

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**UÇUCU KÜLLERDEN SOĞUK BAĞLAMA YÖNTEMİ UYGULANARAK
ÜRETİLEN AGREGALARIN HARÇ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Nazmiye KELEŞ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**UÇUCU KÜLLERDEN SOĞUK BAĞLAMA YÖNTEMİ UYGULANARAK
ÜRETİLEN AGREGALARIN HARÇ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Nazmiye KELEŞ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2023

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UÇUCU KÜLLERDEN SOĞUK BAĞLAMA YÖNTEMİ UYGULANARAK
ÜRETİLEN AGREGALARIN HARÇ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Nazmiye KELEŞ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 27/07/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL (Danışman)

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Prof. Dr. Turhan BİLİR

ÖZET

UÇUCU KÜLLERDEN SOĞUK BAĞLAMA YÖNTEMİ UYGULANARAK ÜRETİLEN AGREGALARIN HARÇ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Nazmiye KELEŞ

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Haziran 2023; 76 sayfa

Türkiye'de yılda yaklaşık 45 milyon ton kömür yakılarak ortalama 15 milyon ton uçucu kül üretilmektedir, bu da önemli ekonomik ve çevresel sorunlara yol açmaktadır. (Güler vd. 2005). Termik santrallerde kömürün tek başına kazanlarında yakılması sırasında baca gazlarındaki taneciklerin elektro filtrelerde tutulmasıyla oluşan uçucu küller çevreye büyük oranda zarar vermektedir. Bu yüzden uçucu küllerin geri dönüşüm maddesi olarak kullanılması zamanla yaygınlaşmaya başlamıştır. Günümüzde atık maddelerin yapı sektöründe kullanılması büyük önem arz etmektedir. Doğal kaynakların giderek azalmasıyla, harç yapımında kullanılan agregaların yerine daha düşük yoğunluğa sahip hafif agregaların kullanılması tercih edilmeye başlanmıştır. Ülkemizde uçucu kül kullanımının son derece düşük olması ve çevreye verdiği zararlar göz önünde bulundurulduğunda uçucu külün yapı sektöründe kullanılması yönünde daha geniş kapsamlı araştırmaların yapılması gerektiği düşünülmüştür.

Bu çalışmada Seyitömer Termik Santralinden elde edilen uçucu kül ile soğuk bağlama yöntemi kullanılarak 40x40x160mm'lik prizmatik numuneler ile agrega üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen bu agregalara kırma yöntemi uygulanarak agregaların harç yapımında kullanımının etkisi incelenmiş ve farklı oranlarda hazırlanan numunelerin fiziksel ve mekanik testleri (yayılma çapı, birim hacim ağırlık tayini, yığın yoğunluk, görünür boşluk oranı, su emme, kılcallık, basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı gibi deneyler) yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre uçucu kül agregası oranının artmasıyla basınç dayanımında düşüş gözlenmesine rağmen, özgül basınç dayanımında bir artış gözlenmiştir. Bu durum, uçucu kül agregasının yüksek basınç yükleri altında dayanıklı bir malzeme olduğunu göstermektedir. Bu çalışma ile endüstriyel bir atık olan uçucu külün yapı sektöründe geri dönüşüm maddesi olarak kullanılması çevre kirliliğinin azalmasına, daha hafif beton üretimine ve doğal kaynakların kullanımının azalmasına fayda sağlamıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Hafif agrega, Harç karışımları, Seyitömer termik santrali, Soğuk bağlı uçucu kül agregası, Uçucu kül.

JÜRİ: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Prof. Dr. Turhan BİLİR

ABSTRACT

THE EFFECT OF FLY ASH AGGREGATE PRODUCED BY COLD BONDING METHOD ON MORTAR PROPERTIES

NAZMIYE KELEŞ

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

June 2023; 76 pages

Fly ash, produced annually by burning 45 million tons of coal in Turkey, is a major source of economic and environmental problems (Guler et al. 2005). Fly ash particles released into the atmosphere during combustion are hazardous to the environment. As such, using fly ash as a recycled material has become increasingly popular over time due to its potential for reducing natural resource consumption and lightening mortar production aggregates. Unfortunately, though, utilization rates of fly ash in our country remain low despite its positive properties; therefore, more comprehensive research should be conducted on how best to utilize this resource within the construction sector before further damage is done to our environment.

