UKB 50, UKB 60 ve UKB 70. Burada NB uçucu kül içermeyen kontrol betonunu, UKB ise uçucu kül içeren betonları göstermektedir. UKB'den sonra gelen iki rakam ise % 0 'dan % 70'e kadar değişen öğütülmüş uçucu kül yer değiştirme yüzdesini göstermektedir. Bu betonların bileşimleri Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 6. Öğütülmüş uçucu kül ile üretilmiş betonların bileşimleri (kg/m<sup>3</sup>)

Karışım	NB	UKB 10	UKB 20	UKB 30	UKB 40	UKB 50	UKB 60	UKB 70
Çimento (Ç)	472	424	375	330	283	237	189	142
Uçucu kül (UK)	0	47	94	141	189	237	284	330
Su (S),	166	165	164	165	165	165	165	165
Akışkanlaştırıcı	2.6	2.1	2.3	2.4	2.5	2.5	2.5	2.5
Doğal kum	260	259	256	256	255	254	252	249
Kırmakum	475	472	467	466	465	463	460	456
No. I	1121	1114	1101	1100	1096	1092	1084	1074
Hava (%)	2,2	2,2	2,8	2,3	2,1	1,8	1,9	2,2
Çökme, mm	110	90	105	105	110	100	95	110
S/(Ç+UK)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Birim ağırlık	2496	2483	2459	2460	2455	2450	2436	2418

Hazırlanan numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılıp mekanik deneylerin yapılacağı güne kadar 20°C sıcaklıktaki kirece doymun su içinde tutuldu. Basınç deneyi, için 150x150x150 mm boyutlarında küp numuneler, klor geçirimsizliği deneylerinde kullanmak için ise 100 mm çaplı, 200 mm yüksekliğinde numuneler hazırlandı.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile üretilen beton karışımları - Deneysel çalışmada 0.40 su/çimento oranına sahip betonlar üretildi. Çimento ağırlıkça % 40, % 60 ve % 80 oranlarında ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile yer değiştirildi. Ayrıca, cüruf içermeyen bir kontrol karışımı da hazırlandı; böylece toplam 4 farklı beton karışımı elde edildi. Cürufun çimentoyla yer değiştirmesi bire bir ağırlık esasına göre yapıldı. Üretilen betonların gerçek bileşimleri Tablo 7’de gösterilmektedir.

Tablo 7. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile üretilmiş betonların bileşimleri ( $kg/m^3$ )

Karışım	100 PÇ	40C	60C	80C
Çimento (C)	425	255	169	85
ÖYFC	0	170	254	339
(Çimento+ÖYFC)	425	425	423	424
Su	170	170	169	169
Su/(Ç+ÖYFC)	0.40	0.40	0.40	0.40
Akışkanlaştırıcı	5.8	5.1	4.8	4.0
Doğal kum	918	910	905	903
Kırmaş I	313	311	309	308
Kırmaş II	606	601	597	596
Çökme, mm	165	175	145	165
Birim ağırlık	2437	2421	2409	2404

Üretilen betonlar şu şekilde isimlendirildi; 100 PÇ bağlayıcı olarak sadece portland çimentosu içeren karışımı, 40C, 60C ve 80C ise sırasıyla: çimentonun ağırlıkça % 40, %60 ve %80 oranında öğütülmüş yüksek fırın cürufuyla yer değiştirildiği karışımları ifade etmektedir.

### Yapılan deneyler

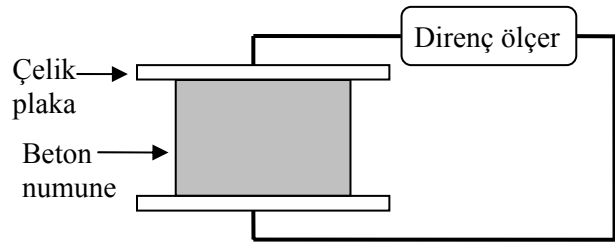
Öğütülmüş uçucu kül ile üretilen betonlar üzerinde yapılan deneyler - Bu betonlar üzerinde basınç dayanımı ve ASTM C 1202 standardına göre hızlı klor geçirimliliği deneyleri yapıldı. Basınç dayanımı farklı yaşlar için, klor geçirimliliği ise sadece 1 yıllık numuneler üzerinde elde edildi.

