



ISSN:1306-3111

e-Journal of New World Sciences Academy
2010, Volume: 5, Number: 3, Article Number: 1A0100

ENGINEERING SCIENCES

Received: June 2009
Accepted: July 2010
Series : 1A
ISSN : 1308-7231
© 2010 www.newwsa.com

Serkan Subaşı
Mustafa Çullu
Hakan Bolat
Mehmet Emiroğlu
Mürsel Erdal
Duzce University
serkansubasi@duzce.edu.tr
Duzce-Turkey

**UÇUCU KÜL İKAMELİ BETONLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN TAHRİBATSIZ
TEST YÖNTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ**

ÖZET

Bu çalışmada, Orhaneli termik santralinden elde edilmiş uçucu küller, beton içerisine çimento ağırlığının %0-30 oranlarında ikame edilerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan beton karışımlarından 15 adet 15x15x15 cm ebadında küp numune üretilmiştir. 28 günlük kür işlemi ardından, beton numuneler üzerinde beton yüzey sertliği, pull-off direk çekme deneyi, ultrases geçiş hızı deneyi ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu tahribatsız test metodu sonuçları kullanılarak çeşitli ampirik formüller ile beton basınç dayanımı değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan beton basınç dayanımı değerleri ile gerçek beton basınç dayanımı değerleri istatistiksel yöntemler kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Beton, Uçucu Kül, Tahribatsız Test Yöntemleri, Mühendislik Özellikleri, Basınç Dayanımı

**INVESTIGATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF FLY ASH SUBSTITUTED
CONCRETE WITH NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS**

ABSTRACT

In this study, test specimens were prepared using fly ash obtained from Orhaneli thermal power plant in the rates of 0-30%. Twelve numbers of cubic samples having 15x15x15 cm dimensions were obtained from the concrete mixes. Surface hardness, pull-off tensile strength test, ultrasonic pulse velocity test and compressive strength tests were performed on the concrete samples after the 28th days cure conditions. According to the non-destructive test results, concrete compressive strength values were calculated by using various empirical equations. Calculated compressive strength values and the experimental compressive strength values were compared with each other using statistical methods.

Keywords: Concrete, Fly Ash, Non-Destructive Test Methods, Engineering Properties, Compressive Strength.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Uçucu kül, termik santrallerde elektrik üretimi sırasında kömürün yanması sonucu baca çıkışlarında elektro filtreler yardımıyla tutulan, uçabilen, çok ince taneli ve atık bir malzemedir. Uçucu küller, ASTM C 618'e göre F (Düşük kireçli) ve C (Yüksek kireçli) sınıfı olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Ülkemizde açığa çıkan uçucu küllerin büyük bölümü yüksek kireç içeriklidir ve uçucu kül özellikleri santralden santrale, hatta aynı santralde zamana bağlı olarak büyük değişiklikler gösterebilmektedir [1, 2, 3, 4 ve 5]. F sınıfı uçucu küller, küresel yapıları nedeniyle, betonun işlenebilme özelliğini iyileştirmekte, taze betonda su kusmayı (terleme) azaltmakta, betonun hidrasyonu ısısını azaltarak sıcak havalarda kütle betonu dökümüne imkân tanımakta, puzolanik reaksiyonu sayesinde betonun uzun dönemli mukavemetine katkıda bulunmakta, betonun geçirimsizliğini azaltmakta ve betonun iç ve dış kaynaklı yıpratıcı etkilere dayanıklılığını arttırmaktadır. Bu yararlı özellikleri, uçucu külün beton üretiminde yaygın olarak kullanımına ve araştırmaların bu konu üzerinde yoğunlaşmasına yol açmıştır [1, 6, 7 ve 8]. Buna karşılık, uçucu kül betonun erken dayanımını düşürebilmekte ve özellikle yüksek kireç içerikli (C sınıfı) uçucu külün betonda yüksek oranda kullanımı ise betonun hacim sabitliğinin bozulmasına yol açabilmektedir [9]. Araştırmacılar tarafından beton içerisinde yüksek oranda C sınıfı uçucu kül kullanımının betonun hacim sabitliğinin bozulmasına yol açtığı bildirilmiştir [6, 10 ve 11].

Çimento veya uçucu külde bulunan serbest kireç, yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldığında beton içinde çok yavaş ve uzun sürede hidrate olabilmektedir [12]. Bazı araştırmacıların uçucu küllerin beton özelliklerine etkileri üzerine yaptıkları çalışmalarda, uçucu kül katkılı betonlarda geçirimsizliğinin katkısız betonlarınkinden daha az olduğu ifade edilmiştir [13].

