

SUGÖZÜ UÇUCU KÜLÜNÜN BETONUN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Bekir Can DELİKURT, Umur Korkut SEVİM*

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, YUMURTALIK/ADANA Sugözü termik santralinde atık olarak meydana gelen uçucu külün betonda mineral katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Beton numuneler basınç, eğilme, su emme, yangın dayanımı, ultrasonik ses frekans, kapilarite, aşınma özellikleri açısından değerlendirilmiştir. Bağlayıcı madde dozajı bir metreküp için 400 kg' dır. Karışımların su/bağlayıcı oranı 0.45' de sabit tutulmuştur. Her karışımın çökme değeri 15±2 cm olacak şekilde hiper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Karışımlar %0, %10, %20, %30, %40 oranlarında F sınıfı uçucu kül çimento ile yer değiştirilerek hazırlanmıştır. Deneysel çalışma sonuçları, uçucu külün ağırlıkça %10-20 oranında çimento yerine kullanılması ile betonun dayanım değerlerinin yükseldiğini göstermiştir. Aynı zamanda su emme ve kapiler geçirgenlikleri azalmıştır. Sugözü uçucu külünün betonda mineral katkı madde olarak kullanılmasının teknik, ekonomik ve çevresel faydalar getireceği düşünülmektedir.

Anahtar sözcükler: Beton, Uçucu kül, Dayanım, Dayanıklılık, Sugözü

EFFECT OF SUGÖZÜ FLY ASH OF MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETE

ABSTRACT

In this study, usability of fly ash, which is waste product of YUMURTALIK/ADANA Sugözü thermal power plant as a mineral additive in concrete is investigated. Compression, bending, water absorption, fire resistance, ultrasonic audio frequency, capillary and abrasion properties of concrete are evaluated. Binder dosage is 400 kg for one cubic meter. Water /binder ratio of mixtures is taken constant as 0.45. Hyperplasticizer used to make slump value of 15±2 cm .Mixtures are prepared by substituting F class fly ash with ratio of %0, %10, %20, %30, %40. Experimental study results showed that strength of concrete specimens increased by substituting fly ash with cement by weight of %10-20. At the same time water absorption and capillar permeability are decreased. It is thought that the use of Sugözü fly ash as additive material in concrete has technical, economical and environmental benefits.

Keywords: Concrete, Fly Ash, Strength, Durability, Sugözü

1. GİRİŞ

Ülkelerin gelişmişlik seviyelerinin artmasıyla enerji sarfiyatlarında da artış olduğu bilinmektedir. Buna bağlı olarak enerji üretimine ihtiyaç da artmıştır. Dünyanın birçok ülkesinde olduğu gibi ve Türkiye'de de hızlı nüfus artışı, yaşam koşullarının iyileşmesi sanayi ve kentleşme gereksinimini arttırmıştır. Bu ihtiyaçları karşılamak için eldeki imkanlardan olabildiğince etkili ve hızlı bir şekilde faydalanılması gerekmiştir. Bu ihtiyaç doğrultusunda

*Corresponding author. E-mail: uksevim@mku.edu.tr

hidroelektrik ve termik enerji çözüm olarak kullanılmıştır [1]. Termik santrallerde, toz kömürün yanması sonucu oluşan ve baca gazlarıyla sürüklenen çok ince parçacıklı küller önemli atık malzemedir. Uçucu kül adı verilen bu kül parçacıkları elektrostatik yöntemlerle yakalanmakta ve baca gazlarıyla birlikte atmosfere karışması önlenmektedir. Termik santral sayısının artması, kül üretiminin artmasını da beraberinde getirmektedir. Bu durumda önemli ekolojik, ekonomik ve teknik sorunlar ortaya çıkmaktadır. Uçucu küller silisli, alüminli amorf yapıya sahip ve çok ince taneli olmalarından dolayı puzolanik özellik göstermektedir. Beton katkı malzemesi olarak kullanılan uçucu külün karışım içerisindeki miktarı, çimento ağırlığının %15-%50'si civarında kullanılabilir [2]. ASTM, kimyasal bileşenlerine bağlı olarak uçucu külleri F ve C sınıfı uçucu kül olarak sınıflandırılmaktadır [3]. TS EN 197-1'e göre ise uçucu kül V (silisli) ve W (kalkersi) olarak sınıflandırılmaktadır [4]. Ülkemizde faal olarak hizmet veren 12 adet termik santralden sadece Çatalağzı ve Sugözü termik santrallerinde F sınıfı uçucu kül elde edilmektedir. Genel olarak ülkemizde bulunan termik santrallerden elde edilen uçucu kül yüksek miktarda kireç içermektedir.