Öğütülmüş cüruf ile üretilen betonlar üzerinde yapılan deneyler - Cüruf içeren betonlar üzerinde NT-492’ye göre hızlandırılmış klor yayını deneyleri ile elektriksel direnç ölçümleri

gerçekleştirildi. Elektriksel direnç ölçümleri iki farklı yöntemle yapıldı; iki elektrot yöntemi ve dört elektrot yöntemi.

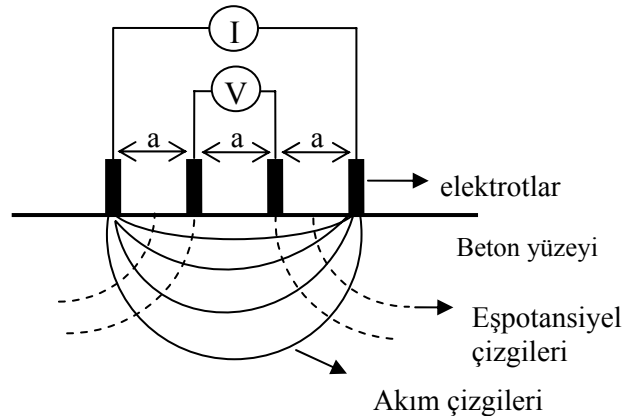
Tüm direnç ölçümleri yüzey kuru – suya doymun numuneler üzerinde gerçekleştirildi.

İki elektrot yönteminde; Şekil 3’te gösterildiği gibi iki metal plaka arasına yerleştirilen beton numunesinin elektriksel direnci bir direnç ölçer ile okunur.



Şekil 3. Beton elektriksel direncinin beton dış yüzeyine yerleştirilen metal plakalar kullanılarak ölçülmesi

Üretilen betonların elektriksel direncinin ölçülmesi için kullanılan diğer yöntem ise Şekil 4’de gösterilen dört elektrot yöntemidir. Wenner elektrot yöntemi olarak da isimlendirilen bu deney yönteminde aynı doğrultu üzerine yerleştirilen ve birbirlerinden eşit uzaklıkta dört elektrot kullanılır. Elektrotlar tek bir yüzeye yerleştirildiği için bu yöntem laboratuvarında olduğu kadar sahada da kolaylıkla kullanılabilir.



Şekil 4. Dört elektrot yönteminin şematik gösterimi

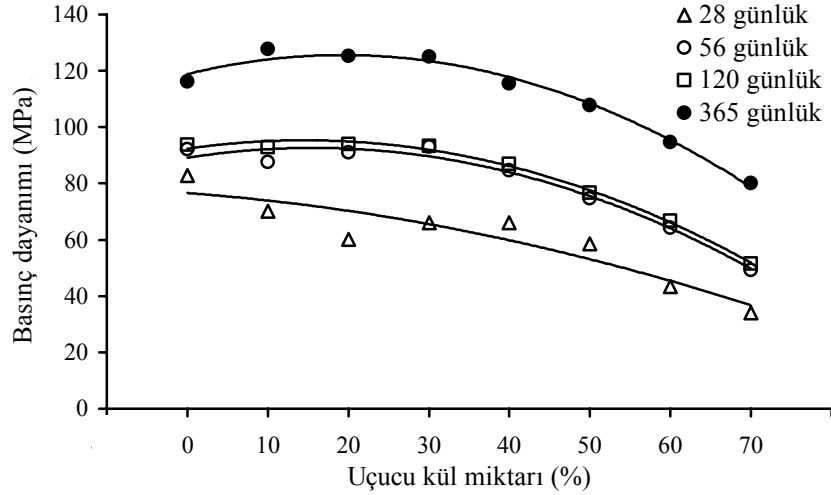
## Deney sonuçlarının değerlendirilmesi Öğütülmüş uçucu külün etkisi

*Basınç dayanımı* - Şekil 5'te görüldüğü gibi basınç dayanımı beton yaşıyla artmaktadır. Çalışmada, %70 oranında kül içeren betonlarda bile 28. günde 34 MPa'nın üzerinde dayanım elde edilmiştir ve böyle bir beton taşıyıcı beton olarak sınıflandırılabilir. 28. günde, uçucu kül içeren betonların basınç dayanımları normal betona göre daha düşüktür. 56 ve 120. günlerde ise, %30 oranına kadar uçucu kül içeren betonların dayanımı normal betonla yaklaşık aynıdır, bu yerdeğiştirme oranından itibaren ise dayanımlarda azalmalar elde edilmiştir.

