

# Uçucu Kül İçeren, Silindirle Sıkıştırılabilen Betonların Özellikleri

Cengiz Duran ATIŞ

*Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü, 01330 Balcalı, Adana-TÜRKİYE*

Geliş Tarihi 05.07.2000

## Özet

Bu yazıda, ülkemizde fazla uygulaması bulunmayan çok düşük su-çimento oranı ile üretilen, pratik olarak sıfır çökmeye sahip olan silindirle sıkıştırılabilen beton türü ve uygulama alanları hakkında kısaca bilgi verilmiş, bu tür betonun su-bağlayıcı malzeme oranı belirlenmesinde sarsma çökmesi yöntemi tartışılmıştır. Beton yol kaplaması için yararlı olan silindirle sıkıştırılabilen betonun özelliklerini araştırmak üzere bir deneysel çalışma yapılmış, çalışmada uçucu kül içeren, silindirle sıkıştırılabilen betonun özellikleri ölçülmüştür. Burada sadece dayanım ile ilgili veriler sunulmuştur. Uçucu kül ile çimento miktarından tasarruf sağlanmıştır. Uçucu külün kızdırma kaybı, yer değiştirme oranı, ve kür koşullarının beton dayanım özellikleri üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Uygun uçucu kül kullanımı ile ağırlıkça %50 yer değiştirme oranında normal beton dayanımına eşdeğer dayanım geliştiren beton üretilebileceği ve ağırlıkça %70 yer değiştirme oranında ise oldukça doyurucu dayanım elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Kızdırma kaybının karışım suyu miktarını artırdığı ve dayanım kaybına neden olduğu gözlenmiştir. Uçucu kül içeren, silindirle sıkıştırılabilen betonun dayanım özellikleri arasındaki ilişkinin normal betonun ilişkisine benzediği sonucuna varılmıştır. İncelenen betonun, yol betonu olarak kullanılabilmesi kanaati oluşmuştur.

**Anahtar Sözcükler:** Uçucu kül, Silindirle sıkıştırılabilen beton, Dayanım, Kızdırma kaybı, Sarsma çökmesi deneyi

## Properties of Roller Compacted Concretes with Fly Ash

### Abstract

In this study, brief information on zero slump concrete, which is not in common use in Turkey, is given. Zero slump concrete, also known as roller compacted concrete (RCC), is produced at a very low water-binder ratio. The vibrating slump method for determining the water-binder ratio of RCC is discussed. A laboratory investigation is carried out to assess the properties of RCC, which is a cost-effective and an attractive material for pavements. The strength characteristics of the concrete studied are presented. In the investigation, two fly ashes are employed to provide savings on cement. The influences of loss on ignition and the replacement ratio of fly ash as well as curing condition on the properties of RCC containing fly ash are assessed. The results show that a fly ash concrete having a similar strength value to that of conventional concrete can be produced at a 50% (by mass) replacement of cement by fly ash, provided that the fly ash used complies with the relevant standards. Fly ash concrete can also be produced with satisfactory strength development at a 70% replacement ratio (by mass). Loss in ignition content of fly ash was found to increase the mixing water, thus resulting in a reduction in strength development. The relation between the strength characteristics of RCC containing fly ash was found to be similar to that of conventional concrete. Considering strength and other properties, it was concluded that the concrete studied can be used for road paving material.

**Key Words:** Fly ash, RCC, Strength, Loss on ignition, Vibrating slump test

## Giriş

Beton kaplama, genellikle trafiğin ağır olduğu ana yollarda kullanılır. Esnek kaplamayla karşılaştırıldığında ilk yapım masrafları oldukça yüksektir. Buna karşın oldukça uzun servis ömrüne sahiptir (Cronney ve Cronney, 1991). Rötreye, sıcaklık değişimi, ve yapım nedeniyle donatısız yol betonu kaplamasında derzler oluşturmak gerekmektedir. Derzlerin varlığı özellikle sürücüler ve yolcuları rahatsız eden bir gürültü kaynağıdır. Ancak, çelikle donatılmış sürekli betonarme kaplama, altyapı problemlerinin giderilmiş ve tekrar kazı yapma olasılığının az olduğu yerlerde derzsiz olarak yapılabilir. Beton yolun bir diğer sakıncası ise inşaatın uzun sürmesidir. Ancak, günümüzde hızlı yapım ve kısa sürede trafiğe açılım olanağı sağlayacak yeni bir beton türü ya da yapım yöntemi kullanılarak bu sakınca yok edilebilmektedir. Bu beton türü ya da yapım yöntemine silindirle sıkıştırılabilen beton ya da silindirle sıkıştırma tekniği denilmektedir.

Bu yazıda, yukarıda bahsedilen sakıncaları yok edecek ve beton yol kaplamasını çekici duruma getirebilecek olan silindirle sıkıştırılabilen beton hakkında kısaca bilgi verilip, silindirle sıkıştırılabilen betonun su içeriğini elde etmede sarsma çökmesi yöntemi tartışılmıştır. Uçucu külün beton karışımında kullanılması ekonomi ve çevre kirliliği yanında, betonun bazı özelliklerini iyileştirmesi açısından da önemli bir uygulama olması nedeniyle deneysel çalışmada çimento kısmen uçucu kül ile yer değiştirmiştir. Uçucu kül kızdırma kaybının su içeriği üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Laboratuvarında üretilen uçucu kül içeren silindirle sıkıştırılabilen betonun basınç, eğilme-çekme ve yarıma-çekme dayanımları ile bunlar arasındaki ilişkiler verilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır. Deneysel çalışma İngiltere'nin Leeds Üniversitesi laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, deney sonuçları yazarın doktora tezinden alınmıştır (Atiş, 1997).

## Silindirle Sıkıştırılabilen Beton

Silindirle sıkıştırılabilen beton, normal betona göre su içeriği çok az ve işlenebilirliği yok denecek (sıfır çökme) düzeyde olan ve taze durumda iken normal betondan çok zemin dolgu malzemesi gibi, katılaştığında ise normal beton gibi davranan bir malzemedir. Hansen'e (1996) göre, silindirle sıkıştırılabilen beton yeni bir malzemedir çok yeni

bir yapım yöntemidir.

Yol kaplaması ve beton ağırlık barajlarının yapımında başarı ile kullanılmış olan silindirle sıkıştırılabilen beton, çok geniş uygulama alanlarına sahiptir. Bu uygulama alanlarından bazıları, normal yollar, fabrika içi yollar, yapım için kullanılacak geçici yollar, park alanları, servis alanları, depo alanları, malzeme stok alanları, havaalanı pist ve ulaştırma yolları, ağır trafikle yüklü yollar ve ottoyolların temel ve kaplama tabakalarıdır (Anderson, 1984; Munn, 1984; Cannon, 1993; Corps of Engineers, 1994; Nanni ve arkadaşları, 1996; Pigeon ve Marchand, 1996; Hansen, 1996; Delagrave ve arkadaşları, 1997).

Ülkemizde silindirle sıkıştırılabilen beton uygulamaları fazla olmamakla birlikte, bu beton türü dünyanın birçok gelişmiş ülkesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, Japonya'da silindirle sıkıştırılabilen beton ile baraj yapımı incelemeleri, inşaat süresini kısaltmak ve yapım masraflarını azaltmak amacıyla 1974'lerde başlamıştır (Hirose ve Yanagida, 1984). Amerika'da ise silindirle sıkıştırılabilen betonun ağırlık tipi barajlarda kullanılması 1970'lerde incelenmiş olup, uygulamalara 1980'lerde başlanabilmektedir (Oliverson ve Richardson, 1984). İngiltere'de Proctor ve Lacey (1984), silindirle sıkıştırılabilen betonu Didcot enerji santralinde endüstriyel saha betonu olarak uçucu kül kullanımıyla birlikte başarı ile uygulamıştır.