Bu çalışmada, 2004 yılında faaliyete geçen Sugözü termik santralinin atık malzemesi olarak meydana gelen F sınıfı uçucu külünün mineral katkı malzemesi olarak beton içinde kullanılabilirliği, sertleşmiş betonlarda dayanım ve dayanıklılık vs. özellikleri bakımından araştırılmıştır. Uçucu külün beton katkı malzemesi olarak kullanılması literatürde birçok araştırmaya konu olmuştur. Beton ve çimentoda kullanılan ekonomik ve ekolojik fayda sağlayan bu malzeme daha bir çok araştırmaya da katkıda bulunmaya devam edecektir.

Ramyar [5], araştırmasında Türkiye'de üretilmekte olan ve linyitin yakılmasından elde edilen dört çeşit uçucu külün, portland çimentosu-uçucu kül sistemlerinin özelliklerine etkisini incelemiştir. Yazıcı ve Baradan [6], uçucu kül katkılı yüksek dayanımlı beton üretilmesi çerçevesinde 75 MPa basınç dayanımına sahip bağlayıcı malzeme içeriği % 100 PÇ-42.5 çimentosu olan yüksek dayanımlı beton (YDB) ve yine aynı malzemelerle çimento yerine %25 oranında uçucu kül ikame edilen uçucu küllü yüksek dayanımlı betonlar (UKYDB) üretmişlerdir. Erdinç [7], çalışmasında Orhaneli uçucu külünün betonlarda dayanım ve klor geçirimsizliğini araştırmıştır. Gökçe ve Özturan [8], uçucu kül puzolanik aktivitesinin tayini ile ilgili mevcut bazı standartları ele almışlar, bu standartlardan elde edilen test sonuçlarını birbirleri ile karşılaştırmışlar ve her standardın uygunluğunu tartışmışlardır. Özcan [9], çalışmasında Seyitömer ve Tunçbilek santrallerinden sağladığı uçucu külleri %10, %20 ve %30 oranlarında çimento ile yer değiştirerek betonların mekanik ve durabilite özelliklerine olan etkilerini incelemiştir. Atış [10], yüksek oranda uçucu kül kullanımı ile üretilen betonun aşınma direncini araştırmıştır. Betonun basınç dayanımı arttıkça aşınma direncinin de arttığını görmüştür. Bilim [11], yüksek oranda kalsiyum içeren standart dışı bir uçucu külün beton içinde kullanılabilirliğini ve hızlandırılmış kür karşısındaki davranışı araştırmak üzere bir laboratuvar çalışması yürütmüştür. Atış ve ark. [12], çalışmalarında standartlara uygun olmayan Afşin-Elbistan termik santrali uçucu külünü beton içerisinde mineral katkı olarak kullanılabilirliğini basınç ve çekme dayanımı ve hidratasyon sonucu oluşan sıcaklık yükselmesi açısından değerlendirmişlerdir.

Literatürde Sugözü termik santrali uçucu külünün betonda mineral katkı malzemesi olarak kullanılmasıyla ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Günindi, 2005 Yumurtalık Sugözü uçucu küllü içeren betonların basınç eğilme ve aşınma dayanımlarını araştırdığı çalışmasında genellikle %10 oranında uçucu kül içeren betonların basınç dayanımları kontrol betonların basınç dayanımlarıyla çoğunlukta eşdeğere yakın çıkmıştır. %20-40 arasında uçucu kül içeren betonların basınç dayanımları ise kontrol betonların basınç dayanımlarına göre, basınç dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Bu gözlemlerden uçucu kül oranı %0 ile %10 arasında çok iyi, %10 ile %20 arasında iyi, %20 ile %40 arasında normal basınç dayanımının verdiği anlaşılmaktadır [13]. Karahan, 2006 Sugözü uçucu külünün lifli betonlarda kullanımı ile yaptığı çalışmada betonda mineral katkı olarak %30 mertebesine kadar ikame edilebileceği, hatta yüksek oranlarda uçucu kül içeren betonlarda %45 ve üzeri kullanılabileceği ve enerji tasarrufundan kaynaklanan ekonomik kazanç ve gün geçtikçe hissedilen çevreyi koruma gereği, ayrıca uçucu külün taze ve sertleşmiş betonun birtakım özelliklerini iyi yönde etkilemesi, uçucu külün lifli betonlarda kullanılmasının başlıca nedenleridir. Çalışmaların sonucunda, Sugözü uçucu külünün %30 oranlarına kadar liflerle güçlendirilmiş betonlarda da mineral katkı olarak kullanılabileceği görülmüştür [14].

2. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri, fiziksel özellikleri ile beton karışımlarında kullanılan malzeme oranlarına yer verilmiştir.

2.1. Materyal

2.1.1.Çimento

Çalışmada Kahramanmaraş Narlı Çimento tarafından üretilen standart CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal özellikleri TS 639 [15] standardına uygun (Tablo 1), başlangıç ve bitiş priz süresi 2.18 ve 3.23 saattir. Çimentonun yoğunluğu 3.16 gr/cm³ olup, Blaine özgül yüzeyi ise 3250 cm²/gr ‘dır.