This study investigated the effect of using aggregates in mortar production by applying the cold bonding method with fly ash obtained from Seyitömer Thermal Power Plant to 40x40x160mm prismatic samples. The physical and mechanical tests conducted on these samples included spreading diameter, unit volume weight determination, bulk density, apparent void ratio, water absorption, capillarity compressive strength and bending tensile strength. Results showed that aggregate production was successful when utilizing this method and that it had a positive impact on mortar production. The test results indicate that, although the compressive strength decreased with an increase in fly ash aggregate ratio, the specific compressive strength increased. This demonstrates that fly ash aggregate is a durable material under high pressure loads and can be used as a suitable replacement for traditional materials such as cement or fine aggregate. Furthermore, this could lead to cost savings due to its lower production costs compared to other construction materials. According to this study, the use of fly ash, an industrial waste, as a recycling material in the building industry, has been shown to reduce environmental pollution, produce lighter concrete, and utilize fewer natural resources.

KEYWORDS: Cold bonded fly ash aggregate, Fly ash, Lightweight aggregate, Mortars, Seyitömer thermal power plant.

COMMITTEE: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Prof. Dr. Turhan BİLİR

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın araştırılması ve yürütülmesi süreçlerinde ilgi ve desteğini esirgemeyen,engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, her adımda yönlendirmesi ve motive eden yol göstericiliği ile çalışmamı bilimsel ilkeler bağlamında çerçvelendiren saygıdeğer danışman hocam Prof. Doç. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışma sürecinde benden hiçbir an olsun yardımlarını esirgemeyen laboratuvar arkadaşlarıma ve her zorluğun üstesinden birlikte geldiğim, hayatımın her aşamasında yanımda olan sevgili aileme ve zor zamanlarımda laboratuvara yardıma gelen kardeşim Gülsüm KELEŞ'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu çalışmayı bilim ışığında araştırmayı, öğrenmeyi ve geliştirmeyi seven eğitimcilere, bilim adamlarına, bilgi paylaşımına önem veren akademisyenlere, benzer konularla ilgilenen meslektaşlarıma atfediyorum. Bilim ve keşifler, insanlığın ilerlemesi ve sorunların çözülmesi için çok önemlidir. Bu çalışmanın da gelecekteki araştırmalara katkıda bulunabileceğine inanıyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1 GİRİŞ.....	1
2 KAYNAK TARAMASI	4
2.1 Uçucu Kül	4
2.1.1 Uçucu Kül Tanımı ve Karakteristikleri.....	4
2.1.2 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması	5
2.1.3 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri	6
2.1.4 Uçucu Küllerin Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri.....	6
2.1.5 Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Kullanım Alanları	9
2.1.6 Uçucu külün agrega olarak kullanımı	11
2.2 Çimento.....	12
2.3 Agrega.....	12
2.3.1 Agregaların sınıflandırılması	13
2.3.2 Agregaların fiziksel özellikleri.....	14
2.3.3 Agrega granülometrisi (tane büyüklüğü dağılımı).....	18
2.3.4 Agregaların mekanik özellikleri.....	19
2.3.5 Agregada bulunabilecek zararlı maddeler.....	20
3 MATERYAL VE METOT	21
3.1 MATERYAL	21
3.1.1 Agrega	21
3.1.2 Bağlayıcı	23
3.1.3 Karışım Suyu.....	24
3.1.4 Süper Akışkanlaştırıcı	24
3.2 METOT.....	24
3.2.1 Karışımların hesaplanması ve hazırlanması.....	24
3.2.2 Uçucu kül üzerinde yapılan deneyler	25