Avustralya'da 1970'lerden beri hem rijit yol kaplaması hem de esnek yol kaplamasının temel kısmında başarı ile uygulanan silindirle sıkıştırılabilen beton, endüstriyel saha betonu ve tenis kortu saha betonu uygulamalarında da kullanılmıştır. Silindirle sıkıştırılabilen beton uygulaması esnek temel ile karşılaştırıldığında, rijitliğinden dolayı esnek yol kaplamasında oluşan deformasyonlarda azalmaya sebep olmuş ve bitümlü yüzey kaplaması bünyesinde oluşan gerilme ve birim uzamalar azalmış ve dolayısıyla kaplama kalınlığı azaltılabilmektedir. Silindirle sıkıştırılabilen betonun, geleneksel alt temel betonu ile karşılaştırıldığında daha az masraflı, düşük rötreye ve yüksek çekme birim deformasyon kapasitesine sahip, daha yoğun ve geçirimsiz olduğu belirtilmiştir (Munn, 1984).

Düşük su-çimento oranı ile çalışılmak durumu söz konusu olduğundan, silindirle sıkıştırılabilen betonun dayanım gelişmesi çok hızlı olmakta ve üç gün gibi kısa bir süre içinde oldukça yüksek

dayanım sağlamaktadır. Yol kaplaması olarak kullanıldığında yolun kısa sürede trafiğe açılmasını sağlamaktadır. Sabit su-çimento oranı için belli bir dayanımın sağlanması daha az çimento miktarı ile elde edilmekte, dolayısıyla karışımda daha az su ve çimento bulunması düşük rötreye sebep olduğu gibi karışım oldukça ekonomik olmaktadır. Rötreye kısılması küçük olduğundan, yolda bırakılacak derz sayısı azaltılabilmekte ve derzler arası açıklık artmaktadır (Munn, 1984; Hansen ve Reinhardt, 1991; Pittman ve Ragan, 1998).

Yüksek yoğunluk elde etmek için silindirle sıkıştırılabilen beton karışımında sürekli granula-metrikli agrega kullanılması, silindirle sıkıştırılabilen beton yüzeyinde düzgünlük elde etmek için ise ince agreganın ayarlanmasına ve miktarına özen gösterilmesi ve ince agrega miktarının normal betona göre bir miktar fazla olması gerektiği Schrader ve McKinnon (1984) ve diğer bir çok araştırmacı tarafından belirtilmiştir. Bu ise iki türlü sağlanabilmektedir, birincisi geleneksel olarak kum yüzdesini artırmak, ikincisi ise ince ve iri agreganın ya da çimentonun bir kısmının uçucu kül ya da benzeri mineral katkı ile yer değiştirmesidir. İnce agreganın fazlalığı, ikinci yol ile elde edildiğinde puzolanik özelliği olan bir malzemenin karışım içinde yer alması sağlanmış olur. Bu katkı hem işlenebilirlik açısından faydalı olmakta hem de karışımın daha ekonomik olmasını sağlamaktadır. Beton karışımı uygun tasarlandığında standartlara uymayan mineral katkılar karışımda kısmen agrega yerine kullanılabilceği gibi standartlara uygun mineral katkılar kısmen çimento yerine de kullanılabilir. Puzolanik özelliğe sahip atık bir malzeme olan çeltik kabuğu külleri de silindirle sıkıştırılabilen beton içerisine bir mineral katkı olarak kullanılmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır (Kajorncheappungam ve Stewart, 1992).

Silindirle sıkıştırılabilen beton taze durumda iken geleneksel betondan çok bir zemin dolgu malzemesi gibi davrandığından dolayı, bu beton ile yapılacak yol kaplamasının inşasında kullanılacak araçlar, asfalt kaplama ve zemin dolgu yapımında kullanılan araçların aynıdır. Özet olarak, silindirle sıkıştırılabilen betonun karıştırılma işi şantiyede yapılmakta ve uygulama alanına taşınması ise damperli kamyonlar ile sağlanmaktadır. Beton silindirlenmek üzere buldozer ile yere serilip, vibratörlü silindirler vasıtasıyla sıkıştırılır. Sıkıştırmadan sonra kalite kontrolü için nükleer yoğunluk ölçme cihazı ile yoğunluk ölçümü

yapılır. Ölçüm değerleri ile laboratuvar çalışmaları karşılaştırılarak kontrol edilir. Uygun olmayan durumlarda fazladan sıkıştırma uygulamak veya gerekli ise o malzemenin sökülüp atılması gibi önlemlere başvurulur. Silindirle sıkıştırılabilen betona daha sonra normal beton gibi kür uygulanır. Silindirle sıkıştırılabilen betonun taşınma, yerleştirilme, serilme ve sıkıştırılması ile ilgili ayrıntılı bilgiler, konu ile ilgili kaynaklarda detaylı olarak verilmektedir (Corps of Engineers, 1994; Demiröz ve Öztürk, 1998; Schrader ve McKinnon, 1984; Oliverson ve Richardson, 1984; Hansen ve Reinhardt, 1991).

### **Silindirle Sıkıştırılabilen Beton için Su Miktarının Belirlenmesi ve Sarsma çökmesi Yöntemi**

Silindirle sıkıştırılabilen betonda karışım suyu içeriğinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle su içeriğinin belirlenmesinde uygun yöntemi kullanmak gerekmektedir. Buna dikkat edilmediği takdirde beton özelliklerinde kayıplar oluşacaktır. Silindirle sıkıştırılabilen betonun karışım suyu içeriğinin belirlenmesi bilinen yöntemler (Çökme, Kely'nin Topu, Sarsma Tablası, Sıkıştırma Faktörü) ile yapılamamaktadır. Bu beton için kullanılan yöntemler aşağıda açıklanmaktadır.

Burada amaç, silindirle sıkıştırılabilen beton karışımına eklenecek minimum su miktarını, optimum su içeriği olarak bilinen su miktarı ile elde edilen maksimum sıkışılabilirliğin ölçümü ile belirlemektir.

Cabrera ve Lee (1985), sarsma çökmesi deneyini detaylı olarak başka bir yerde vermiştir. Burada yöntemin kısa bir özeti ve uygulamada kullanılan diğer yöntemlerin kısa bir değerlendirilmesi verilecektir.

### **Mevcut deney yöntemleri**

Silindirle sıkıştırılabilen betonun su içeriğini kontrolde yaygın olarak kullanılan iki deney yöntemi vardır. Bunlar, Cannon deneyi (Tennessee Valley Authority, 1975) ve sıkıştırılabilme indisi (Australian Standards, 1983). Cannon deneyini yürüten operatör tamamen eğitilmiş ve deneyimli olmadıkça Cannon deneyinin tekrarlanabilirliği oldukça zayıftır. Deney, V-B silindiri içine konulan beton karışımının V-B aparatında 25 sn sarsıldığında betonun silindire dokunduğu kenarları boyunca çimento hamuru ile temiz bir hale oluşturabilen, su içeriğini ölçmekten ibarettir. Su-çimento oranındaki

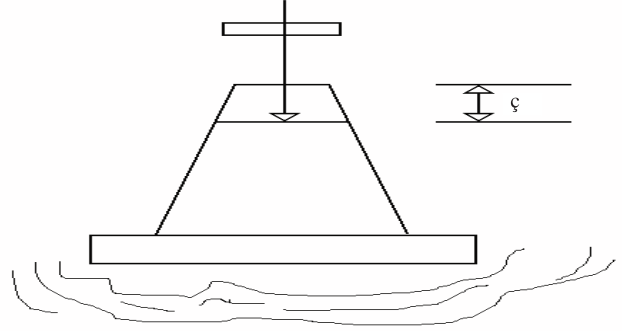
küçük değişimler dayanım ve performansta büyük farklılıklar oluşturduğundan dolayı su içeriği değeri kritiktir. Bu nedenle su içeriğinin belirlenmesinin sadece gözleme dayandırılması sakıncalıdır.