Ülkemizdeki mevcut yapıların çok büyük bir çoğunluğunu betonarme yapılar oluşturmakta ve bu yapılarda deprem gibi etkilerden dolayı oluşan sorunlara sık sık rastlanmaktadır. Ortaya çıkan yapısal problemlerin esas kaynağını beton kalitesindeki düşüklük oluşturmaktadır. Yapılardaki beton kalitesinin tespitinde; ülkemizde ve diğer ülkelerde önerilen değişik yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler arasında karot alma, beton tabancası ile yüzey sertliği okuma, çekip çıkarma, ultra ses hızı ölçme vb. sayılabilir [1, 2, 3, 14, 15 ve 16]. Tahribatsız test metotları, yapıların gerek yapım kusurlarını, gerekse geometrik ve kompozisyon özelliklerini, yapı elemanına zarar vermeden araştırılması esasına dayanır [15]. Tahribatsız test metotları, iki temel gruba ayrılabilir. Birinci grup; ses ve ultrasonik ses deneyleridir. Bu deneyler, rezonans frekansının ve ses geçiş hızının belirlenmesine dayanmaktadır. Betonun kalınlığını, içerisindeki boşlukları ve çatlakları belirlemede kullanılan gerilme dalga deneyleri de, bu kategoriye konabilir. İkinci gruptaki deneyler, betonun dayanımını belirlemede kullanılır. Bu deneylerde, yüzey sertliği (Schmidt çekici), çekme (Pull-off), kırma, olgunluk ve birleştirilmiş metotları içerir. Bu metotların bazıları, tamamıyla tahribatsız değildir ve beton yüzeyinde önemsiz sayılabilecek bir miktar zarara yol açarlar [16 ve 17].

Özellikle Marmara Bölgesinde meydana gelen depremlerden sonra hasar gören ya da görmeyen yapıların mevcut durumu önem kazanmış, bu sebeple yapılarda kullanılan malzeme kalitesinin belirlenmesi amacı ile pek çok deneysel çalışma yapılmıştır. Yapıdaki beton dayanımı yıkıntısız (örselemeyen) yöntemler kullanılarak ya da karot alınarak saptanabilir. Ancak, beton ile ilgili bir kuşku varsa kesinlikle karot alınması gerekmektedir. Karot alma ve deneme zor ve pahalı bir operasyon olduğundan ve yapı elemanlarında zayıflamaya yol

açabileceğinden, karot sayısının kısıtlı olması kaçınılmaz bir zorunluluktur [18].

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Tahribatsız deney metotlarından olan ultrases hızı, beton yüzey sertliği ve pull-off deneyleri ile betonların basınç dayanımları hakkında bilgi sağlanmaktadır. Literatürde bu tahribatsız yöntemlerin her biri tek başına ya da birlikte kullanılarak önerilen ampirik formüller yardımıyla beton basınç dayanımı tahmini yapılmaktadır. Ancak tüm bu ampirik formüllerin normal beton için verilmiş olmaları nedeniyle, uçucu kül ikameli betonların basınç dayanımlarının tahmininde ne kadar güvenle kullanılacağı açık değildir. Bu nedenle, çalışmada uçucu kül katkılı betonların basınç dayanımlarının tahmininde literatürde yer alan ampirik formüller ile bu çalışmada önerilen yeni ampirik formüller birbiri ile karşılaştırılarak, uçucu kül ikameli betonların basınç dayanımları tahmin edilmiştir.

3. DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

3.1. Materyal (Materials)

- **Çimento (Cement):** Bu çalışmada, Lafarge Çimento Fabrikası üretimi olan CEM II 42,5 R Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri
(Table 1. Physical, chemical and mechanical properties of cement)

Kimyasal Özellikleri	
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0.38
MgO (%)	2.41
SO ₃ (%)	2.30
K ₂ O (%)	0.55
Kızdırma kaybı (%)	2.72
Cl ⁻ (%)	0.01
Serbest CaO (%)	0.74
C ₃ A (%)	-
2C ₃ A+C ₄ AF (%)	-
Fiziksel Özellikleri	
Özgül ağırlık (gr/ cm ³)	3.10
Özgül yüzey (cm ² / gr)	4280
Su/ çimento oranı (%)	28.0
Priz başlangıcı (dakika)	200
Priz sonu (dakika)	240
Hacim genleşmesi (mm)	0.5
Mekanik Özellikleri	
2 günlük basınç dayanımı (N/mm ²)	30.3
7 günlük basınç dayanımı (N/mm ²)	45.4
28 günlük basınç dayanımı (N/mm ²)	55.8

- **Uçucu kül (Fly ash):** Orhaneli termik santralinden temin edilen F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Uçucu külün kimyasal analiz sonuçları
(Table 2. Chemical analysis results of fly ash)

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	KK	Cl ⁻	S+A+F
(%)	48,53	24,61	7,59	9,48	2,28	2,48	2,51	0,35	1,69	0,005	80,73

- **Agrega (Aggregate):** Küçük Melen deresinden temin edilen ve Kırma Çakıl Kumu, 0-5 Kırma Kum, Kırma Çakıl (5-15 mm çaplı) ve Kırma

Çakıl (15-25 mm çaplı) üç farklı boyutta kırılmış agregalar kullanılmıştır.