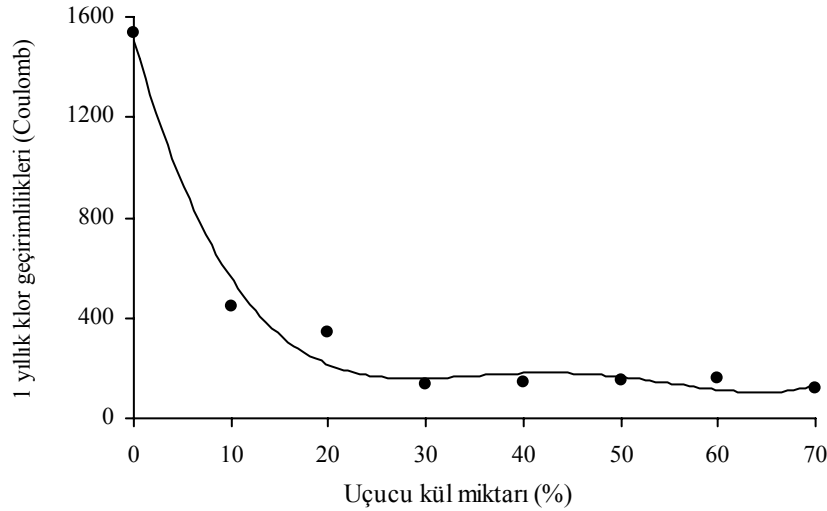
1 yıllık basınç dayanımları incelenirse, %30 yerdeğiştirme oranına kadar öğütülmüş uçucu

kül içeren betonların basınç dayanımlarının, uçucu kül içermeyen kontrol betonlarından yüksek olduğu görülür. Bu yaştaki % 40 oranında uçucu kül içeren betonun dayanımı kontrol betonu dayanımına eşittir. Bu orandan sonra ise basınç dayanımlarında azalma olmaktadır. Buna karşın, en düşük dayanıma sahip %70 oranında uçucu kül kullanılan betonun bile 1 yıllık basınç dayanımı 80 MPa'dır ve bu betonlar yüksek dayanımlı beton olarak sınıflandırılabilir (Şengül vd., 2005).

*Hızlı klor geçirimliliği* - ASTM C 1202 standardına göre yapılan hızlı klor geçirimliliği deney sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir. 1 yıllık basınç dayanımı 116.2 MPa olan uçucu kül içermeyen kontrol betonunun hızlı klor geçirimliliği



Şekil 5. Öğütülmüş uçucu kül miktarının beton basınç dayanımına etkisi



Şekil 6. Öğütülmüş uçucu kül miktarının beton klor geçirimliliğine etkisi



deney sonucu ortalaması 1536 Coulomb'dur. Çimentonun bir kısmının ince uçucu kül ile yer değiştirilmesi sonucu ise klor geçirimsizliklerinde önemli miktarda azalma görülmektedir. Uçucu kül miktarını %30'u geçtikten sonra ise bu değerlerdeki değişim fazla değildir, buna rağmen %30 uçucu kül yer değiştirminden sonraki tüm değerler 150 Coulomb'dan düşüktür (Şengül vd., 2003).

ASTM C 1202 standardında verilen sınır değerlere göre; uçucu kül içermeyen kontrol betonu, klor geçirimsizliği düşük beton olarak sınıflandırılabilir. %30'dan fazla uçucu kül içeren betonlar ise "klor iyonu geçirimsizliği ihmal edilebilir beton" sınırına yakın değerlere sahiptir. Elde edilen bu düşük klor geçirimsizlikleri, bu betonlarla üretilen yapıların klor etkisinde çok daha uzun bir servis ömrüne sahip olacağını göstermektedir.