3.2.3	Agregalar üzerinde yapılan deneyler	26
3.2.4	Taze harçlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler.....	35
3.2.5	Sertleşmiş harçların fiziksel deneyleri	37
3.2.6	Sertleşmiş harçların ve UKA hamurunun mekanik deneyleri.....	39
4	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
4.1	Harç Bileşenlerinin Fiziksel Deney Bulguları	43
4.1.1	Fiziksel deney bulguları	43
4.2	Harçların Taze Hal Deney Bulguları	45
4.3	Sertleşmiş Fiziksel Hal Deney Bulguları.....	46
4.3.1	Kuru yığın yoğunluk değerleri	46
4.3.2	SDKY yığın yoğunluk değerleri	48
4.3.3	Karışımların görünür boşluk değerleri (GBO).....	49
4.3.4	Su emme yüzdesi değerleri	50
4.3.5	Kılcal geçirimsizlik deneyi bulguları	52
4.4	Soğuk Bağlanmış Agregaların Mekanik Hal Deneyi Bulguları	55
4.4.1	Uçucu kül agregalarının eğilmede çekme dayanım değerleri.....	55
4.4.2	Uçucu kül agregalarının basınç dayanım değerleri.....	56
4.5	Sertleşmiş Harçlarda Mekanik Hal Deneyi Bulguları	56
4.5.1	Eğilmede çekme dayanımı değerleri.....	56
4.5.2	Basınç dayanımı değerleri.....	58
4.5.3	Mekanik deneylerden elde edilen gerilme şekil değiştirme grafikleri	61
4.6	Kimyasal analiz sonuçları	65
4.7	Özgül Dayanım	66
5	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	68
6	KAYNAKLAR.....	71
	ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Uçucu Küllerden Soğuk Bağlama Yöntemi Uygulanarak Üretilen Agregaların Harç Özelliklerine Etkisi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

...../...../20....

Öğrencinin Adı Soyadı

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	: Yüzde
°C	: Santigrat Derece
A	: Kuru birim ağırlık
A	: Suyu temas eden yüzeyin alanı (cm ²)
A	: Yüknün uygulandığı kesit alanı (mm ²)
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
b	: Numune genişliği
B	: Görünür birim ağırlık
C	: Görünür boşluk oranı
CaO	: Kalsiyum Oksit
cm	: Santimetre
cm ²	: Santimetre Kare
D	: Ağırlıkça su emme oranı
dm	: Desimetre
Fe ₂ O ₃	: Hematit
g	: Gram
h	: Numune yüksekliği
kg	: Kilogram
l	: Litre
L	: Yükleme tablası mesnetler arasındaki açıklık
M1	: Numunenin etüv kurusu ağırlığı
M ₁	: Boş ölçü kabı kütlesi
m ₁	: Kabin ağırlığı
M2	: Numunenin DKY durumdaki ağırlığı

m_2	: Kabın ve taze harcın ağırlığı
M_2	: Ölçü kabı ve deney numunesinin kütlesi
mg	: Miligram
m_i	: İnce agreganın su emme oranı
mm	: Milimetre
P	: Maksimum yük
Q	: Emilen su miktarı
SiO ₂	: Silisyum dioksit
t	: Zaman (sn)
V	: Hacim
W_1	: Numunenin etüv kurusu ağırlığı
W_2	: SDKY ağırlığı
W_3	: Su içindeki ağırlık
ε_1	: 5×10^{-05} değerindeki birim şekil değiştirme miktarı
ε_2	: σ_2 değerindeki birim şekil değiştirme miktarı
ρ_m	: Taze harç birim hacim ağırlığı
ρ_b	: Gevşek yığın yoğunluğu
ρ_s	: Sıkışık yığın yoğunluğu
σ	: Basınç dayanımı
σ_1	: 5×10^{-05} değerindeki birim şekil değiştirmesine karşılık gelen gerilme miktarı
σ_2	: $(\sigma_{max}) \times 0,4$ değerine eşit olan gerilme miktarı
μm	: Mikrometre

Bu tez çalışmasında, ondalık ayırıcı olarak “virgöl (,)” kullanılmıştır.

Kısaltmalar

UK : Uçucu Kül

UKA : Uçucu Kül Agregası

KKA : Kırma Kum Agregası

TS EN : Türk Standartları Enstitüsü

BHA : Birim Hacim Ağırlık

GBO : Görünür Boşluk Oranı

SDKY: Suya Doygun Kuru Yüzey

DKY : Doygun Kuru Yüzey

XRF : X Işını Flüoresans

XRD : X Işını Difraktometresi

ACI : American Concrete Institute

ASTM: American Society for Testing Materials

KBA : Kuru birim ağırlık

LOI : Loss on Ignition. (Kızdırma kaybı)

SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

SEY : Su Emme Yüzdesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Seyitömer uçucu külü	4
Şekil 2.2. İngiltere’deki termik santrallerden sağlanan UK’lerin kullanım alanları.....	11
Şekil 3.1. Ortalama UKA ve KKA gradasyon eğrisi	23
Şekil 3.2. (a) Uçucu kül agregası; (b) Kırma kum agregası	23
Şekil 3.3. (a) Agreg a hamurunun kalıptan çıkarılması; (b) Harçların kalıptan çıkarılması; (c) Harçların kür tankına konulması.....	24
Şekil 3.4. Le Chatelier Balonu	26
Şekil 3.5. Hamur veya harç karışımının hazırlandığı mikser.....	27
Şekil 3.6. (a) UKA hamurunun kıvam tayini; (b) Hamurun kalıplara yerleştirilmesi....	28
Şekil 3.7. (a) Numunelerin kalıptan çıkarılması; (b) Numunelerin plastik poşetlere sarılması	28
Şekil 3.8. Numunelerin plastik poşetten çıkarılması	29
Şekil 3.9. UKA’nın laboratuvar tipi çeneli kırıcıda ince agrega haline getirilmesi.....	29
Şekil 3.10. (a) UKA’nın büyük boyutlar halinde çeneli kırıcıda kırılması; (b) Büyük boyutlu UKA’nın çeneli kırıcıda küçültülmesi; (c) 4mm elekten geçmeyen UKA’nın manuel olarak kırılması; (d) UKA’nın 4mm elekten geçirilmesi	30
Şekil 3.11. (a) Isıtıcı plaka yardımıyla UKA agregalarının SDKY hale getirilmesi; (b) Abrams konisi ile SDKY hal tayini; (c) SDKY haldeki UKA agregalar.....	32
Şekil 3.12. (a) Isıtıcı plaka yardımıyla KKA agregalarının SDKY hale getirilmesi; (b) Abrams konisi ile SDKY hal tayini; (c) SDKY haldeki KKA agregalar.....	32
Şekil 3.13. Agregaların su emme değerlerini hesaplamada kullanılan nem ölçüm cihazı	33
Şekil 3.14. (a) KKA’nın sıkışık birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi; (b) KKA’nın gevşek ve sıkışık birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi; (c) UKA’nın sıkışık birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi; (d) UKA’nın gevşek ve sıkışık birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi	34
Şekil 3.15. (a) Akma tablası üzerinde kesik koni düzeneği; (b) Akma tablası deneyi....	35
Şekil 3.16. Taze harcın birim hacim ağırlık tayini.....	37
Şekil 3.17. (a) Parafinle izole edilen numuneler; (b) Kılcal geçirimsizlik tayini deney düzeneği; (c) Kılcal geçirimsizlik deneyi.....	39
Şekil 3.18. (a) UKA üç nokta eğilme deneyi düzeneği; (b) UKA deney sonrası numune görünümü; (c) Sertleşmiş harçların üç nokta eğilme deneyi düzeneği	40
Şekil 3.19. (a) UKA Basınç dayanımı tayini öncesi; (b) UKA deney sonrası numune görünümü; (c) Sertleşmiş harçların basınç dayanımı tayini öncesi; (d) Sertleşmiş harçların deney sonrası numune görünümü	41
Şekil 4.1. Karışımların kuru yığın yoğunluk değerleri	47
Şekil 4.2. Karışımların SDKY yığın yoğunluk değerleri.....	49
Şekil 4.3. Karışımların görünür boşluk değerleri	50
Şekil 4.4. Karışımların kütlece SEY (su emme yüzdesi) değerleri.....	51
Şekil 4.5. Sertleşmiş harç karışımlarının 7 günlük kılcal su emme katsayı değerleri	54