Tablo 1. Çimentonun Kimyasal Kompozisyonu (%)

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	KK
Çimento	20.10	5.40	3.73	63.30	2.54	2.82	0.90	0.25	0.96

2.1.2. Uçucu Kül

Bu çalışmada, Yumurtalık/Adana’ da Sugözü termik santralinin ithal taş kömürünün yakılmasıyla açığa çıkan F sınıfı uçucu külü kullanılmıştır.

Sugözü uçucu külü, ASTM C618 [3] standardına göre SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ değerinin %70’in üzerinde olması ve CaO miktarının %10’dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir. Uçucu külün yoğunluğu 2.31 gr/cm³, Blaine özgül yüzeyi ise 3000 cm²/gr’ dir.

Tablo 2. Uçucu Külün Kimyasal Kompozisyonu (%)

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	KK
Uçucu Kül	58,25	22,95	7,25	2,58	2,42	0,27	0,99	2,06	3,23

2.1.3. Agrega

Beton üretiminde, Hatay İskenderun sınırları içerisinde yer alan taş ocakları tesislerinden elde edilen dolomitik kireçtaşı orijinli agregada kullanılmıştır. Karışımlarda, ağırlıkça tane çapı 0–4 mm olan agregadan % 40, tane çapı 4–11 mm olan agregadan % 30 ve tane çapı 11–22 mm agregadan % 30 oranında kullanılmıştır. Agregalara ait yoğunluk değerleri, 0-4 mm için 2.67 kg/dm³, 4-11 mm için 2.72 kg/dm³, 11-22 mm için 2.75 kg/dm³ tür. Ağırlıkça su emme değerleri, 0-4 mm için % 0.32, 4-11 mm için % 2, 11-22 mm için % 0.52’ dir.

2.1.4. Akışkanlaştırıcı

Deney çalışmalarında hazırlanan karışımların çökme değerleri 15 ± 2 cm olacak şekilde ASTM C 494 standardına uygun süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcıya ait özellikler Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Akışkanlaştırıcı Madde Özellikleri

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Renk	Opak
Yoğunluk	1,063 – 1,103 kg/litre
Klor İçeriği (EN 480-10)	< 0,1
Alkali İçeriği (EN 480-12)	< 3

2.1.5. Karışım Suyu

İskenderun su şebekesine bağlı içme suyu şebekesinden alınan su karışım suyu olarak kullanılmıştır.

2.2. Metot

2.2.1. Beton Karışımları

Bu çalışmada, bağlayıcı (çimento+uçucu kül) dozajı birim metreküp için 400 kg' dır. Su/bağlayıcı oranı 0.45'tir. Deneysel çalışmalarda hazırlanan karışımların çökme değerleri 15 ± 2 cm olacak şekilde ASTM C 494 standardına uygun süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Beton karışımlarında F tipi uçucu kül çimento ile ağırlıkça %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında çimento ile yer değiştirilmiştir. 1 m³ beton için karışım dizaynı Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. 1 m³ beton için malzeme miktarı

No	Karışım ismi	Uçucu Kül Miktarı (%)	W/B	Su (kg)	Çimento (kg)	Uçucu kül (kg)	Süper akışkanlaştırıcı (kg)	Agrega 0-4 (kg)	Agrega 4-11 (kg)	Agrega 11-22 (kg)
1	Şahit	0	0,45	180	400	0	4	738,40	564,12	570,36
2	U1	10	0,45	180	360	40	4	733,40	560,32	566,52
3	U2	20	0,45	180	320	80	4	728,40	556,56	562,68
4	U3	30	0,45	180	280	120	2,8	723,48	552,80	558,88
5	U4	40	0,45	180	240	160	2,4	718,60	549,00	555,08