### **Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun etkisi**

*Klor yayını* - Hızlandırılmış klor yayını deney sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi öğütülmüş yüksek fırın cürufu betonda klor yayınına önemli ölçüde etkilemektedir. Klor yayınına elde edilen azalmalar betondaki cüruf içeriği ile yakından ilgilidir (Şengül ve Gjörv, 2005).

Şekilde görüldüğü gibi, cüruf kullanımıyla birlikte, 7 gün gibi erken bir yaşta bile beton klor yayınına önemli azalmalar elde edilmiştir. Portland çimentosunun % 40 oranında öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile yer değiştirilmesi sonucu, hızlandırılmış klor yayınına değerlerinde 7 günlük betonlarda % 14 düşüş sağlanmıştır. % 60 ve % 80 oranlarında cüruf içeren betonlarda ise 7 gündeki bu azalmalar sırasıyla % 22 ve % 31'dir.

Tüm betonlarda klor yayınına yaş ile birlikte azalmıştır. Bu azalmalar cüruf ile üretilmiş betonlarda çok daha fazladır ve cüruf miktarına bağlı olarak daha belirgindir. Sadece portland çimentosu ile üretilmiş betonlarda 28 günlük klor yayınına değerlerinin 7 günlük değerlere oranı % 84'dür. % 40, % 60 ve % 80 öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren betonlarda ise 28 günlük yayınına sonuçlarının 7 günlüktekilere oranları sırasıyla % 41, % 35 ve % 25'dir.

28 günlük deney sonuçları karşılaştırıldığında cüruf içeren betonlara ait klor yayınına değerlerinin sadece portland çimentosuyla yapılan betona göre oldukça düşük olduğu görülmektedir. % 40, % 60 ve % 80 oranlarında cüruf içeren betonlara ait değerler portland çimento kontrol betonuna göre sırasıyla % 56, % 68 ve % 79 oranlarında azalmıştır.

*İki elektrot yöntemiyle elde edilen elektriksel özdirenç* - İki elektrot yöntemi kullanılarak elde edilen özdirenç değerleri Şekil 8'de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi tüm betonlarda özdirenç beton yaşıyla birlikte artmaktadır, ancak bu artış öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren betonlarda çok daha belirgindir. Erken yaşlarda, örneğin üç günlük numunelerde, cüruf içeren betonların özdirençleri portland çimento kontrol betonuna ait değerlerden düşük iken, 7 gün ve sonraki yaşlarda cüruf betonların özdirençleri çok daha yüksektir. 28 günlük değerler karşılaştırıldığında; % 40 oranında cüruf ile üretilmiş betona ait özdirenç değerinin kontrol betonu özdirençinden % 80 kadar yüksek olduğu görülür. Bu oran % 60 cüruf içeren beton için % 260 ve % 80 cüruf içeren beton için ise % 515 olmaktadır.

*Dört elektrot yöntemiyle elde edilen elektriksel özdirenç* - Şekil 9'da gösterildiği gibi, dört elektrot yöntemiyle elde edilen özdirenç değerleri de yüksek fırın cürufu içeren betonların yüksek performansını ortaya koymaktadır.

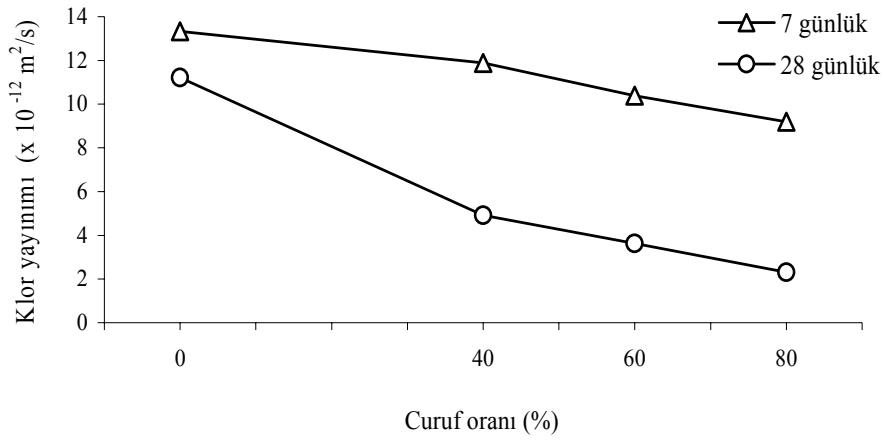
Şekil 8 ve Şekil 9 karşılaştırıldığında görüleceği gibi, iki elektrot yöntemiyle elde edilen sonuçlara benzer değerler elde edilmiştir. Cüruf içeren betonların dirençleri 7 gün ve sonrası yaşlarda portland çimentosuyla yapılmış betonların dirençlerinden yüksektir. Örneğin 28 günlük değerler karşılaştırıldığında; cüruf oranına bağlı olarak bu betonların özdirenç kontrol betonundan yaklaşık 2 ila 6 kat yüksektir.