Şekil 4.6. Sertleşmiş harç karışımlarının 28 günlük kılcal su emme katsayı değerleri ..	55
Şekil 4.7. Uçucu kül agregası numunesinin eğilmede çekme dayanım testi sonrası kırılma yüzeyi.....	55
Şekil 4.8. Karışımların eğilmede çekme dayanımı değerleri (MPa).....	58
Şekil 4.9. Karışımların basınç dayanımı değerleri (MPa)	61
Şekil 4.10. Karışımların basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	63
Şekil 4.11. Karışımların basınç yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	63
Şekil 4.12. Karışımların eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	64
Şekil 4.13. Karışımların eğilme yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	65
Şekil 4.14. Karışımların özgül eğilme dayanımı	67
Şekil 4.15. Karışımların özgül basınç dayanımı	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Türkiye'de bulunan bazı uçucu küllerin kimyasal bileşenleri	8
Çizelge 2.2. Türkiye'deki çeşitli uçucu küllerin mineralojik bileşenleri.....	9
Çizelge 2.3. İnşaat sektöründe uçucu küllerin kullanıldığı yerler	10
Çizelge 2.4. Uçucu kül agregası kuru ve suya doymuş yüzey kuru özgül ağırlığı.....	17
Çizelge 3.1. Seyitömer uçucu külün kimyasal bileşimi	22
Çizelge 3.2. Karışımlara giren bileşen miktarları (kg/m^3).....	25
Çizelge 3.3 Uçucu kül agregası birim hacim karışım oranları.....	26
Çizelge 4.1. Bileşenlerin özgül ağırlıkları	43
Çizelge 4.3. Agregaların gevşek ve sıkışık birim hacim ağırlıkları.....	44
Çizelge 4.4. Agregaların incelik modülleri.....	45
Çizelge 4.5. Taze haldeki harçların birim hacim ağırlık ve yayılma çapı değerleri	45
Çizelge 4.6. Karışımların kuru yığın yoğunluk değerleri (g/cm^3)	47
Çizelge 4.7. Karışımların SDKY yığın yoğunluk değerleri (g/cm^3).....	48
Çizelge 4.8. Karışımların görünür boşluk değerleri (%).....	50
Çizelge 4.9. Karışımların SEY değerleri (g/cm^3)	51
Çizelge 4.10. Sertleşmiş harç karışımlarının 7 günlük kılcal su emme katsayıları ($\times 10^{-3}$ $\text{cm/sn}^{1/2}$)	53
Çizelge 4.11. Sertleşmiş harç karışımlarının 28 günlük kılcal su emme katsayıları ($\times 10^{-3}$ $\text{cm/sn}^{1/2}$)	54
Çizelge 4.12. Karışımların eğilmede çekme dayanımı değerleri (MPa).....	57
Çizelge 4.13. Karışımların basınç dayanımı değerleri (MPa).....	61

1 GİRİŞ

Dünya genelinde nüfus artışıyla birlikte ekonomik faaliyetler de artmakta ve doğal çevre hızla bozulmaktadır. Bu nedenle, doğal kaynakların korunması tüm dünya için önemli bir sorumluluk taşımaktadır. Nüfus artışıyla birlikte insanlar daha fazla konut, yol, köprü ve diğer yapılar inşa etmek için yaşam alanları oluşturma ihtiyacı duymaktadır. Ayrıca zamanla eski yapıların yenilenmesi gerekmektedir. Yapıların inşası için en yaygın kullanılan malzeme betondur. Ancak beton üretimi sırasında doğal kaynaklar büyük ölçüde tüketilmekte ve çevresel kirlilik artmaktadır. Bu durumda, çevresel etkileri azaltmak için alternatif yöntemler ve malzemelerin kullanılması gerekmektedir (Yılmaz 2013).

Son yıllarda, beton üretiminde atık maddelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Özellikle uçucu kül vb. atıklar, birçok beton üretiminde kullanılmaktadır. Bu atık maddeler, artık doğal malzemeler gibi kabul edilmekte ve ince agregaya benzer şekilde işlenmektedir. Bu yaklaşım hem çevresel açıdan sürdürülebilirlik sağlamak hem de atık maddelerin geri dönüşümüne katkıda bulunmaktadır.

Uçucu külün büyük miktarda atık olarak ortaya çıkması hem ekonomik hem de çevresel sorunları beraberinde getirir. Ancak uçucu kül, geri dönüştürülebilir bir atık olarak değerlendirilebilir ve farklı sektörlerde kullanılabilecek potansiyele sahiptir. İnşaat sektörü bu sektörlerin lideridir. Uçucu kül, inşaat sektöründe çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Aruntaş (2006) çalışması, uçucu külün geniş bir kullanım alanına sahip olduğunu göstermektedir. Uçucu kül, çimento üretiminde çimento katkısı olarak kullanılabilirdiği gibi, beton üretiminde de kullanılabilir. Ek olarak, agrega üretimi sadece beton üretiminde değil, aynı zamanda kerpiç, tuğla, gaz beton ve yalıtım malzemeleri gibi çeşitli yapı malzemelerinin üretiminde de kullanılabilir. Ayrıca uçucu kül baraj ve yol yapımında, geoteknik uygulamalarda da kullanılan bir malzemedir.