- **Karışım suyu (Water):** Yapılan bu deneysel çalışmada Düzce İline ait şehir içme suyu kullanılmıştır. Deneyde kullanılan karışım suyu için herhangi bir analiz işlemi yapılmamıştır.

3.2. Metot (Method)

3.2.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması (Preparing of the Test Specimens)

Numuneler hazırlanırken karışım içerisinde %0, %5, %10, %20 ve %30 oranlarında Orhaneli termik santralinden temin edilen F sınıfı uçucu kül ikame edilmiş ve beton karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlarda su/bağlayıcı oranı sabit tutulmuştur. Hazırlanan 5 farklı beton karışımından 15 adet 15x15x15 cm ebadında küp numune üretilmiştir. TS 802'ye göre beton karışım hesabı yapılmıştır [19]. Su/bağlayıcı madde oranı sabit tutulmuş 1 m³ beton için karışım miktarı Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Karışım oranları (1 m³)
(Table 3. Mix design) (1 m³)

U. Kül İkame Oranı	Çim. (kg)	UK (kg)	Su (kg)	Kum (kg) (0-5)	Agr.1 (kg) (5-15)	Agr.2 (kg) (15-25)	S/Ç
% 0	300	0	180	1028	421	421	0,6
% 5	285	15	180	1028	421	421	0,6
% 10	270	30	180	1028	421	421	0,6
% 20	240	60	180	1028	421	421	0,6
% 30	210	90	180	1028	421	421	0,6

3.2.2. Schmidt Çekici İle Beton Yüzey Sertliğinin Belirlenmesi (Determining of Compressive Strength of Concrete by Using Schmidt Hammer)

Schmidt çekici ile beton yüzey sertliği ölçümleri TS 3260 Standardına göre yapılmıştır [20]. Deneyde N tipi Schmidt çekici kullanılmıştır. Hazırlanan %0, %5, %10, %20, %30 uçucu kül ikameli numuneler 28 günlük kür uygulamasına tabi tutulduktan sonra, 3'er numune üzerinde yüzey sertliği ölçümleri yapılmıştır. Her bir numune üzerinde kuru halde (105±5°C'lik etüvde 24 saat bekletildikten sonra) 25'er okuma gerçekleştirilmiştir.

3.2.3. Pull - Off Test Yöntemi (Pull-Off Test Methods)

Hazırlanan %0, %5, %10, %20, %30 uçucu kül ikameli 3'er numune üzerinde 28 günlük kür uygulaması ardından pull-off deneyi uygulanmıştır. Her bir numune, 105±5°C'lik etüvde 24 saat bekletildikten sonra, uygulanacak yüzeyi zımparalanarak epoksi reçinesi ile 5 cm çapındaki silindir disk numuneye yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemi sonrası, epoksi reçinesi mukavemetini alması beklenmiştir (yaklaşık 3 saat). Yapıştırılan silindir diske Pull-Off cihazı yerleştirilip sabitlendikten sonra pull-off okumaları alınmıştır. Bu işlemler her bir numuneye 2'şer defa uygulanmış ve böylece her bir seri için 6'şar okuma yapılmıştır. Pull-off çekme aleti üzerinden okunan çekme kuvveti değeri (kN) betonun kesit alanına bölünmüş ve elde edilen değer çekme dayanımına (MPa) dönüştürülmek için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$f_{po} = \frac{P \times 1000}{A}$$

(1)

Burada; f_{po} , pull-off çekme dayanımı (MPa), P, çekme kuvveti (kN) ve A, disk yüzey alanı (mm^2)'dir.

3.2.4. Ultrases Hızı Ölçümleri (Ultrasonic Pulse Velocity)

Ultrases hızı ölçümleri ASTM C 597 standardına göre yapılmıştır [21]. Hazırlanan %0, %5, %10, %20, %30 uçucu kül ikameli 3 adet numuneye, 28 gün kür uygulaması ardından ultrases ölçümleri uygulanmıştır. Her bir numune üzerinde, kuru halde ($105\pm 5^\circ C$ 'lik etüvde 24 saat bekletildikten sonra) 4'er okuma gerçekleştirilmiştir. Bu durumda her bir numunede 8 adet okuma gerçekleşmiştir.

Beton numunelerde ultrases geçiş hızı ölçümü; numunelerin zemine temas eden yüzeylerine dik doğrultuda yapılmıştır. Numuneler, düz ve temiz bir zemin üzerine konulmuş ve üzerindeki tozlar yumuşak bir fırça ile temizlenmiştir. Alıcı ve vericinin konulacağı karşılıklı yüzeylere, temizleme kolaylığı göz önünde bulundurularak gres yağı sürülmüştür. Numuneler, alıcı ile vericiler arasına hava kabarcığı kalmayacak şekilde sıkıca yerleştirilmiş ve numune boyunca ultrases geçiş süresi, mikro saniye cinsinden ölçülmüştür.