### **Deney yönteminin beton özdirençine etkisi**

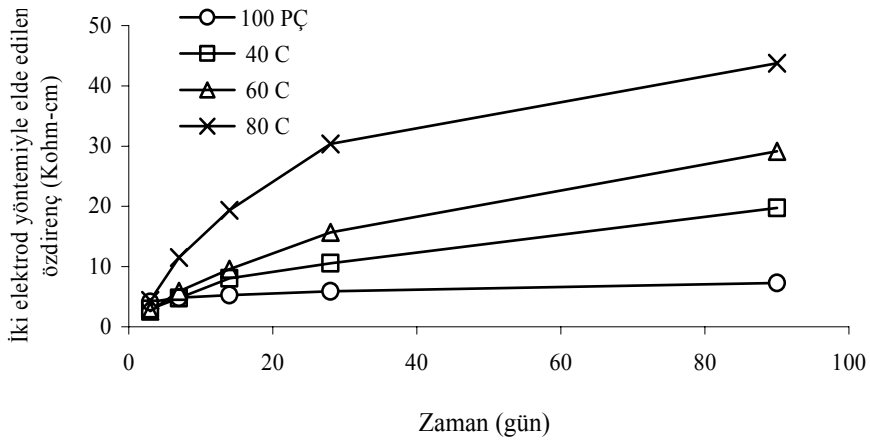
Aynı beton numuneler üzerinde iki elektrot ve dört elektrot yöntemleri ile elde edilen özdirenç değerleri cürufun etkisini açık olarak ortaya koymaktadır. Ancak herhangi bir beton için belirli bir günde elde edilen sonuçlar karşılaştırıl-

diğında iki yöntemle elde edilen sonuçların birbirlerinden farklı olduğu görülmektedir. İki elektrot yönteminde kullanılan plakalar beton

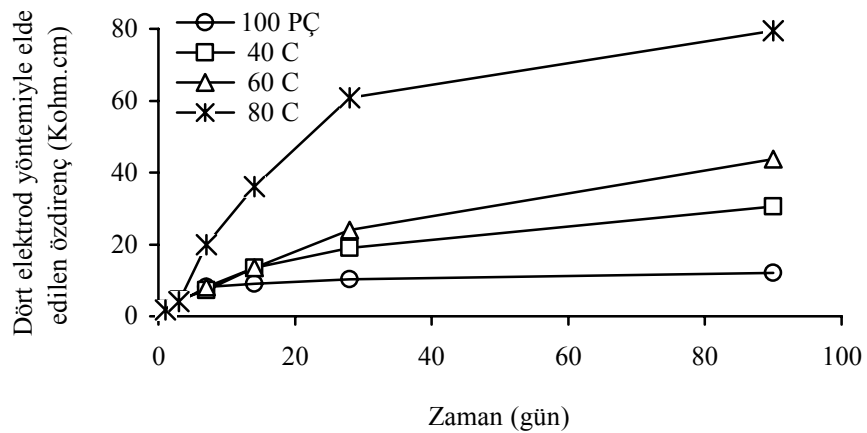
küp numunenin tüm yüzeyine temas etmekte, dolayısıyla elektrik akımı tüm numune kesitinden geçmektedir.