Uçucu kül kullanımının Amerika'da başlayıp kısa sürede tüm dünyaya yayılması, başta inşaat sektörü olmak üzere birçok sektörde önemli bir rol oynamaktadır. Uçucu kül, geniş bir kullanım alanına sahip olan bir malzemedir ve birçok sektörde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu sektörlerden bazıları inşaat ve kimya sektörü, tarım alanları, seramik, cam, döküm-metal sanayii, sondaj çalışmaları ve diğer alanlar olarak sıralanabilir. Ancak, inşaat sektörü uçucu külü en çok kullanan ve teknik açıdan en çok faydalanan sektördür (Aruntaş 2006).

Dünya çapında üretilen uçucu külün önemli bir kısmı maalesef değerlendirilememiştir. Ghazali ve Kaushal (2015) tarafından yapılan araştırmaya göre, Hollanda, Danimarka ve İtalya gibi ülkeler uçucu külün neredeyse tamamını kullanırken, Fransa, Avustralya ve Almanya gibi ülkeler %80'in üzerinde kullanıyor. Ne yazık ki, ülkemizde uçucu külün sadece %2'sinin değerlendirildiği bilinmektedir (Binal 2016).

Termik santrallerden çıkan uçucu kül atıklarının işlenmesinin odak alanlarından biri, bunların beton için ham madde olarak ve ayrıca yapay agrega üretimi için kullanılmasıdır. Uçucu kül atıklarının beton teknolojisinde kullanımı, çakıl ve kırma taş gibi doğal agregaların eksikliği ve bunların birikintilerinin tükenmesi nedeniyle önemlidir. Ayrıca bu durum çevre kirliliğinin de azalmasına da katkı sağlamaktadır (Usanova ve Barabanshchikov 2020).

Uçucu külün sinterlenerek yapay iri hafif agregaya dönüştürülmesi ve hafif beton yapımında kullanılmasıyla ilgili birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda, uçucu külün yüksek sıcaklıkta işlenerek elde edilen hafif agregaların beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Uçucu kül ve Portland Çimentosu karışımına eklenen iri hafif agregaların kullanımıyla hafif beton üretimi gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Chang ve Shieh (1996) ile Gesoğlu vd. (2004) tarafından yapılan çalışmalarda, bu yöntemin taşıyıcı betonların elde edilmesinde etkili olduğunu ortaya koyulmuştur.

Dünya genelinde yılda yaklaşık 600 milyon ton uçucu kül üretilmektedir. Türkiye'de ise on bir termik santral vardır: Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy. Bu santrallerin yılda ortalama 13 milyon ton uçucu kül ürettiği tahmin ediliyor. Bununla birlikte, doğalgaz santrallerinin faaliyete geçmesiyle bu miktar her yıl değişmektedir. ABD'de bu miktar 45 milyon ton/yıl ve Hindistan'da ise 50 milyon ton/yıl civarındadır. (Türker ve ark. 2009).

Bütün dünyada üretilen uçucu külün (UK) sadece %20'si değerlendirilmektedir. Bazı ülkelerde, özellikle Almanya, Hollanda ve Belçika gibi Avrupa ülkelerinde, uçucu külün kullanım oranı oldukça yüksektir ve oran olarak bakıldığında %95'ten fazladır. İngiltere'de ise bu oran yaklaşık %50'dir. Çin ve Amerika Birleşik Devletleri, uçucu kül üretiminde önde gelen ülkelerdir ve uçucu kül kullanımı sırasıyla yaklaşık %32 ve %40'tır. Bununla birlikte 1990 yılına ait verilere göre uçucu kül kullanım oranının %1'den daha az olduğu belirtilmiştir. Bu veriler, Türkiye'nin diğer ülkelere kıyasla uçucu külün daha az bir oranını değerlendirdiğini göstermektedir (Neville ve Brooks, 1987; Aruntaş, 2006).