Beton numunelerinden ultrases geçiş hızı hesaplanmasında, aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$V = \frac{L}{t} \quad (2)$$

Burada; V, ultrases geçiş hızı, (km/sn), t, ultrases geçiş süresi (sn) ve L, ölçü boyu (km)'dir.

3.2.5. Beton Basınç Dayanımı (Compressive Strength of Concrete)

Beton basınç dayanımı deneyleri, hazırlanan $15 \times 15 \times 15$ cm ebatlarındaki %0, %5, %10, %20, %30 F sınıfı uçucu kül ikameli küp numuneler üzerinde ve 28. günlük kür uygulamasından sonra TS EN 12390-3 standardına uygun olarak yapılmıştır [22]. Her bir uçucu kül ikame oranı için 32'şer adet küp numune üzerinde beton basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir.

3.2.6. Çeşitli Ampirik Formüller ile Beton Basınç Dayanımı Değerlerinin Hesaplanması (Calculating of Concrete Compressive Strength with Different Empirical Formulations)

Günümüze kadar yapılan bir çok çalışmada, beton basınç dayanımı, tahribatsız test metotlarından faydalanarak çeşitli ampirik formüllerle ifade edilmeye çalışılmıştır. Kheder (1998) yapmış olduğu çalışmasında, Denklem 3'de verilen formülü kullanarak beton basınç dayanımını Schmidt beton test çekici sonuçlarından faydalanarak modellemiştir [23]. Qasrawi (2000) beton basınç dayanımı ile ultrases hızı arasındaki ilişkiyi Denklem 4'de verilen ampirik formülle ifade etmiştir [24]. Hem beton test çekici hem de ultrases hızı deney sonuçlarını kullanarak, beton basınç dayanımını belirlemede kullanılan birleşik yöntemde ise literatürde birçok formül yer almaktadır. Bu çalışmada ortalama karesel hatası düşük olması nedeniyle Denklem 5'de verilen formül kullanılmıştır [25]. Pull-off test sonuçları kullanılarak beton basınç dayanımının belirlenmesinde ise Ferreria ve Castro (2000) yapmış olduğu çalışmalarında Denklem 6'da verilen formülü önermişlerdir [26].

$$f_{cR} = 0.4030 xR^{1.2083} \quad (3)$$

$$f_{cV} = 1.2 \times 10^{-5} xV^{1.7447} \quad (4)$$

$$f_{cRV} = 0.745 xR + 0.951 xV - 0.544 \quad (5)$$

$$f_{cp} = 13.005e^{0.046f_p} \quad (6)$$

Burada; f_{CR} , f_{CV} , f_{CRV} ve f_{CP} , beton basınç dayanımı (MPa), R, beton yüzey sertliği (geri tepme katsayısı), V, ultrases geçiş hızı (km/sn) ve f_p , Pull-off çekme kuvvetidir (kN).

Yukarıda verilen ampirik formüllere ek olarak bu çalışmada, beton basınç dayanımını tahribatsız test yöntemlerinden faydalanarak tahmin eden yeni formüller regresyon analizi sonucunda ortaya konmuştur. Ampirik formüller belirlenirken tahribatsız deney sonuçları regresyon analizine tabi tutularak ayrı ayrı formüller elde edilmiştir [27].

4. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSIONS)

4.1. Tahribatlı ve Tahribatsız Test Sonuçları

(Destructive and Nondestructive Test Results)

%0, %5, %10, %20, %30 F sınıfı uçucu kül ikamesi ile hazırlanan beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımı, yüzey sertliği, ultrases geçiş hızı ve pull-off deney sonuçları Tablo 4'de özetlenmektedir.

Tablo 4. Deneysel ve teorik olarak hesaplanan basınç dayanımı değerleri

(Table 4. Experimental and theoretical compressive strength values)

UK İçeriği (%)	Deneysel Basınç Dayanımı (MPa)	Hesaplanan Basınç Dayanımı (MPa)			
		Denklem 3	Denklem 4	Denklem 5	Denklem 6
0	27,17	16,07	15,75	19,35	17,40
5	25,00	15,14	15,46	18,55	17,17
10	21,72	12,73	14,27	16,36	16,58
20	15,07	11,02	10,96	14,35	15,56
30	13,06	10,21	11,01	13,66	15,15