Sıkıştırılma indisi ise, bir silindire gevşekçe doldurulan betonun sıkıştırılması ile elde edilir. Silindire gevşekçe doldurulan beton 100 kez belli bir ağırlığın sabit yükseklikten düşürülmesiyle sıkıştırılır. Bu ağırlık ve yükseklik zemin mekaniğinde uygulanan proktor deneyinde kullanılanların aynıdır (TS1900, 1987). Sıkıştırılma indisi, gevşek olarak konulan beton yüksekliğinin (silindir yüksekliği), sıkıştırılmış betonun yüksekliğine bölümünün yüzde cinsinden ifadesi olarak tanımlanmaktadır. Bu deneyle bulunan optimum su içeriğinde sıkıştırılma indisi maksimum değerine ulaşır. Deneyin yürütülmesinde fazla enerji sarfedildiğinden uygulaması zordur. Yöntem, Avustralya'lı araştırmacılar tarafından kullanılmış, fakat Amerika ve Avrupa'da fazla ilgi görmemiştir.

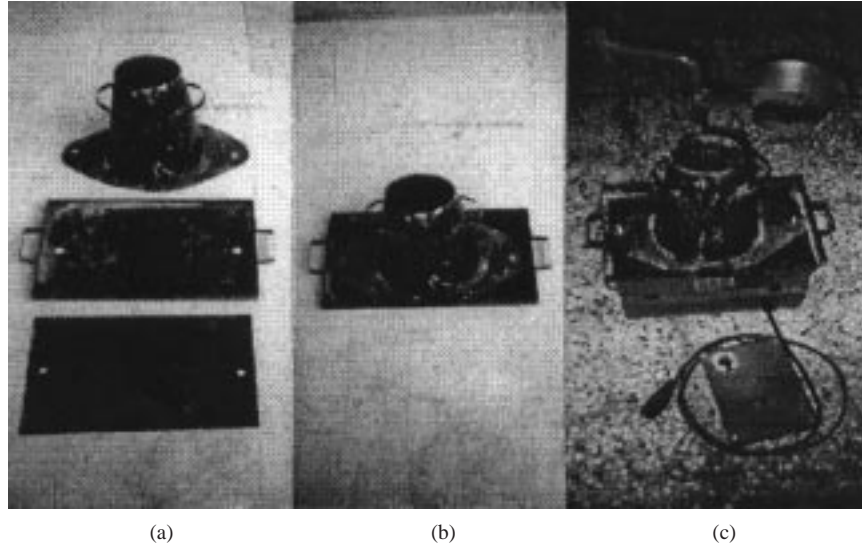
### Cabrera sarsma çökmesi deneyi

Cabrera ve Lee (1985) tarafından geliştirilmiş

olan bu deneyde, V-B için hazır olan araçlar biraz değiştirilerek kullanılmaktadır. Standart çökme konisinin ayak basma kısmı, V-B vibratörü üzerine kelebek vidayla sabitlenebilmesi için delinmiştir. Vibratör üzerine yerleştirilirken koni altına metal taban plakası yerleştirilmekte, koni ile taban plakası arasında lastik bir conta konulmaktadır. Aparat aşağıdaki şekillerde (Şekil 1-2) görülmektedir.



Şekil 1. Cabrera Çökmesinin Şematik Gösterimi



Şekil 2. Sarsma Çökmesi Deneyinde Kullanılan Aparatlar (a) Taban Plakası, Lastik Conta ve Koni (b) Koni ve Contanın Taban Plakasına Montesi (c) Koni ve Taban Plakası V-B Vibratörüne Sabitlenmiş Durumda

Bu deneyde, standart çökme deneyinde olduğu gibi denenecek beton karışımı ile doldurulan çökme konisi 20 sn V-B aparatında sarsılır. Sarsılma sonucu betonun yüksekliğindeki düşme mm cinsinden Cabrera çökme değeri (CÇD) olarak tanımlanır. Şekil 1 de CÇD'nin şematik görünüşü bulunmaktadır.

Herhangi bir karışım için Cabrera Sarsma Çökmesi (CŞÇ) deneyi en az beş su-çimento oranı için tekrarlanır. CÇD ile su-çimento oranının kartezyen koordinatlardaki grafiği maksimum sıkıştırılma için optimum su içeriğini verir.

## Deneysel Çalışma

### Kullanılan malzemeler ve özellikleri

**Çimento:** Bu çalışmada, TS19 (1992) ve BS12 (1996) standartlarına uygun normal Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Tablo 1-2 de verilmektedir.

**Uçucu kül:** Araştırmada kullanılan uçucu küller, İngiltere'nin Drax ve Aberthaw termik santralinden elde edilmiş olup, küllerin kimyasal bileşimleri ve fiziksel özellikleri Tablo 1-2 de verilmektedir. Küller ASTM C-618'e (1991) göre düşük kireçli olup, F sınıfına düşmektedir. Uçucu küllere ait tane boyutu dağılımları Şekil 3 te verilmektedir. Tablo 1-2 uçucu küllerin kızdırma kaybı ve incelik

bakımından farklı olduğunu göstermektedir. Drax uçucu külü TS639 (1975) ve BS 3892 (1992) standartları ile uyumludur. Ancak, Aberthaw külü bu standartlar ile uyumlu olmadığı gibi kızdırma kaybı bakımından Avrupa Standardına (EN 450, 1994) da uymamaktadır.

Uçucu külün içinde bulunan kızdırma kaybının optimum su içeriği üzerindeki etkilerinin görülmesi amacıyla fazla kızdırma kaybına sahip Aberthaw uçucu külü özellikle seçilmiştir.

**Agrega:** Beton karışımında kullanılan agrega, kırılmamış-temiz, kuvarsitik doğal agrega olup, maksimum tane çapı 10mm, görünen özgül ağırlığı kum ve iri agrega için 2,65 gr/cm<sup>3</sup> ve ağırlıkça su emme kum için %0,1, iri agrega için %0,6 dir. Tablo 3 de elek analizi sonuçları verilen agreganın tane dağılımı İngiliz standardı, BS 812'ye (1991) göre M bölgesine düşmüş olup, betonda kullanılmaya uygundur.

**Tablo 1.** Çimento ve Uçucu Kül Kimyasal Bileşimleri

Kimyasal Kompozisyon	PÇ %	Drax Uçucu Külü %	Aberthaw Uçucu Külü %
SiO <sub>2</sub>	20,77	50,20	44,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,93	28,59	25,20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,06	13,17	7,50
CaO	63,28	2,55	2,40
MgO	2,42	1,28	1,20
SO <sub>3</sub>	3,02	0,57	0,28
K <sub>2</sub> O	0,70	2,39	2,90
Na <sub>2</sub> O	0,28	0,98	1,00
Kızdırma Kaybı	0,81	2,85	15,60

**Tablo 2.** Çimento ve Uçucu Kül Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellik	PÇ	Drax Uçucu Külü	Aberthaw Uçucu Külü
Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	3,15	2,40	2,28
İncelik (45 µm elekte %kalan)	-	8,50	22,50
Blaine Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3500	3060	2870

### Beton karışım oranları ve numune hazırlama

Bu çalışmada kullanılan kontrol karışımı minimum boşluk oranı kriterine göre tasarlanmıştır (Cabrera ve Lee, 1985). PÇ ile üretilen kontrol karışımının oranları çimento, kum ve çakıl için 1:1,5:3 olup, çimento miktarı 408 kg/m<sup>3</sup> dir. Beton dayanımı üzerindeki etkilerin araştırılması amacıyla üretilen beton karışımlarında çimento %50 ve %70 oranlarında uçucu kül ile ağırlıkça yer değiştirmiştir.