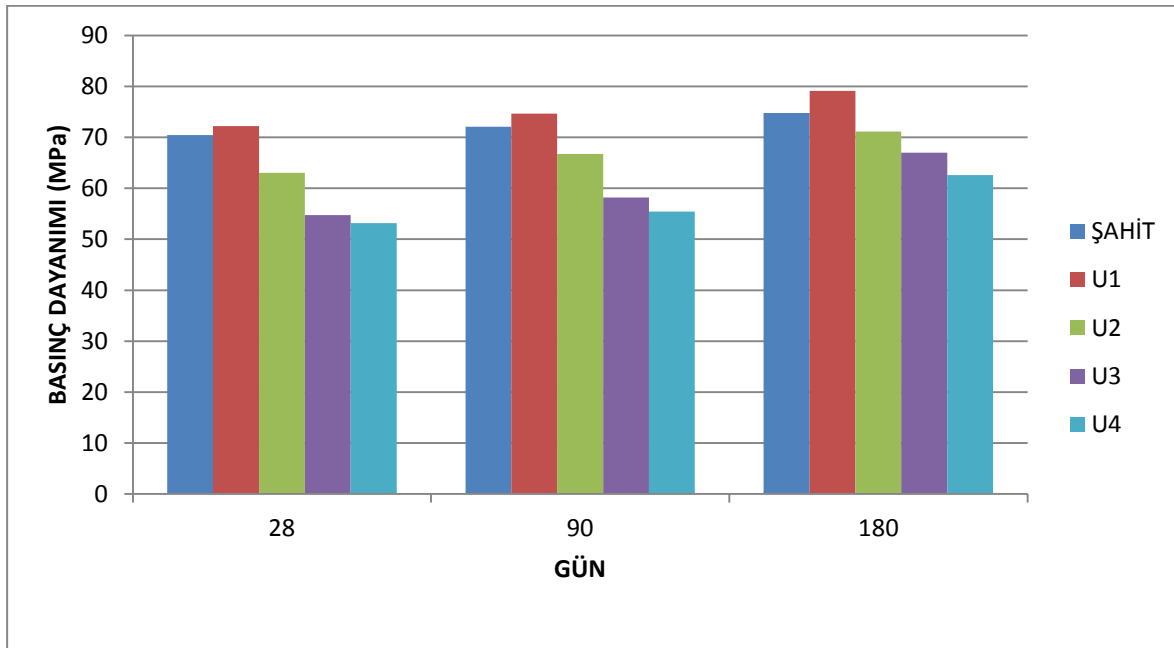
3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Basınç Dayanımı

Her bir karışımın basınç dayanımının tayini için 100×100×100 mm' lik küp numuneler üretilmiştir. Numunelerin 28, 90 ve 180 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. Numuneler, TS EN 12390-4'e [16] basınç dayanımı-deney makinelerinin standardına uygun deneyi aletinde, basınç dayanımının tayini için deneye tabi tutulmuşlardır. Makine otomatik yükleme sistemi ile küp numuneler 0,3 KN/sn yükleme hızı ile yüklenmiştir. Uçucu kül katkılı betonlara ait basınç dayanımlarının zamana bağlı olarak artışı ve optimum muhtevadan sonra azaldığı Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Beton Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

	Basınç Dayanımları (MPa)		
NUMUNELER	28. Gün	90. Gün	180. Gün
ŞAHİT	70,42	72,06	74,77
U1	72,17	74,65	79,13
U2	63,03	66,72	71,13
U3	54,74	58,16	66,95
U4	53,18	55,43	62,61



Şekil 1. 28-90-180 Günlük Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 2. Beton Basınç Deneyi Düzeneği

İnce taneli puzolanik katkıları çimentodaki kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin hidrasyonu sonucunda ortaya çıkan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek dayanım kazanmaktadırlar. Bu malzemelerde Ca(OH)_2 ve su arasındaki reaksiyon, ilave C-S-H jellerinin oluşmasına ve dayanımının artmasına neden olmaktadır (ERDOĞAN, T.Y. 2004)[17]. Uçucu küller de beton içerisinde aynı şekilde davranmaktadır. Bu nedenle, uçucu küllü betonların erken yaşlardaki dayanımları sadece Portland Çimentosu kullanılan betonlara göre biraz daha düşük olmaktadır. Nihai dayanımları ile daha yüksek olmaktadır.

Tablo 4 incelendiğinde % 10 Sugözü uçucu külü içeren betonların her üç yaşta da şahit betondan daha yüksek basınç dayanımı değeri verdiği, %20 uçucu kül içeren betonların ise 180 gün sonunda şahit betona yakın basınç dayanımı değeri verdiği görülmektedir. %30 ve % 40 uçucu kül katkısı basınç dayanımında bir miktar düşüşe sebep olmuştur. Bununla birlikte bu betonlardan 180 gün sonunda tatmin edici basınç dayanımları elde edilmiştir.

3.2. Eğilme Dayanımı Tayini

Betonun eğilme dayanımı tayini deneyi TS EN 12390-5 [18] standartlarına uygun, donatısız beton kirişlerde basit kırış metodu ile yapılmıştır. Eğilme dayanımları tayini için $100 \times 100 \times 400$ mm'lik donatısız kırış numuneler

üretmiştir. 400 mm uzunluğundaki kiriş numune 380 mm açıklığındaki mesnetler üzerine yerleştirilmiş ve üçte bir noktalarından tekil yük uygulanmıştır. Bu deney metodunda kiriş numuneler açıklığın 1/3 noktalarından yüklenmiştir. Deney 2 ton eğilme kapasiteli preste, yükleme hızı 20 kg/sn olacak şekilde yüklenmiştir. Numunelerin 28 günlük dayanımları ölçülmüştür. Deneye ait eğilme dayanımları Tablo 6’da verilmiştir.