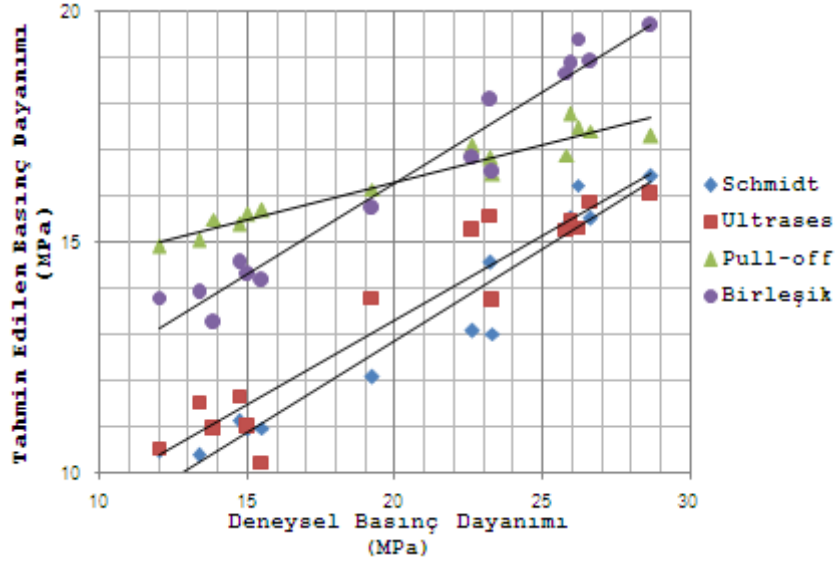
4.2. İstatistiksel Analiz (Statistical Analysis)

Literatürde yer alan ampirik formüller yardımıyla hesaplanan basınç dayanımı değerlerinin, deneysel basınç dayanımı değerleri ile arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 1'de verilmiştir. Deneysel sonuçlar ile ampirik formüller kullanılarak elde edilen sonuçlar arasında hesaplanan ortalama hata yüzdeleri Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Ortalama karesel hata oranları
(Table 5. Mean error of estimates)

Ortalama Hata (%)			
f_{CR}	f_{CV}	f_{CRV}	f_{CP}
33,9095	31,3114	18,2475	21,9782

Tablo 5 incelendiğinde, literatürde verilen ampirik formüllerle uçucu kül ikameli betonların basınç dayanımlarının tahmininde ortalama hata yüzdeleri oldukça yüksek (%18-%33 arasında) çıkmıştır. En düşük ortalama hata yüzdesinin, %18,25 ile Schmidt çekici ve ultrases hızı değerlerinin birlikte kullanılarak önerilen (Birleşik Metot) Eşitlik 5'deki formülle elde edilmiştir. Ancak yüzdesel hata değerlerinin beton basınç dayanımı değerleri göz önüne alındığında oldukça yüksek olduğu ve bu haliyle F sınıfı uçucu kül ikameli betonların basınç dayanımlarının tahmininde kullanılmasının yüksek hata oranlarına neden olduğu görülmüştür.



Şekil 1. Teorik ve deneysel olarak hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki
(Figure 1. Relationship between theoretical and experimental compressive strength)

Literatürde önerilen formüllerle elde edilen basınç dayanımı değerleri ile deneysel basınç dayanımı değerlerinin eşleştirildiği grafik Şekil 2'de verilmiştir.

Bu çalışmada %0, %5, %10, %20, %30 F sınıfı uçucu kül ikamesi ile hazırlanan numuneler üzerinden alınan tahribatsız test sonuçlarını kullanarak istatistiksel analiz sonucunda elde edilen ampirik formüller aşağıda verilmiştir.

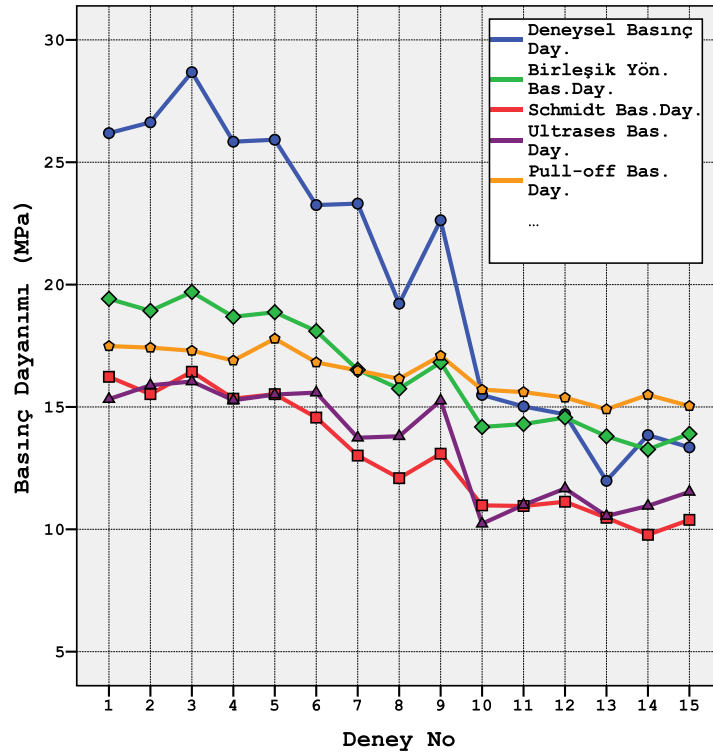
Sadece Schmidt çekici kullanılarak uçucu kül ikameli betonların basınç dayanımı tahmininde;

$$f_{cR} = a + b(1 - c^R) \quad (7)$$

formülü kullanılmıştır. Burada; f_{cR} , basınç dayanımı (MPa), R, geri tepme katsayısı, a, b ve c ise istatistik sabitleridir. İstatistiksel analiz sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Regresyon analizi sonuçları
(Table 6. Regression analysis results)

r	r^2	Uyarlanmış r^2
0,9762	0,953	0,9452
Sabitler	Katsayılar	Standart Hata
a	-89,613	92,386
b	130,457	78,911
c	0,899	0,067