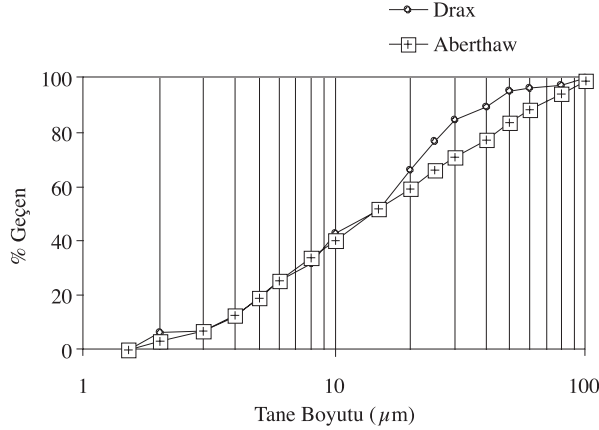
Kür koşullarının etkisinde araştırılması bağıl nem (BN) durumları farklı (%65 ve %100) sıcaklıkları aynı (20 ° C) iki kür koşulu seçilerek sağlanmıştır.

Üretilen betonlara ait karışım suyu miktarları maksimum sıkıştırılabilirlik için optimum su içeriğini veren CSCÇ deneyi ile bulunmuş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4-6 da gösterilmiştir. Tablo 4 de, üretilen ve test edilen betonların karışımında kullanılan malzeme miktarları verilmektedir.

**Tablo 3.** İnce ve Kaba Agrega Granulometrisi

Kum		
Elek çapı (mm)	(%) Geçen	BS812 Sınırları
10	100	100
5	95,95	89-100
2,36	86,7	60-100
1,18	81,11	30-100
0,6	34,99	15-100
0,3	9,36	5-70
0,15	1	0-15

Çakıl		
Elek çapı (mm)	(%) Geçen	BS 812 sınırları
14	100	100
10	85,15	85-100
5	2	0-25
2,36	0,5	0-5

**Şekil 3.** Uçucu Küllere ait Tane Boyutu Dağılımları

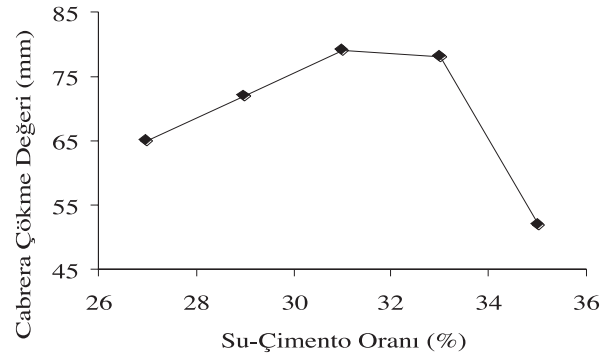
Burada M0 karışımı, bağlayıcı olarak sadece PÇ içeren kontrol ya da şahit betonu olup, diğer karışımların üretiminde baz olarak kullanılmıştır. M2 ve M4 karışımları Drax küllü kullanılarak üretilen betonlar olup, bu karışımlarda çimento sırasıyla %70 ve %50 oranında Drax uçucu küllü ile ağırlıkça yer değiştirmiştir. M6 ve M8 karışımları ise Aberthaw küllü kullanılarak üretilen betonlar olup, bu karışımlarda çimento sırasıyla %70 ve %50 oranında Aberthaw uçucu küllü ile ağırlıkça yer değiştirmiştir. Taze betonlarda terleme ve plastik rötire oluşmamıştır. Priz zamanları 2-5 saat arasında değişmiştir.

Beton basınç dayanımları bir kenarı 10cm olan küp numunelerden elde edilmiş olup, eğilme-çekme dayanımları 10x10x5 cm boyutlarındaki prizma numunelerden, yarılma çekme dayanımları ise çapı 15cm yüksekliği 30cm olan silindir numunelerden elde edilmiştir. Basınç ve eğilme-çekme dayanımları 1, 3, 7, 28gün, 3, 6ay ve 1 yıl sonunda alınmış olup, silindir yarma deneyi sonuçları sadece 7 ve 28 inci günlerde alınmıştır. Beton küp, silindir ve prizma numunelerin hazırlanması sarsma masası üzerinde sarsma ile gerçekleştirilmiştir.

## Sonuçlar ve Değerlendirme

### Optimum su-bağlayıcı malzeme oranı

Şekil 4 ve Şekil 5 de %50 ve %70 yer değiştirme oranı için, Drax uçucu küllüne ait optimum su içeriğinin PÇ ye ait optimum su içeriğinden daha az olduğu görülmektedir. Drax uçucu küllünün, daha az su içeriği ile maksimum sıkışılabilirlik sağladığı ve işlenebilirliği iyileştirdiği düşünülmektedir.

**Şekil 4.** Uçucu Kül İçermeyen Kontrol Betonun (M0) CÇD Su-Çimento Oranı İlişkisi

Şekil 5 ve Şekil 6 Drax ve Aberthaw uçucu küllü için elde edilen optimum su içeriklerinin oldukça farklı olduğunu göstermektedir. Maksimum çökme değerlerine karşılık gelen su-bağlayıcı malzeme oranı Drax küllü için 0,3 civarında iken Aberthaw küllü için 0,4 değerine varmıştır. Su-bağlayıcı malzeme oranındaki bu yükselmenin esas nedeninin Aberthaw küllünün kızdırma kaybının (%15,60) Drax küllünün kızdırma kaybından (%2,85) çok fazla olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuç başka araştırmacılar tarafında da belirtilmiş olup, örneğin, Mehta (1986) yanmamış karbondan oluşan kızdırma kaybının gözenekli yapısı nedeniyle karışım suyunun bir kısmını emdiği ve karışım için gerekli su içeriğini artırdığını belirtmiştir.

### Basınç ve çekme dayanımları

Üzerinde çalışılan betonlara ait basınç ve çekme dayanımları Şekil 7-8 de sunulmuştur. Ancak daha yakın bir gözlem yapabilmek amacıyla 3 ve 28 günlük basınç ve eğilme-çekme dayanımları çizelge olarak hazırlanmıştır (Tablo 5-6). Yarma çekme dayanımları ise Tablo 7 de verilmektedir.

Tablo 5 dan görüleceği üzere, uçucu külün

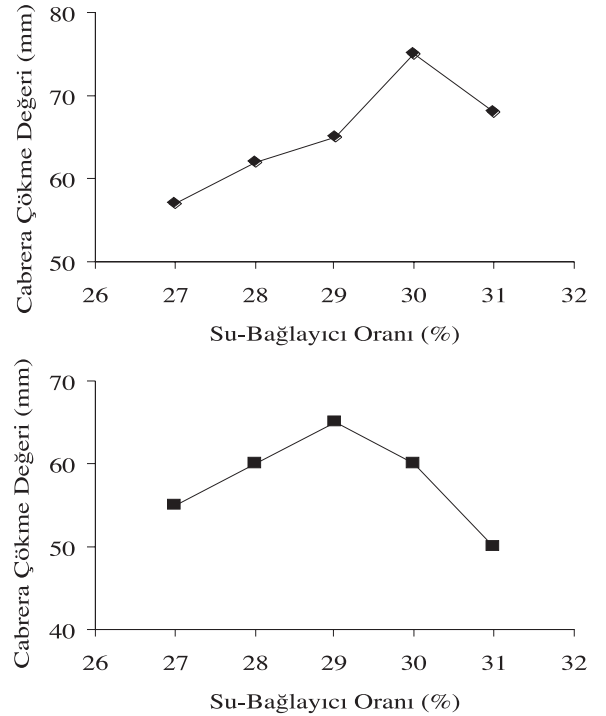
çimento ile %50 oranında yer değiştirdiği M4 ve M8 karışımlarının basınç dayanımlarının her iki kür durumunda da, 3 gün gibi kısa bir sürede 30 MPa civarına ulaştığı görülmektedir. Aynı karışımlar 28 günde 50-60 MPa basınç dayanımı geliştirmişlerdir. Drax uçucu külü ile üretilen M4 betonu her iki kür koşulunda da, M0 kontrol betonu karışımı ve Aberthaw külü içeren M8 karışımından daha yüksek basınç dayanımı geliştirmiştir.