Şekil 3. Eğilme Dayanımı Deneyi Düzenegi

Tablo 6. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Karışımlar	Eğilme Dayanımı (MPa)
Şahit	7,64
U1	7,66
U2	7,48
U3	7,47
U4	6,44

Tablo 6’da verilen eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde tüm uçucu kül katkılı karışımların Şahit numuneye çok yakın eğilme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Uçucu kül katkısının 28 günlük eğilme dayanımında kayba neden olmazken, nihai eğilme dayanımlarının şahit numuneden daha yüksek olacağı söylenebilir.

3.3. Su Emme Oranları

Sertleşmiş betonda su emme oranlarının tayini için 28 gün kür edilmiş 100×100×100 mm’lik küp numuneler kullanılmıştır. Küp numunelerin sırasıyla etüv kurusu ağırlıkları ve suya doymuş ağırlıkları tayin edilmiştir. Su emme oranları TS 3624, 1981[19] standardına göre belirlenmiştir. Tablo 7 incelendiğinde %10 ve % 20 uçucu kül katkısının su emme değerini şahit numuneye göre bir miktar azalttığı görülmektedir. Bunun sebebi, uçucu külün $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile yapmış olduğu puzolanik reaksiyon sonucu oluşan ilave bağlayıcı hamurun boşlukları azaltmasıdır.

3.4. Kapiler Su Emme Katsayısı

Beton numunelerin kapiler su emme katsayıları 28 gün kür edilen 100x100x100 mm’ lik küp numuneler üzerinde belirlenmiştir. Beton numunenin sadece alt yüzeyi suya temas edeceğinden numunelerin sadece yan yüzeyleri ısıtılmış parafin ile izole edilmiştir. Başlangıç ağırlığı olarak numunenin parafinli ağırlığı kaydedilmiştir. Numuneler su yüksekliği yaklaşık olarak 10 mm olan deney havuzuna yerleştirilmiştir. Deney numuneleri 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121 ve 144 dakikalarda ağırlıkları kaydedilerek su emme miktarları (Q) hesaplanmıştır. Emilen su miktarının temas eden yüzey alanına bölümünün oranı ile (Q/A) geçen zamanın (t) dakika cinsinden değerinin karekökü arasında lineer bir ilişki kurulmuştur. Bu ilişkiye ait elde edilen eğimler bize beton numunelerin kapiler su emme katsayılarını vermiştir. Tablo 7 kapilarite katsayısı deney

sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde % 10 uçucu kül içeren numunenin kapilarite katsayısının şahit numuneye göre oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bununla beraber % 20 uçucu kül katkısı da kapilar su emmenin bir miktar azalmasına neden olmuştur. Kapiler boşlukların miktarını etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesi çimentonun hidratasyonudur. Hidratasyon ilerledikçe oluşan bağlayıcı hamur kapiler boşlukları doldurarak bağlantılarını kesmektedir. Benzer şekilde uçucu külü çimentonun ana bileşenlerinin hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 ile yapmış olduğu reaksiyon sonucu ilave C-S-H jelleri oluşmakta ve bu da kapiler boşluk miktarını azaltmaktadır.

Tablo 7. Su Emme Deneyi Sonuçları

Numuneler	Su Emme Değerleri (%)
ŞAHİT	3,35
U1	3,20
U2	3,30
U3	3,59
U4	3,44



Şekil 4. Kapilarite Deneyi Düzenegi

Tablo 8. Kapilarite Deneyi Sonuçları

Numuneler	Kapilarite Katsayısı ($\text{cm/dk}^{1/2}$)
Şahit	0,0033
U1	0,0019
U2	0,0028
U3	0,0041
U4	0,0039