Şekil 2. Deneysel basınç dayanımı ile teorik basınç dayanımlarının eşleşme grafiği
(Figure 2. Match graphic of experimental and theoretical compressive strength)

Sadece ultrases hızı değerleri kullanılarak uçucu kül ikameli betonların basınç dayanımı tahmininde;

$$f_{cV} = a + bV + cV^2$$

(8)

formülü kullanılmıştır. Burada; f_{cV} , basınç dayanımı (MPa), V , ultrases geçiş hızı değerleri (km/sn), a , b ve c ise istatistik sabitleridir. İstatistiksel analiz sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Regresyon analizi sonuçları
(Table 7. Regression analysis results)

r	r^2	Uyarlanmış r^2
0,9584	0,9185	0,9050
Sabitler	Katsayılar	Standart Hata
a	113,298	98,600
b	-62,639	50,506
c	9,777	6,413

Hem ultrases hızı değerlerinin hem de Schmidt çekici ile beton yüzey sertliği sonuçlarının kullanılması ile uçucu kül ikameli betonların basınç dayanımı tahmininde;

$$f_{cRV} = a \exp^{-0.5 \left[\left(\frac{R-b}{c} \right)^2 + \left(\frac{V-d}{e} \right)^2 \right]}$$

(9)

formülü kullanılmıştır. Burada; f_{cRV} , basınç dayanımı (MPa), V , ultrases geçiş hızı değerleri (km/sn), R , geri sıçrama sayısı

değerleri, a, b, c, d ve e ise istatistik sabitleridir. İstatistiksel analiz sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Regresyon analizi sonuçları
(Table 8. Regression analysis results)

r	r ²	Uyarlanmış r ²
0,9812	0,9627	0,9478
Sabitler	Katsayılar	Standart Hata
a	28,372	3,272
b	23,618	3,748
c	8,397	3,331
d	4,575	1,368
e	1,789	1,714

Sadece pull-off değerleri kullanılarak uçucu kül ikameli betonların basınç dayanımı tahmininde;

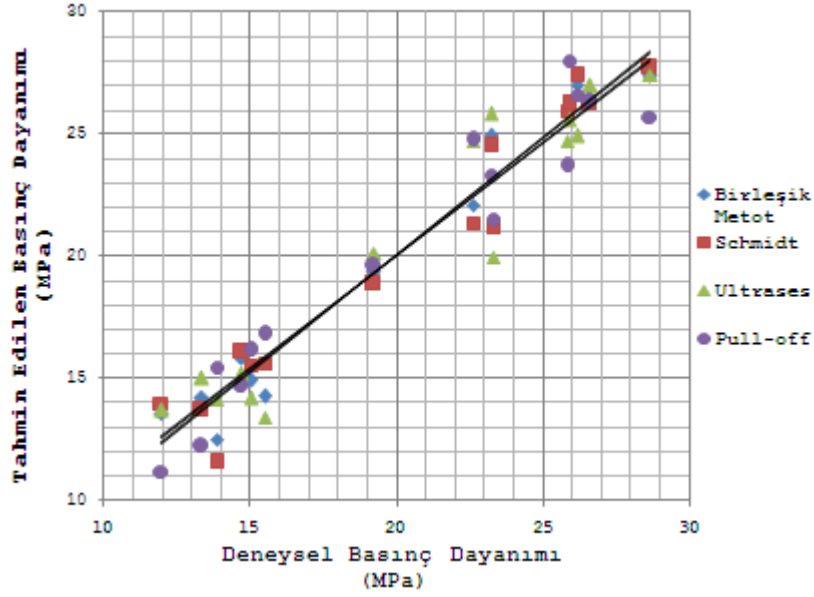
$$f_{cp} = a + b(1 - e^{(-c \cdot f_p)}) \quad (10)$$

formülü kullanılmıştır. Burada; f_{cp} , basınç dayanımı (MPa), f_p , pull-off çekme kuvveti (kN), a, b ve c ise istatistik sabitleridir. İstatistiksel analiz sonuçları Tablo 9'de verilmiştir.

Tablo 9. Regresyon analizi sonuçları
(Table 9. Regression analysis results)

r	r ²	Uyarlanmış r ²
0,9643	0,930	0,9183
Sabitler	Katsayılar	Standart Hata
a	-6,6541	11,12
b	72,3523	69,12
c	0,0957	0,1679

Regresyon analizi sonucunda elde edilen ampirik formüllerle hesaplanan basınç dayanımı değerleri ile deneysel olarak hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Hesaplanan basınç dayanımlarıyla deneysel basınç dayanımları arasındaki ilişki.