**Tablo 4.** Bir Metre-küp Beton Karışımında Kullanılan Malzeme Miktarları

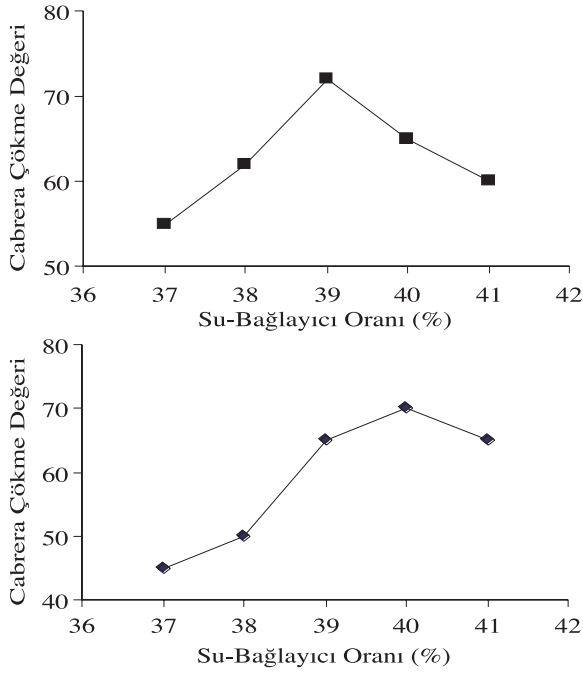
	Karışım No				
	M0	M2	M4	M6	M8
Ç (kg/m <sup>3</sup> )	408	121	201	116	195
UK (kg/m <sup>3</sup> )	-	282	201	271	195
Kum (kg/m <sup>3</sup> )	615	605	605	580	585
Çakıl (kg/m <sup>3</sup> )	1225	1210	1210	1162	1170
S (kg/m <sup>3</sup> )	131	117	120	155	152
Opt. S/(Ç+UK)	0,32	0,29	0,30	0,40	0,39
B. Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2380	2336	2333	2281	2300
Yer Değ. Oranı (%)	0	70	50	70	50

Yukarıda yapılan karşılaştırmalar eğilme-çekme dayanımı açısından da yapıldığında 3 günlük beton dayanımları için benzer sonuçlara ulaşılabilecektir. Buna ek olarak, M2, M4 ve M8 beton karışımlarının, her iki kür koşulu için de, 28 gün sonunda çok iyi eğilme-çekme dayanımı (>4Mpa) geliştirdikleri gözlenmektedir (bakınız Tablo 6). İngiliz havaalanı kurumu standartları, kullanılacak betonun 28 günlük eğilme-çekme dayanımını en az 4 MPa olarak sınırlandırmıştır (Calverley, 1977). M2, M4 ve M8 karışımlarının ilgili standart sınırını sağladığı ve ayrıca M6 karışımının ise bu değere yaklaştığı görülmektedir.

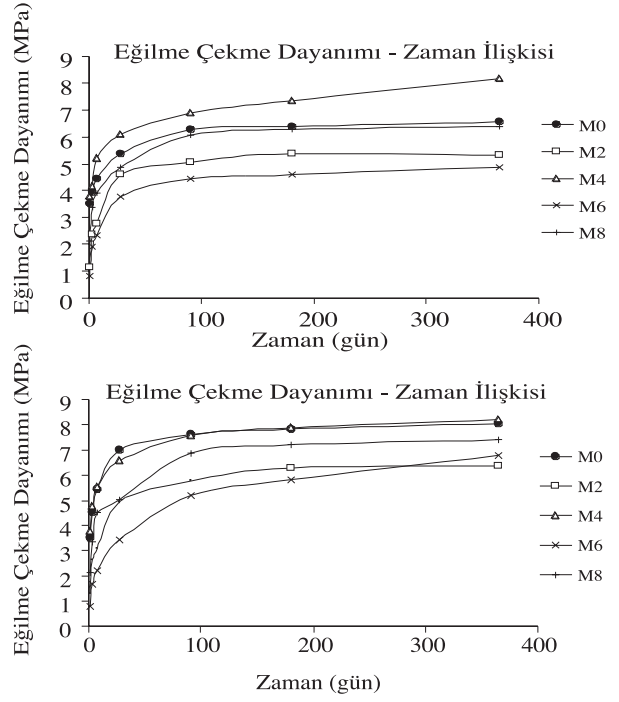
Tablo 7 incelendiğinde, yarıma-çekme dayanımları için de basınç ve eğilme dayanımları için varılan benzer sonuçlara varılmaktadır. İngiliz Ulaştırma standartları (Department of Transport, 1976), yol kaplamasında kullanılacak betonun 7 günde en az 1.85 MPa yarıma-çekme dayanımı geliştirmesini koşullandırmıştır. M4 ve M8 karışımlarının ilgili standart ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca, M2 karışımı ilgili standart sınırına çok yaklaşmış olup, 28 günde bu sınırın çok üzerine çıkmıştır.



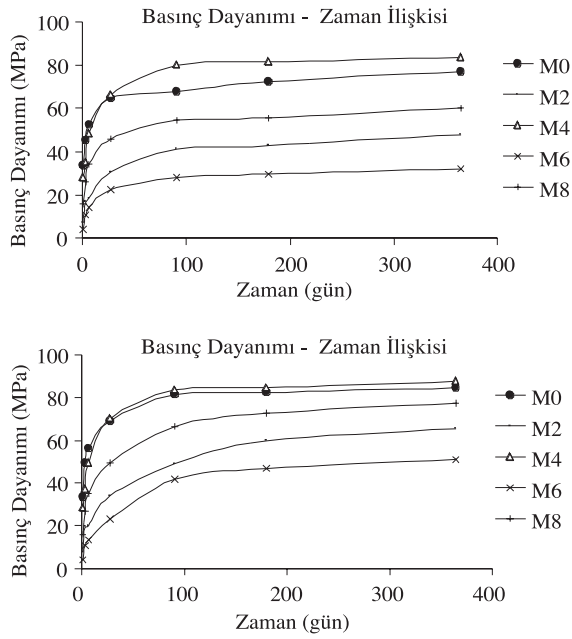
**Şekil 5.** Drax Uçucu Külü için CÇD Su-Bağlayıcı Malzeme Oranı İlişkisi (M4 ve M2)



Şekil 6. Aberthaw Uçucu Külü için CÇD Su-Bağlayıcı Malzeme Oranı İlişkisi (M8 ve M6)



Şekil 8. Beton Eğilme-Çekme Dayanımı Zaman İlişkisi Kür Durumu %65 ve %100 BN)



Şekil 7. Beton Basınç Dayanımı Zaman İlişkisi (Kür Durumu %65 ve %100 BN)

Çimento, uçucu kül ile %50 ve %70 gibi yüksek oranlarda ağırlıkça yer değiştirmiş olmasına rağmen, silindirle sıkıştırılabilen betonlara ait çekme ve basınç dayanımlarının oldukça yüksek çıkması, su-bağlayıcı malzeme oranlarının oldukça düşük olması ve kompasitenin ise bu su-bağlayıcı malzeme oranlarında maksimum değerine ulaşmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 7-8 ile Tablo 5-7 incelendiğinde, Aberthaw uçucu külü içeren betonların (M6 ve M8) dayanım özelliklerinin, Drax uçucu külü içeren betonların (M2 ve M4) dayanım özelliklerinden oldukça düşük olduğu gözlenecektir. Bu düşüşün esas nedeni yukarıda bahsi geçen optimum su-bağlayıcı malzeme oranı kısmından da anlaşılacağı üzere, su-bağlayıcı malzeme oranının değişiminden kaynaklanmaktadır. Bu ise çimento ya da mineral katkı malzemesi içinde bulunan kızdırma kaybı miktarının beton dayanım karakteristiklerini oldukça önemli mertebelerde etkileyebilmekte olduğunu göstermektedir.