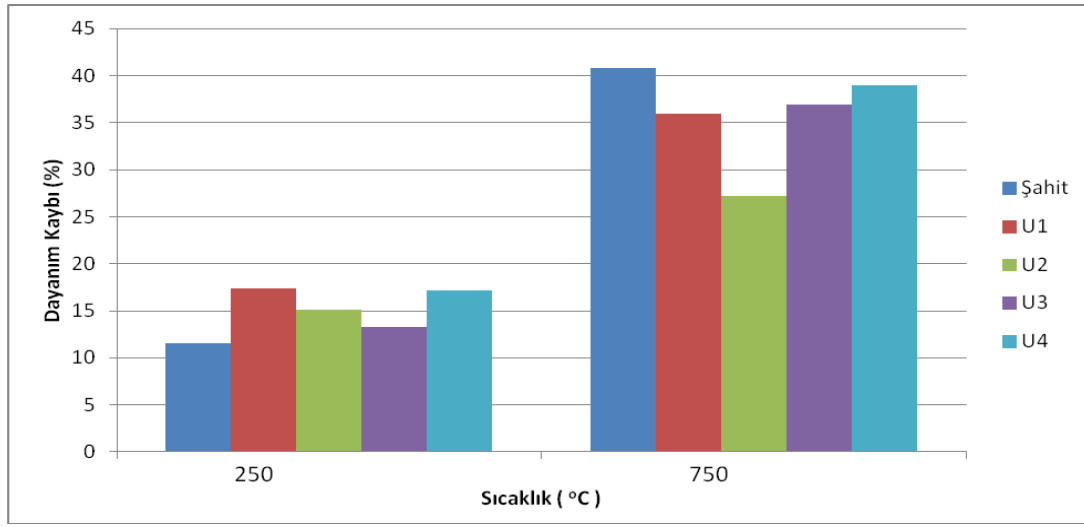
3.5. Yangın Dayanımı

Beton yangın dayanımı suda 28 gün kür edilen $100 \times 100 \times 100$ mm' lik küp numuneler kullanılmıştır. Küp numuneler yüksek sıcaklıklı fırına koyulmadan önce etüvde 105°C ' de 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Etüvden alınan numuneler sıcaklık artışı 6°C/dk olan deney aletinde sırasıyla 250 ve 750°C sıcaklıklara 2 saat maruz

bırakılmıştır. Fırından alınan numunelerin basınç dayanımları ölçülmüş, yangın etkisi altında beton numunelerin davranışları tespit edilmiştir. Tablo 9’da yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkisi görülmektedir.

Tablo 9. Sıcaklığın artışının beton üzerinde oluşturduğu etkiler [20]

Sıcaklık	Beton üzerindeki etkisi
100 - 150°C	Kılcal boşluklardaki suyun buharlaşması, jel boşluklarındaki suyun buharlaşması
150 - 250°C	Büzülme, kılcal çatlakların oluşumu, çekme dayanımında düşüş, pembemsi renk
250 - 300°C	Alüminli ve demir oksitli bileşenlerde bünye suyunun kaybı, basınç dayanımında düşüş
300 - 400°C	Ca(OH) ₂ ’ den CaO’ e dönüşüm (% 33 hacim azalması)
400 - 600°C	CSH yapısının tahribi, gri beyaz renk, dayanımda % 80’ e varan azalma.



Şekil 5. Yüksek Sıcaklık Etkisinde Basınç Dayanım Kayıpları (%)

Tablo 10. Yangın Etkisi Deneyi Sonuçları

Numuneler	Yangın Etkisi Sonunda Basınç Dayanımları (MPa)		
	28 Günlük Beton Basınç Dayanımı	250°C	750°C
Şahit	70,42	62,23	41,71
U1	72,17	59,58	46,20
U2	63,03	53,50	45,85
U3	58,74	50,93	37,06
U4	58,13	48,11	35,45

Tablo 10’da verilen deney sonuçları ile Grafik.2’de verilen dayanım kaybı yüzdeleri sonuçları incelendiğinde 250°C sıcaklığa 2 saat maruz kalan numunelerde en az dayanım kaybı şahit numunede olmuştur. Bunun aksine 750°C sıcaklığa 2 saat maruz kalan numunelerde ise başta %20 uçucu kül içeren U2 karışımı olmak üzere tüm uçucu küllü betonlarda şahit numuneden daha az dayanım kaybı görülmektedir. Tablo 8’de belirtildiği gibi

250°C civarındaki sıcaklıklarda büzülme, kılcal çatlak oluşumu ve bünye suyu kaybindan dolayı basınç dayanımında düşüşler görülmektedir. Bu durumdan uçucu küllü numuneler daha fazla etkilenmişlerdir. Sıcaklığın 400°C'yi geçmesi ile $\text{Ca(OH)}_2\text{CaO}$ 'ya dönüşmekte, 600°C'nin üzerinde ise C-S-H yapısı tahrip olmaktadır. Uçucu kül Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek daha fazla C-S-H jeli oluşturmaktadır. Bu da 750°C'ye maruz uçucu küllü numunelerin şahit numuneye göre daha az hasar görmesine neden olmaktadır.



Şekil 6. Yangın Dayanımı Deneyi Düzeneği

3.6. Aşınma Dayanımı

Uçucu kül katkılı beton grupları için 100x100x100 mm boyutlarında küp numuneler hazırlanmış, 28 gün kür edilmiştir. Numuneler TS 2824 EN 1341 [21] standardı temel alınarak, düşey aşındırma cihazında aşındırıcı diskin numune yüzeyine 75 tur sürtünmesi sonucu gerçekleştirilmiştir. Aşınma kaybı, ortalama oyuk genişliği olarak beton hacmindeki azalma olarak ölçülmüştür. Numune yüzeyinde oluşan oyuk genişliği 3 farklı noktadan ölçülerek ortalaması alınmıştır. Aşınma deneyi sonuçları Tablo 11'de görülmektedir.