(Figure 3. Relationship between theoretical and experimental compressive strength)

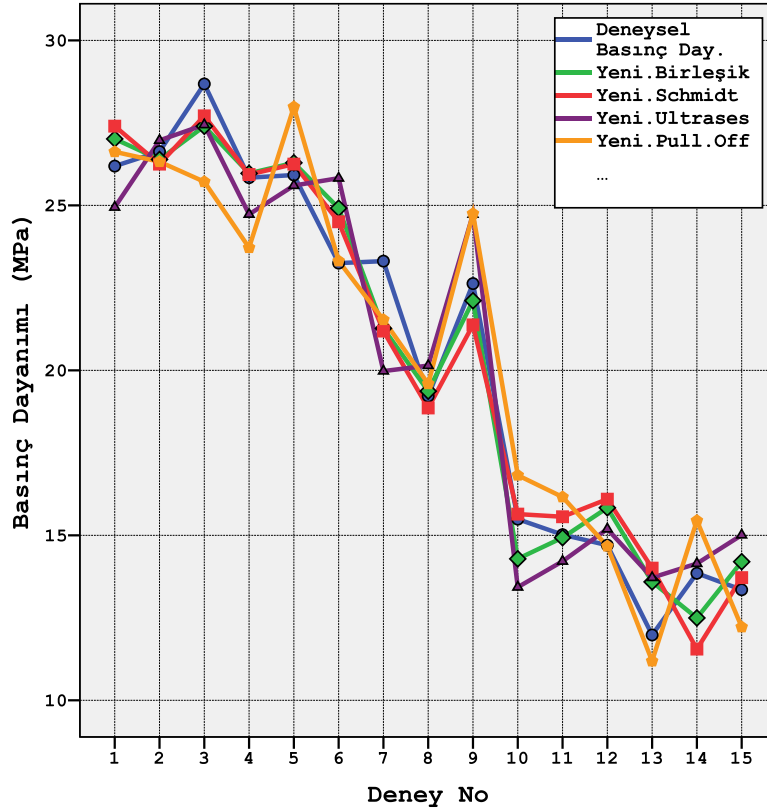
Geliştirilen ampirik formüllerin tahmin ettiği ortalama hata yüzdeleri Tablo 10'de verilmiştir.

Tablo 10. Ortalama karesel hata oranları
(Table 10. Mean error of estimates)

Ortalama Hata (%)			
f_{CR}	f_{CV}	f_{CRV}	f_{CP}
5,5541	7,0940	5,0065	6,0980

Tablo 10 incelendiğinde, bu çalışmada geliştirilen ampirik formüllerle uçucu kül ikameli betonların basınç dayanımlarının tahmininde ortalama hata yüzdeleri %5-%7 arasında değişmektedir. En düşük ortalama hata yüzdesi, 5.0065 ile Schmidt çekici ve ultrases hızı değerlerinin birlikte kullanılarak önerilen (Birleşik Metot) Eşitlik 9'daki formülle elde edilmiştir.

Bu çalışmada önerilen ampirik formüller yardımıyla hesaplanan basınç dayanımı değerlerinin deneysel basınç dayanımı değerleri ile arasındaki eşleşme durumunu gösteren grafik Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Deneysel ve teorik olarak hesaplanmış basınç dayanımlarının eşleşme grafiği
(Figure 4. Match graphic of experimental and theoretical compressive strength)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, beton içerisinde F sınıfı uçucu kül kullanımı ile elde edilen beton numunelerin basınç dayanımlarının tahribatsız test metotlarından faydalanarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Araştırma sonuçlarına bağlı olarak içerisinde değişik oranlarda F sınıfı uçucu kül ikamesi bulunduran betonların;