Çalışmada gözönüne alınan kür koşullarının basınç ve çekme dayanımlarını fazla etkilemediği gözlenmiştir.



**Tablo 5.** Beton Basınç Dayanımları (3 ve 28 günlük)

	3 gün		28 gün	
	%65 BN	%100 BN	%65 BN	%100 BN
M0	45,27	49,44	64,95	69,12
M2	16,64	19,80	30,55	34,10
M4	35,30	36,90	66,55	70,30
M6	10,90	11,05	22,60	22,94
M8	26,14	26,55	45,85	49,60

**Tablo 6.** Beton Eğilme-Çekme Dayanımları (3 ve 28 günlük)

	3 gün		28 gün	
	%65 BN	%100 BN	%65 BN	%100 BN
M0	3,93	4,52	5,37	6,98
M2	2,56	2,63	4,60	4,92
M4	4,17	4,77	6,11	6,59
M6	1,90	1,66	3,78	3,43
M8	3,38	3,35	4,88	5,01

**Tablo 7.** Beton Silindir Yarıma-Çekme Dayanımları (7 ve 28 günlük)

	7 gün		28 gün	
	%65 BN	%100 BN	%65 BN	%100 BN
M0	2,96	3,26	3,48	3,94
M2	1,81	1,95	2,50	2,82
M4	3,32	3,47	4,20	4,58
M6	1,46	1,40	2,09	2,03
M8	2,75	2,64	3,45	3,68

### Dayanım özellikleri arasındaki ilişkiler

Betonun çekme dayanımları arasındaki ilişkiler ile çekme dayanımları ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiler, TS500 (TSE, 1984)'de aşağıdaki ifadelerle öngörülmektedir. Dayanım değerleri N/mm<sup>2</sup> cinsinden,

$f_{ctk}$ : betonun karakteristik çekme dayanımı,

$f_{ck}$ : betonun karakteristik silindir basınç dayanımı,

$f_{cts}$ : betonun silindir yarma çekme dayanımı,

$f_{cte}$ : betonun eğilme-çekme dayanımı olmak üzere,

$$f_{ctk} = 0,35 f_{ck}^{0,5} \quad (1)$$

$$f_{ctk} = f_{cts} / 1,5 \quad (2)$$

$$f_{ctk} = f_{cte} / 2 \quad (3)$$

ifadeleri ile verilmektedir.

Yukarıda verilen denklemlere göre,  $f_{cts}$  -  $f_{ck}$ ,  $f_{cte}$  -  $f_{ck}$ ,  $f_{cte}$  -  $f_{cts}$  arasındaki TS 500'ün öngördüğü ilişkiler aşağıdaki şekilde bulunur. Denklem (1) ve denklem (2)'nin eşitliğinden  $f_{cts}$  değeri  $f_{ck}$  ya bağlı ifade edilir, denklem (1) ve denklem (3)'ün eşitliğinden  $f_{cte}$  değeri  $f_{ck}$  ya bağlı ifade edilip, son olarak da denklem (2) ve denklem (3)'ün eşitliğinden  $f_{cte}$  değeri  $f_{cts}$  ye bağlı olarak yazıldığında aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$f_{cts} = 0,53 f_{ck}^{0,5} \quad (4)$$

$$f_{cte} = 0,70 f_{ck}^{0,5} \quad (5)$$

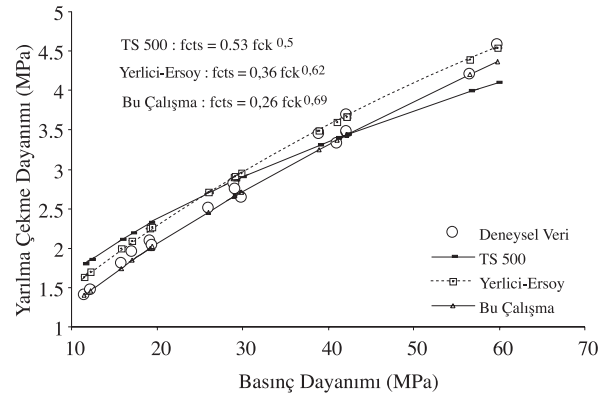
$$f_{cte} = 1,33 f_{cts} \quad (6)$$

TS500'ün öngördüğü ilişkilerde kullanılan basınç dayanımları silindir numunelerden elde edilen dayanımlar olup, bu çalışmada elde edilen beton basınç dayanımları küp numunelerden elde edilmiştir. Bu nedenle, küp numunelerden elde edilen dayanımlar, silindir dayanımlarının küp dayanımlarından ortalama %15 daha az olduğu varsayılarak, silindir basınç dayanımlarına çevrilmiş ve aşağıdaki grafiklerde kullanılmıştır. Ayrıca, dayanım özellikleri arasındaki ilişkiler incelenirken, yer değiştirme oranı, kür koşulu veya beton yaşı ile ilgili bir ayırım yapılmamış olup, sadece uçucu kül içeren silindirle sıkıştırılabilen betonlara ait değerler göz önüne alınmıştır.

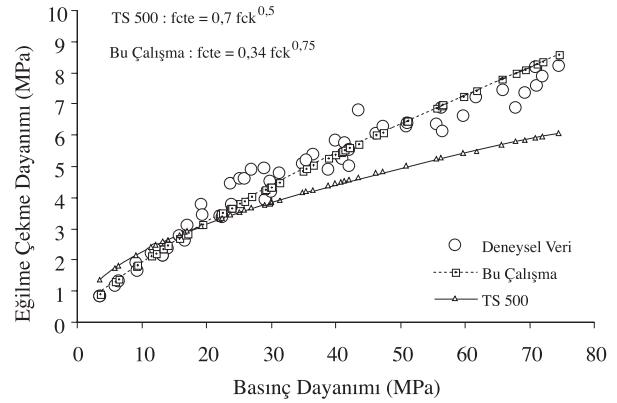
DeneySEL çalışma sonucu elde edilen, uçucu kül içeren silindirle sıkıştırılabilen betonun yarıлма-çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 9 de grafik olarak sunulmuş ve TS500'ün öngördüğü ilişkiyle uyumluluğu incelenmiştir. DeneySEL sonuçlar arasında istatistiksel olarak üstel bir ilişki bulunmuş olup, TS500'ün öngördüğü ilişki Şekil 9 üzerinde kıyaslanmıştır. Şekil 9 dan görüleceği gibi normal basınç dayanımı sınırları içerisinde (<40 MPa) deney sonuçları ile TS500'ün öngördüğü ilişki oldukça uyumludur. Fakat, yüksek dayanım sınırlarında (>40 MPa) deney sonuçları ve TS500'ün öngördüğü ilişki arasında fark oluşmaktadır. İlk bakışta bu durumun dayanımı incelenen betonların uçucu kül içermesinden kaynaklandığı kanaatine varılabilir. Ancak, uçucu kül içermeyen normal betonun dayanım ilişkileri için benzer bir durumla karşılaşan Yerlici ve Ersoy (1995) TS500'ün yarıлма çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasında öngördüğü ilişkinin (4 nolu ifade) normal dayanımlı betonlar için gerçekçi değerler verdiğini, ancak yüksek dayanımlı betonlar için gerçek durumu iyi yansıtamadığını belirtmiştir. Yazarlar, hem normal dayanımlı betonlar için geçerli olan, hem de yüksek dayanımlı betonlar için gerçek durumu TS500'ün öngördüğü ilişki'den daha iyi yansıtacak yeni bir ilişki vermiştir. Bu ilişki Şekil 9 üzerinde kıyaslanmış olup, uçucu kül içeren silindirle sıkıştırılabilen betonun yarıлма çekme dayanımının, basınç dayanımı arasındaki ilişkinin normal betonlar için geçerli olan ilişkiye benzediği sonucuna varılmıştır.