Şekil 7. Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun betonun klor yayınına etkisi



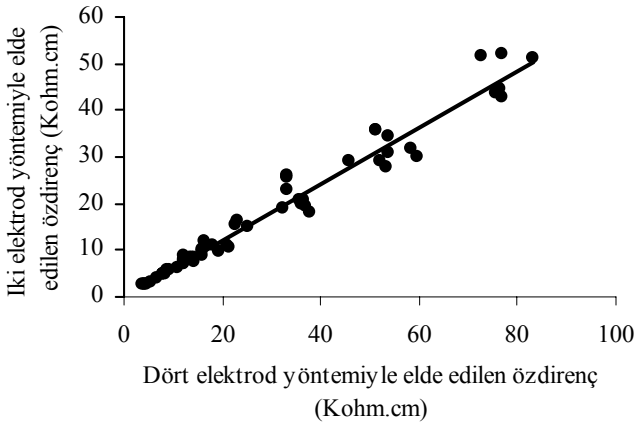
Şekil 8. Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun betonun betonun iki elektrot yöntemiyle edilen elektriksel öz direncine etkisi



Şekil 9. Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun betonun betonun dört elektrot yöntemiyle edilen elektriksel öz direncine etkisi

Kullanılan diğer metot olan dört elektrot yönteminde ise elektriksel özdirenç, Şekil 4’de gösterildiği gibi bir doğrultu üzerinde yan yana yerleştirilen ve birbirlerine eşit uzaklıkta bulunan elektrotlar ile elde edilir. Bu yöntemde akım, elektrotlar arasındaki mesafeye bağlı olarak yüzeyden belirli bir derinliğe kadar ilerler.

Elektrik akımının numune içinde izlediği yollar farklı olduğu için deney yöntemine bağlı olarak farklı özdirenç değerleri bulunmuştur. Ancak, bu yöntemlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında Şekil 10 elde edilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi iki yöntem arasında güçlü bir ilişki mevcuttur.



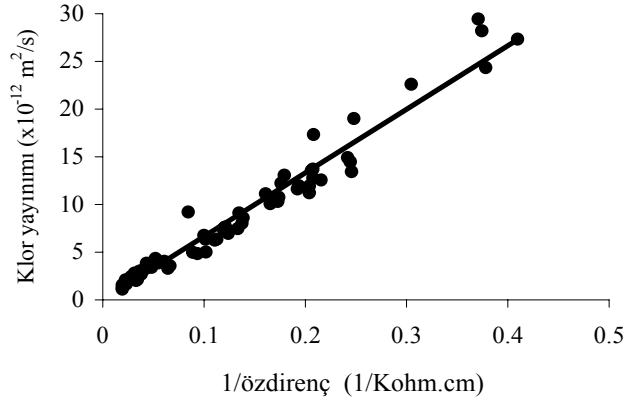
Şekil 10. İki elektrot yöntemi ile dört elektrot yöntemi arasındaki ilişki

### Klor iyonu yayını ile özdirenç arasındaki ilişki

Beton numuneler üzerinde elde edilen hızlandırılmış klor yayını ile elektriksel direnç arasında elde edilen doğrusal ilişki Şekil 11’de gösterilmektedir.

Özellikle deniz ve liman yapıları gibi klor etkisinde kalacak betonarme yapılar için çok büyük öneme sahip olan klor yayınına yapı inşaa sürecinde rutin olarak kalite kontrolünün yapılması oldukça zahmetli ve uzun zaman gerektiren bir uygulamadır. Şekil 11’de gösterilen yayını – özdirenç ilişkisi çalışmada gözönüne alınan 4 farklı betona ait sonuçları içermektedir. Klor yayını ve özdirenç arasındaki böyle bir bağıntı sadece belirli bir beton için elde edilirse, bu bağıntıya dayanarak yapı inşaa sürecinde be-

ton klor yayınına düzenli kontrolü oldukça kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilir. Böyle bir kalite kontrol yöntemi dört elektrot yöntemi kullanılarak hem laboratuvarında hem de sahada rahatlıkla uygulanabilir (Gjörv, 2002).