Tablo 11. Aşınma Deneyi Oyuk Derinliği Sonuçları

Numuneler	Aşınma Derinlikleri (cm)			
	C1	C2	C3	Ortalama
Şahit	2,3	2,5	2,5	2,43
U1	2,1	2,4	2,6	2,37
U2	2,0	2,2	2,4	2,20
U3	2,3	2,5	2,6	2,47
U4	2,3	2,6	2,7	2,53

Tablo 10'da verilen aşınma deney sonuçları incelendiğinde, ortalama oyuk genişliği değerleri birbirine yakın olmakla birlikte %10 ve %20 uçucu kül katkısının betonun aşınma dayanımını bir miktar iyileştirdiği görülmektedir.



Şekil 7. Aşınma Dayanımı Deney Düzeneği



Şekil 8. Aşınma Dayanımı Deney Numunesi

3.7. Ultrasonik Ses Frekansı Tayini

Ultrasonik cihazın kullanılmasıyla, betonun içerisine gönderilen ses üstü dalgaların betonun bir yüzeyinden diğerine geçme süresi ölçülmekte, dalga hızı hesaplanmaktadır. Hesaplanan sesüstü dalga hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasındaki ilişki yaklaşık olarak elde edilmektedir. Ultrasonik test yönteminin uygulanması durumunda, ölçüm yapılan betonda çatlama veya kırılma oluşmamaktadır. Bu yöntem, ‘‘hasarsız deney yöntemi’’ dir. Yapılan deneyde 100×100×100 mm’ lik kür havuzunda bulunan küp numuneler etüvde 105°C sıcaklıkta 24 saat bekletilmiş ve ölçüm cihazının numune yüzeyine denk gelen kısmına jel sürülerek yerleştirilmiştir. Her numune için frekans değerleri okunarak beton kalitesi kontrol edilmiştir. Beton bloğunun bir yüzeyinden gönderilen sesüstü dalganın, bloktaki diğer bir yüzeye ne kadar zamanda geçtiği ölçüldükten sonra, dalga hızı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$V = (S / t) \cdot 10^6 \quad (1)$$

Burada,

V = Sesüstü dalga hızı, metre/saniye

S = Beton bloğun sesüstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki mesafe, metre

T = Sesüstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı yüzeye kadar geçen zaman, mikrosaniye.

Tablo 12. Ultrasonik Ses Frekansı Deneyi Sonuçları

Numuneler	Dalga Hızı (m/s)
Şahit	4830
U1	4980
U2	4810
U3	4720
U4	4610

Tablo 12’de verilen ultrasonik ses hızı deney sonuçları, Tablo 12’ye göre değerlendirildiğinde tüm numunelerin beton kalitesi düzeyi ‘‘mükemmel’’ tespit edilmiştir. Tablo 5 ve Tablo 12 özellikleri incelendiğinde sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı sonuçlarına benzer olarak en yüksek ses hızına %10 uçucu kül içeren numuneler ulaşmıştır.



Şekil 9. Ultrasonik Ses Frekansı Deneyi Düzenegi

Tablo 13. Ultrasonik Ses Frekansı Deneyi Referans Aralıkları

Dalga Hızı, m/saniye	Beton Kalitesi
>4500	Mükemmel
3500-4500	İyi
3000-3500	Şüpheli
2000-3000	Zayıf
2000>	Çok Zayıf

4. SONUÇLAR

Beton basınç dayanımları sonuçları incelendiğinde, % 10 sugözü uçucu külü içeren betonların her üç yaşta da (28, 90 ve 180 gün) şahit betondan daha yüksek basınç dayanımı değeri verdiği, %20 uçucu kül içeren betonların ise 180 gün sonunda şahit betona yakın basınç dayanımı değeri verdiği görülmektedir. %30 ve % 40 uçucu kül katkısı basınç dayanımında bir miktar düşüşe sebep olmuştur. Bununla birlikte bu betonlardan 180 gün sonunda tatmin edici basınç dayanımları elde edilmiştir.

Eğilme dayanımı sonuçları tüm uçucu kül katkılı karışımların şahit numuneye çok yakın eğilme dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. Uçucu kül katkısının 28 günlük eğilme dayanımında şahit numuneye kıyasla bir azalmaya neden olmadığı görülmektedir. Daha uzun süreli eğilme dayanımlarının incelendiği bir çalışma yürütülmesi Sugözü uçucu külünün eğilme dayanımına etkisini daha iyi görebilmek açısından faydalı olacaktır.

%10 ve % 20 uçucu kül katkısı su emme değerlerinde şahit numuneye göre bir miktar azalmaya sebep olmaktadır. Uçucu külün çimento hamurunun boşluk yapısını iyileştirerek su emme miktarını azalttığı söylenebilir..