- Literatürde önerilen ve Denklem 3-6'da verilen ampirik formüllerle beton basınç dayanımı tahmininde hata oranlarının yüksek olduğu,
- Sadece yüzey sertliği deney sonuçlarına bağlı olarak elde edilen ve Denklem 7'de verilen formül ile beton basınç dayanımı tahmininde ortalama hata yüzdesinin %5,5541 olduğu,
- Sadece ultrases geçiş hızı deney sonuçlarına bağlı olarak elde edilen ve Denklem 8'de verilen formül ile beton basınç dayanımı tahmininde ortalama hata yüzdesinin %7,0940 olduğu,
- Hem yüzey sertliği hem de ultrases geçiş hızı deney sonuçlarına bağlı olarak elde edilen ve Denklem 9'da verilen formül ile beton basınç dayanımı tahmininde ortalama hata yüzdesinin %5,0065 olduğu,
- Sadece pull-off deney sonuçlarına bağlı olarak elde edilen ve Denklem 10'de verilen formül ile beton basınç dayanımı tahmininde ortalama hata yüzdesinin %6,0980 olduğu,
- Denklem 7-10'da verilen ampirik formüllerin uçucu kül ikameli betonların basınç dayanımlarını tahribatsız yöntemlerle tahmininde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Erdoğan, T.Y., (2003). Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim AŞ., Ankara, Türkiye.
2. Mehta, P.K., (1986). Concrete: Structure, Properties, and Materials, Prentice- Hall, NJ. Englewood, USA.
3. Neville, A.M., (2006). Properties of concrete, Pearson Education Limited, England.
4. ASTM C 618, (1994). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, Annual Book Of ASTM Standards.
5. Aruntaş, H.Y., (2006). Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21 (1), pp:193-203.
6. Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., (2002). Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), DEÜ. Müh. Fak. Yayın No: 298, DEÜ., İzmir.
7. Dorum, A., Yılmaz, B., Koçak, Y. ve Uçar, A., (2010). Puzolan Yüzey Özelliklerinin Çimento Harçlarının Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, e-Journal of New World Sciences Academy, Engineering Sciences, 5 (2), 1A0096, pp:448-462.
8. Sun, W., Zhang, Y., Lui, S., and Zhang, Y., (2004). The influence of mineral admixtures on resistance to corrosion of steel bars in green high-performance concrete, Cement and Concrete Research 34, pp:1781-1785.
9. Liu, Z., Tang, M., and Cui, X., (1998). Expansion of Cement Containing Crystalline Magnesia With and Without Fly Ash and Slag, Cement, Concrete & Aggregates, Vol 20 (1), pp:180-185.
10. Sivasundaram, V., Carrette, G.G., and Malhotra, V.M., (1992). Concrete Incorporating High Volumes of ASTM Class F Fly Ashes: Mechanical Properties and Resistance to Deicing Salt-scaling and to Chloride-ion Penetration, Am. Concr. Inst. SP 132 (1), pp:319-349.
11. Bouzoubaa, N., Zhang, M.H., and Malhotra, V.M., (2001). Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with High-Volume Fly Ash Blended Cements Using a Coarse Fly Ash, Cem. Concr. Res. 31, pp:1393-1402.
12. Yazıcı, H., (2005). Yüksek Hacimde C Sınıfı Uçucu Kül İçeren Betonların Mekanik Özellikleri ve Sülfürik Asit Dayanıklılığı, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11 (3), pp:443-448.
13. Subaşı, S., (2009). Portland Kompozit Çimentolu Betonlarda Uçucu Kül İkamelerinin Donma-Çözülme Dayanıklılığına Olan Etkisi, e-Journal of New World Sciences Academy, 4 (2), 2A0007, pp:67-76.
14. Yazıcı, Ş., Göktepe, A.B., Altun, S. ve Karaman V., (2006). Sertleşmiş Beton Basınç Dayanımının Belirlenmesinde Kullanılan TS-10465 VE TS EN 12504-1 Üzerine Bir Değerlendirme, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 8 (1), pp:119-128.
15. Yüksel, İ., (1995). Bileşik Yıkıntısız Beton Deneyleri İle Beton Mukavemetinin Belirlenmesi ve Betonarme Bir Yapıda Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Tek. Üni., Fen Bil. Enst., İstanbul.
16. Erdal, M. ve Şimşek O., (2006). Bazı Tahribatsız Deney Metotlarının Vakum Uygulanmış Betonların Basınç Dayanımlarının Belirlenmesindeki Performanslarının İncelenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 21 (1), pp:65-73.
17. Erdal, M., (2002). Beton Basınç Dayanımının Bazı Tahribatsız Test Yöntemleriyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

18. Kabay, N. ve Aköz, F., (2004). Yapıda Beton Kalitesinin Tahribatlı Ve Tahribatsız Yöntemlerle Belirlenmesi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası ,XVII.Teknik Kongresi, İstanbul.
19. TS 802 (1985). Beton Karışımı Hesap Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
20. TS 3260, , (1978). Beton Yüzey Sertliği Yolu ile Yaklaşık Beton Dayanımının Tayini Kuralı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
21. American Standards of Testing Materials (ASTM) (2009). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM C597 - 09, ASTM International.
22. TS EN 12390-3 (2003). Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
23. Kheder, G.F., (1998). A two stage procedure for assessment of in-situ concrete strength using combined non-destructive testing. Mat. Structures 32, pp:410-417.
24. Qasrawi, H.Y., (2000). Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliable predicted. Cement and Concrete Res. 30, pp:739-746.
25. Tanigawa, Y., Baba, K., Mori, H., (1984). Estimation of concrete strength by combined nondestructive testing method. ACI SP 82 (1), pp:57-65.
26. Ferreria, A.P. and Castro, P.F., (2000). Application of NDT to Concrete Strength Estimation, NDT.net., 5 (2).
27. Kalaycı, Ş., (2008). SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri, Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti., 3. Baskı, Ankara.