Şekil 11. Elektriksel özdirenç ile klor yayını arasındaki ilişki

### Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Uçucu külün öğütülmesi sonucu yoğunluk ve incelik gibi fiziksel özellikleri değişir.
2. Uçucu külün yüzey alanının artmasıyla puzolanik aktivite önemli oranda artmaktadır.
3. Bir yıllık numuneler üzerinde yapılan basınç deneylerinde uçucu külün % 40’a kadar kullanıldığında elde edilen dayanım kontrol betonun dayanımından yüksektir. Bu orandan sonra dayanımlarda azalma olmaktadır, ancak % 70 oranında uçucu külün kullanıldığı betonlarda dahi bir yıllık dayanım 80 MPa’dır.
4. Yüksek oranda uçucu kül kullanılan betonların hızlı klor geçirimsizliği sonuçları çok düşüktür ve ASTM C 1202’nin belirttiği “klor geçirimsizliği ihmal edilebilir beton” sınırına çok yakındır.
5. Çimentonun öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile yer değiştirilmesi betonda hızlandırılmış klor yayınına önemli ölçüde azaltmıştır. Bu azalma, 7 gün gibi erken yaştaki betonlarda da gözlenmiştir. Klor yayınındaki düşüş 28 günlük betonlarda çok daha belirgindir.

6. Klor yayınındaki azalma cüruf yerdeğiştirme oranıyla yakından ilgilidir. Çimentonun cürufyla yerdeğiştirme oranı arttıkça klor yayını azalmaktadır.
7. Cüruf içeren betonların elektriksel özdirenci 7 gün ve sonraki yaşlarda çok daha yüksektir. Cüruf oranının artmasıyla birlikte özdirenç de artmaktadır.
8. Betonda klor yayını ile özdirenci arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Klor yayını ve özdirenç arasındaki böyle bir bağıntı sadece belirli bir beton için elde edilirse, bu bağıntıya dayanarak beton klor yayınına rutin kontrolü oldukça kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilir.

### Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi ve Norwegian University of Science and Technology (NTNU)'de gerçekleştirilmiştir. Birinci yazar, desteklerinden dolayı Norveç Araştırma Konseyi ve NTNU Yapı Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür eder.

### Kaynaklar

- ASTM C 618-85, *Standard Specifications for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*, ASTM, Philadelphia.
- ASTM C 618-85, *Standard Methods of Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement*, ASTM, Philadelphia.
- Berry, E.E. ve Malhotra, V.M., (1986). *Fly Ash in Concrete*, SP85-3, CANMET, 178.
- Bijen, J. (1998). *Blast Furnace Slag Cement for Durable Marine Structures*, VNC/BetonPrisma, The Netherlands, 62.

- BS 3892 (1997). *Pulverized-Fuel Ash*, British Standard, BSI, London.
- EN 450 (1994). *Fly Ash for Concrete*, European Committee for Standardization, CEN, Brussels.
- Gjörv O.E. (2002), Durability and Service Life of Concrete Structures, *The First fib Congress 2002*, Session 8, V. 6, Japan Prestressed Concrete Engineering Association, Tokyo, 1-16.
- Goldman, A. ve Bentur, A., (1993). The influence of microfiller on enhancement of concrete strength, *Cement and Concrete Research*, **23**, 962-972.
- Neville, A.M. (1997), *Properties of Concrete*, John Wiley & Sons, Inc., London.
- Roumain, J.C. ve Sarkar, S.L. (2000). Cements of the 21<sup>st</sup> Century, *Second International Symposium on Cement and Concrete Technology in the 2000s*, 6-10 September, **1**, Istanbul, 43-57.
- Swamy, R.N. (2000) Holistic Design of Concrete Technology: The Only Route to Durability and Sustainability in Construction, *Second International Symposium on Cement and Concrete Technology in the 2000s*, 6-10 September, **1**, Istanbul, 58-72.
- Şengül, Ö., Taşdemir, M.A. ve Sönmez, R., (2003). Yüksek oranda uçucu kül içeren normal ve yüksek dayanımlı betonların klor geçirimsizliği, *Ulusal Beton Kongresi*, 1-3 Ekim, İstanbul, 75-86.
- Şengül, Ö., Taşdemir, C. ve Taşdemir, M.A. (2005) Mechanical properties and rapid chloride permeability of concretes with ground fly ash, *ACI Materials Journal*, **102**, 6, 414-421.
- Şengül, Ö. ve Gjörv, O.E., (2005). Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun betonda klor iyonu yayınına etkisi, *6. Ulusal Beton Kongresi*, 16-18 Kasım, İstanbul, 239-248.
- Tokuy, M. ve Erdoğan, K., (1997). *Cüruflar ve Cürufli Çimentolar*, Çimento Müstahsilleri Birliği, TÇMB / AR-GE/Y 97.2, 34.