Kapilarite deneyi sonuçları incelendiğinde % 10 uçucu kül içeren numunenin kapilarite katsayısının şahit numuneye göre oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bununla beraber % 20 uçucu kül katkısı da kapiler su emmenin bir miktar azalmasına neden olmuştur. Uçucu külün kapiler boşluk miktarını azalttığı görülmektedir.

Yüksek sıcaklığın dayanım kaybı üzerine etkisi incelendiğinde 250 °C sıcaklığa 2 saat maruz kalan numunelerde en az dayanım kaybı şahit numunede olmuştur. Bunun aksine 750 °C sıcaklığa 2 saat maruz kalan numunelerde ise başta %20 uçucu kül içeren U2 karışımı olmak üzere tüm uçucu küllü betonlarda şahit numuneden daha az dayanım kaybı görülmektedir. Uçucu külün yüksek sıcaklığa karşı betonun direncini arttırdığı söylenebilir.

Aşınma deney sonuçları incelendiğinde, ortalama oyuk genişliği değerleri birbirine yakın olmakla birlikte %10 ve %20 uçucu kül katkısının betonun aşınma dayanımını bir miktar iyileştirdiği görülmektedir.

Ultrasonik ses hızı deney sonuçları değerlendirildiğinde tüm numunelerin beton kalitesi düzeyi ‘‘mükemmel’’ tespit edilmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına benzer olarak en yüksek ses hızına %10 uçucu kül içeren numuneler ulaşmıştır.

Yukarıda verilen sonuçlar ışığında Sugözü uçucu külünün betonda mineral katkı olarak çimento yerine ağırlıkça %10-20 aralığında kullanılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] TOKYAY, M., ERDOĞDU, K., 1998. Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu. TÇMB, AR-GE, Ankara, 69s.
- [2] ERDOĞAN, T.Y., 2003. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş., Ankara, 741s..
- [3] ASTM C 618, 1998. Standart Specification for Coal Ash and Rawor Calcined Natural Pozzolanfor Use as a Mineral Admixture in Concrete. Annual Book of ASTM Standarts, No.4.
- [4] TS EN 197-1, 2002. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [5] RAMYAR, K., 1993. Effects of Turkish Fly Ashes on the Portland Cement-Fly Ash Systems. METU, In Civil Engineering, PhD. Thesis, Ankara, 208p.
- [6] YAZICI, Ş., BARADAN, B., 1995. Uçucu Kül Katkılı Yüksek Dayanımlı Beton. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması, Bildiriler Kitabı, Ankara, s.59-71.
- [7] ERDİNÇ, M., 1995. Uçucu Küllü Betonlarda Dayanım ve Klor Geçirimsizliği. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 143s.
- [8] GÖKÇE, A., ÖZTURAN, T., 1996. Uçucu Kül Pozolanik Aktivitesi İle İlgili Bazı Mevcut Standartların Değerlendirilmesi. 4. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İTÜ Maçka Kampüsü, İstanbul, s.223-244.
- [9] ÖZCAN, M., 1997. Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Beton Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Katsayılarının Belirlenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 135s.
- [10] ATİŞ, C.D., 2000. Yüksek Oranda Uçucu Kül Kullanımı İle Üretilen Betonun Aşınma Direnci. İMO Teknik Dergi, 11(45):2217-2230.
- [11] BİLİM, C., 2001. Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Beton İçinde Kullanılabilirliği ve Hızlandırılmış Kür Uygulaması. Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Antakya, 128s.
- [12] ATİŞ, C.D., TARTICI, H., SEVİM, U.K., ÖZCAN, F., AKÇAÖZOĞLU, K., YÜZGEÇ, C., 2002. Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Beton Katkısı Olarak Kullanılabilirliği. Beşinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, s.161-168.
- [13] GÜNİNDİ İDRİS. Yumurtalık Sugözü uçucu külü içeren betonların basınç eğilme ve aşınma dayanımlarının araştırılması. Çukurova Üniversitesi Yüksek lisans tezi, 2005 ADANA.
- [14] KARAHAN OKAN. Liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonların özellikleri. Çukurova üniversitesi doktora tezi, 2006, ADANA
- [15] TS 639, 1998. Uçucu Kül. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [16] TS EN 12390-4, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 4: Basınç Dayanımı-Deney Makinelerinin Özellikleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [17] ERDOĞAN, T.Y. 2004. Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri, Çimentolar, Agregalar, Su. Türkiye Hazır Beton Birliği, Ankara, 277s.
- [18] TS EN 12390-5, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [19] TS 3624, 1981. Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [20] BARADAN BÜLENT, 2012. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık(Durabilite) syf.71. Dokuz Eylül Üniversitesi. İzmir.
- [21] TS 2428 EN 1341, 2005, Zemin Döşemesi İçin Beton Kaplama Blokları-Gerekli Şartlar ve Deney Metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.