Benzer şekilde, üretilen silindirle sıkıştırılabilen beton numunelerinin eğilme-çekme dayanımları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki incelenirken, TS500'ün öngördüğü ilişkiyle (5 nolu ifade) uyumluluğu da araştırılmıştır. Eğilme-çekme dayanımı ve

basınç dayanımı değerleri Şekil 10 da grafik olarak elde edilmiştir. Eğilme-çekme dayanımı ve basınç dayanımı arasında istatistiksel olarak üstel bir ilişki elde edilmiş olup, TS500'ün öngördüğü ilişki de aynı grafik üzerinde kıyaslanmıştır. Şekil 10 üzerinde yapılan incelemeden görüleceği gibi, uçucu kül içeren silindirle sıkıştırılabilen betonun dayanımları arasındaki ilişkiler, normal beton için geçerli olan ilişkilere oldukça yakın görülmektedir. Yukarıda yarıлма çekme dayanımı ve basınç dayanımı arasında görüldüğü ve Yerlici ve Ersoy'un (1995) belirttiği gibi, burada da, TS500'ün öngördüğü ilişki normal dayanım sınırlarında (<40MPa) geçerli olmakta ise de yüksek dayanım sınırları içinde (>40 MPa) bu geçerliliğin azaldığı görülmektedir.



Şekil 9. Yarıлма-Çekme dayanımı ve basınç dayanımı ilişkisi

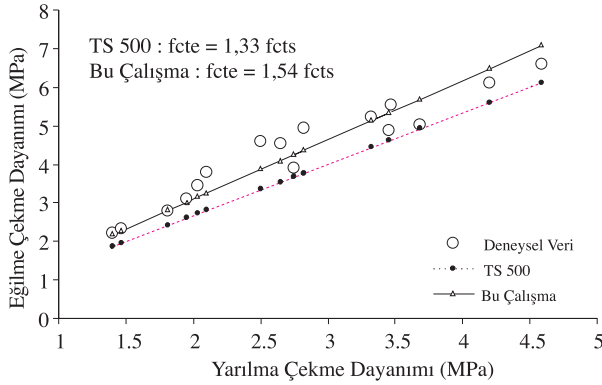


Şekil 10. Eğilme-Çekme dayanımı ve basınç dayanımı ilişkisi

Uçucu kül içeren silindirle sıkıştırılabilen beton numunelerinin eğilme-çekme dayanımları ile yarıлма-çekme dayanımları arasındaki ilişki incelenmiş ve

TS500 ün öngördüğü (6 nolu ifade) ilişkiyle uyumluluğu da araştırılmıştır. Eğilme-çekme dayanımı ve yarıлма-çekme dayanım değerleri grafik olarak (Şekil 11) elde edilmiş, aralarında istatistiksel olarak doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür, kıyaslama amacıyla TS500'ün öngördüğü ilişki (6 nolu ifade) de Şekil 11 üzerinde gösterilmiştir.

Şekil 11, uçucu kül içeren silindire sıkıştırılabilen betonun yarıлма çekme dayanımı ile eğilme-çekme dayanımı arasındaki ilişkinin doğrusala yakın bir ilişki olduğunu ve ilişkinin normal beton için geçerli olan ilişkiye benzediğini göstermektedir.



Şekil 11. Eğilme-Çekme dayanımı ve yarıлма-çekme dayanımı ilişkisi

### Diğer özellikler, çevre kirliliği ve ekonomi

Yukarıda dayanım özellikleri tartışılan betonlara ait, burada verilmeyen, diğer bazı özellikleri de ölçülmüştür. Bu özelliklerden bazıları kuruma rötresi, hidrasyon ısı ve aşınma değerleridir. Atış ve Akçaözoglu üzerinde çalışılan betonların kuruma rötresinin geleneksel PÇ betonu rötresinden daha düşük olduğunu bir başka yerde belirtmiştir. Hidrasyon ısı da uçucu külün çimento ile kısmen yer değiştirmesi sonucu çok az yükselmiştir (Atış (a), 2000). Bunlara ek olarak, uçucu kül içeren betonların, belli bir dayanım değerinin üzerinde, aşınmaya karşı PÇ betondan daha dayanıklı oldukları da belirtilmiştir (Atış (b), 2000).

Bilindiği üzere, çimentonun üretiminde iki ana ham madde kullanılmaktadır. Bunlar kil ve kalkerdir. Bu maddeler, yüksek sıcaklığa sahip döner fırınlarda ısıl işleminden geçerler. Kalker bu esnada CaO ve CO<sub>2</sub> bileşenlerine ayrılır ve dolayısıyla atmosfer ortamına CO<sub>2</sub> katkısında bulunur. Dünya'daki toplam çimento üretiminin dünya atmosferinin CO<sub>2</sub> emisyonuna katkısının

%10 civarında olduğu bilinmektedir. Uçucu kül endüstriyel atık bir malzeme olup, uygun bir şekilde depolanması gerekmektedir. Uçucu külün çimento ile yer değiştirmesi, çimento kullanımını ihtiyacı bir miktar azaltacak dolayısı ile CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltılabilecektir. Böylece, endüstriyel atık malzeme olan uçucu külün de depolanma sorunu azalacaktır (Mehta, 1983; Malhotra, 1993).

### Sonuçlar

1. Uçucu kül içeren ve silindire sıkıştırılabilen beton numuneleri erken yaşta oldukça yüksek ya da yeterli dayanım gelişmesi göstermektedir.
2. Uçucu kül içeren ve silindire sıkıştırılabilen betonun dayanım özellikleri arasındaki ilişki normal betonun ilişkisine benzemektedir.
3. Çimentonun %50 oranında uçucu kül ile yer değiştirmesi sonucunda, PÇ betonunun dayanımına eşdeğer ya da daha yüksek dayanım elde etmek olası görülmektedir.
4. İki uçucu külün kullanımıyla üretilen betonlar, çimentonun %70 gibi çok yüksek oranda yer değiştirmesi sonucunda dahi, oldukça doyurucu dayanımlar göstermişlerdir.
5. Standartlara uygun olmayan Aberthaw uçucu külü ya da benzeri endüstriyel mineral atıkların uygun tasarım yöntemi ile çimento ile kısmen yer değiştirebileceği izlenimi oluşmuştur.
6. Uçucu kül içeriğinde bulunan kızdırma kaybının karışım suyu miktarını artırdığı dolayısıyla beton performansında kayıplar oluşturduğu sonucuna varılmıştır.
7. Silindire sıkıştırılabilen beton uçucu kül kullanımı ile oldukça ekonomik olarak elde edilebilmektedir.
8. Uçucu külün çimento ile kısmen yer değiştirmesi, çevre ve ekonomi açısından da önemlidir.
9. Beton yol kaplaması olarak kullanıldığında önem taşıyan rötre, aşınma ve hidrasyon ısı özellikleri de üzerinde çalışılan betonların yol kaplamasında kullanılabileceğini göstermektedir.
10. Yukarıda sıralanan sonuçlara dayanarak, uçucu kül içeren silindire sıkıştırılabilen betonun, yol

kaplaması ya da yol kaplaması temelinde kullanılabilir uygun bir malzeme olacağı kanaatine varılmıştır.

### Kısaltmalar

RCC : Roller Compacted Concrete,  
 CSÇ : Cabrera Sarsma Çökmesi,  
 CÇD : Cabrera Çökme Değeri,

PÇ : Portland Çimentosu,  
 Ç : Çimento,  
 S : Su,  
 BN : Bağıl Nem,  
 $f_{ctk}$  : Betonun Karakteristik Çekme Dayanımı,  
 $f_{ck}$  : Betonun Karakteristik Silindir Basınç Dayanımı,  
 $f_{cts}$  : Betonun Silindir Yarma Çekme Dayanımı,  
 $f_{cte}$  : Betonun Eğilme Çekme Dayanımı.

### Kaynaklar

Anderson, F. A., "RCC Does More", Concrete International, 6(5), 35-37, 1984.

ASTM C-618, Standard Specification for Fly Ash and Raw Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standard, 1991.

Atiş, C. D., "Design and Properties of High Volume Fly Ash Concrete for Pavements", Doktora Tezi, Leeds Üniversitesi, İngiltere, 1997.

Atiş, C. D., Akçaözöğlü, K., "Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Betonun Rötresi", Anadolu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi, (Basılmak üzere kabul edildi.)

Atiş, C. D.(a), "Heat Evolution and Drying Shrinkage of Concrete Containing High Volume Fly Ash", Proceedings of II International Symposium On Cement And Concrete Technology in The 2000s, 359-369, September 6-10, Istanbul, Turkey, 2000.

Atiş, C. D.(b), "Yüksek Oranda Uçucu Kül Kullanımı İle Üretilen Betonun Aşınma Direnci", İMO Teknik Dergi, Yazı 154, 11(4), 2217-2230, 2000.

Australian Standards, As-1012, Part 3, "Methods for the Determination of Properties Related to the Consistency of Concrete", Standard Ass. from Australia, NSW, 1983.

British Standard Institution, BS812, Part 1, Testing Aggregates, Sampling, Shape, Size and Classification, London, 1991.

British Standard Institution, BS12, Specification for Portland Cement, BSI, London, 1996.

British Standard Institution, BS3892, Specification for Pulverized-Fuel Ash for Use with Portland Cement, London, 1992.

Cabrera, J. G. and Lee, R. E., "A New Method for the Measurement of Workability of High Pulverised Fuel Ash Concrete", Proc. of 7<sup>th</sup> Intern. Ash Utilisation Symposium, 1, 347-360, 1985.

Calverley, M. A. A., "The Design of British Airport Authority Pavements", Int. Conference on Concrete Pavement Design, Feb.15-17, Purdue University, USA, 97-106, 1977.

Cannon, R. W., "Air-Entrained Roller Compacted Concrete", Concrete International, 15(5), 49-54, 1993.

Corps of Engineers, Roller Compacted Concrete, ASCE Pubs, ISBN 0-87262-999-6, 1994.

Croney, D. and Croney, P., The Design And Performance Of Road Pavements, Second Edition, McGraw Hill Book Company, ISBN 0-07-707408-4, London, 1991.

Delagrave, A., Marchand, J., Pigeon, M., Boisvert, J., "Deicer Salt Scaling Resistance of Roller Compacted Concrete Pavements", ACI Materials Journal, 96(2), 164-169. 1997.

Demiröz, E. ve Öztürk, A., Silindirle Sıkıştırılmış Beton Baraj Tasarım ve İnşa Esasları, DSI Genel Müdürlüğü, Ankara, 1998.

Department of Transport, "Specification for Road and Bridge Works", H. M. Stationery Office, London, 69-70, 1976.

European Standards, EN 450, Fly Ash for Concrete – Definitions, Requirements and Quality Control, EN Brussels, 1994.

Hansen K. D., "Roller Compacted Concrete: A Civil Engineering Innovation", Concrete International, 18(3), 49-53, 1996.

Hansen, K. D. and Reinhardt, W. G., Roller-Compacted Concrete Dams, McGraw Hill Inc. Publication, ISBN 0-07-026072-9, Newyork, 1991.

Hirose, T. and Yanagida, T., "Dam Construction in Japan: Burst of Growth Demands Speed Economy", Concrete International, 6(5), 14-19, 1984.

Kajorncheappunngam, S. and Steawart D. F., "Rice Husk Ash in Roller Compacted Cooncrete", Concrete International, 14(4), 38-44, 1992.

Malhotra, V. M., "Fly Ash, Silica Fume and Rice-Husk Ash in Concrete: A Review", Concrete International, 15(4), 23-28, 1993.

- Mehta, P. K., "Pozzolanic and Cementitious By-Products as Mineral Admixtures for Concrete – A Critical Review", Proc. of 1<sup>st</sup> Intern. Conf. on the use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and other mineral by-products in Concrete, Canada, Montebello, July 31-August 5, Editor. V. M. Malhotra; ACI SP-79, Detroit, 1-48, 1983.
- Mehta, P. K., Concrete: Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, Inc. Englewood, New Jersey, ISBN 0-13-167115-4 01, 1986.
- Munn, R. L., "Fly Ash in Roller Compacted Concrete Pavement and Slipformed Applications", 2<sup>nd</sup> Intern. Conf. on Ash Technology and Marketing, September, London, 445-460, 1984.
- Nanni, A., Ludwig, D., Shoenberger, J., "Roller Compacted Concrete for Highway Pavements", Concrete International, 18(5), 33-38, 1996.
- Oliverson, J. E. and Richardson, A. T., "Upper Stillwaterdam Design and Construction Concept", Concrete International, 6(5), 20-28, 1984.
- Pigeon, M. and Marchand, J., "Frost Resistance of Roller-Compacted Concrete", Concrete International, 18(7), 22-26, 1996.
- Pittman, D. W. and Ragan, S. A., "Drying Shrinkage of Roller-Compacted Concrete For Pavement Applications", ACI Materials Journal, 95(1), 19-25, 1998.
- Proctor, R. T. and Lacey R. A. C., "The Development of High Fly Ash Content Concrete at Didcot Power Station", 2<sup>nd</sup> Second Intern. Conf. on Ash Technology and Marketing, September, London, 461-467, 1984.
- Schrader, E. and McKinnon, R., "Construction of Willow Creek Dam", Concrete International, 6(5), 38-45, 1984.
- Tennessee Valley Authority, General Construction Specification G-48, Roller Compacted Concrete, Appendix B-Procedure for Measuring Consistency of No Slump Concrete, Knoxville, Tennessee, USA, 1975.
- Türk Standartları Enstitüsü, TS500, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Ankara, TSE, 1984.
- Türk Standartları Enstitüsü, TS1900, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Labratuvar Deneyleri, Ankara, TSE, 1987.
- Türk Standartları Enstitüsü, TS639, Uçucu Küller, Ankara, TSE, 1975.
- Türk Standartları Enstitüsü, TS19, Çimento-Portland Çimentoları, Ankara, TSE, 1992.
- Yerlici, V. ve Ersoy, U., "Betonun Çekme Ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki", İMO Teknik Dergi, Yazı 81, 1059-1062, 1995.