Yapay hafif agrega, hafif beton yapılarda potansiyel uygulamalar bulur ve bu tür agregalar, uçucu külün soğuk bağlanmasından üretilir. Düşük enerji tüketiminde uçucu kül kullanarak yapay hafif agrega üretmek için uygun maliyetli bir yöntem geliştirmeye yönelik geçmişte önemli çalışmalar yapılmıştır (Green et al. 2011; Kockal ve Ozturan 2010; Bijen 1986). Disk peletleyici ve briket sıkıştırma tekniği gibi üretim yöntemleri, uçucu kül kullanılarak agregaların seri üretimi için birçok çalışmada yaygın olarak kullanılmıştır (Manikandan and Ramamurthy 2007; Shanmugasundaram et al. 2010).

Uçucu kül agregalarının sertleştirme işlemi iki aşamadan oluşur: normal oda sıcaklığında havayla kurutma yoluyla soğuk bağlama ve daha yüksek sıcaklıkta daha fazla sinterleme (yakma). C sınıfı uçucu külden üretilen soğuk bağlı agregaların, F sınıfı uçucu küle göre daha güçlü ve stabil olduğu daha önceki çalışmalardan da anlaşılmaktadır. Bu, F sınıfı uçucu kül agregasının soğuk bağını iyileştirmek için kimyasal aktivatörün eklenmesini gerektirir (Jo et al. 2007).

Geleneksel agregalı beton için karışım tasarım prosedürü, gerekli hedef mukavemeti ve işlenebilirliği elde etmek için belirleyici bir prosedüre sahiptir. Bununla birlikte, hafif beton karışımı tasarımı, dikkatli bir karışım tasarımı prosedürü tarafından yönetilir, çünkü agregalar doğası gereği gözeneklidir, bu da bir başlangıç doygunluğu gerektirir ve istenen işlenebilirliği elde etmek için su talebini daha da artırır (ACI 1998; Ramamurthy and Harikrishnan 2006). Üretimden sonra hafif agregaların yeterli şekilde kürlenmesi, betona dahil edildiğinde daha iyi bir performans göstermesi için gereklidir. Hızlandırılmış buhar kürüne tabi tutulan hafif agregalı beton numune, sızdırmaz ve hava kürlü beton numuneye kıyasla daha yüksek basınç dayanımı sergilemiştir (Shannag 2011). %12-15 öğütülmüş

granüle yüksek fırın cürufu ve pirinç kabuğu külü karışımı ile üretilen soğuk bağlı uçucu kül agregası, agreganın daha yüksek mukavemet özelliklerini göstermiştir (Kockal 2011). Isı ve polimer işlemi ile üretilen sinterlenmiş uçucu kül hafif agrega, mukavemetlerini, daha düşük su emilimini ve puzolanik aktiviteyi geliştirir. Buna göre, agregaların özellikleri mikro-yapısal oluşumlarında farklılık gösterir. Daha yüksek sıcaklıkta (1200–1300 °C) sinterlenmiş uçucu kül agregası durumunda, SEM analizi gözenek alanında azalma göstermiştir (Shondeep 1992). Çeşitli araştırma çalışmalarının özeti, yüksek mukavemetli uçucu kül agregaları üretmenin çeşitli yönlerini gösterir. Ek olarak, kompozit performansı, agreganın mukavemetine ve dikkatli beton karışımı tasarım prosedürüne bağlıdır (Gomathi 2015).

Termik santrallerin uçucu kül atığı, agrega üretiminde kullanılarak hem çevresel sorunların ortadan kaldırılmasına hem de atığın geri dönüşümünün sağlanmasına katkı sağlayabilir. Bu çalışmada, Seyitömer termik santralinden çevreye atılan uçucu külün geri dönüşümü için soğuk bağlama yöntemi ile farklı oranlarda harç agregası üretimi yapılmış ve bu agregaların harç özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu şekilde, hafif harç kalitesinin iyileştirilmesi, çevresel sorunların azaltılması ve beton üretim maliyetlerinin düşürülmesi hedeflenmiştir.

2 KAYNAK TARAMASI

2.1 Uçucu Kül

2.1.1 Uçucu Kül Tanımı ve Karakteristikleri

Uçucu kül, kömürün yanması sırasında oluşan atıklardan biridir ve genellikle kömürle çalışan elektrik üretim tesislerinde yan ürün olarak ortaya çıkar.

Elektrik üretimi sırasında kömür gazları yanarken ortaya çıkan ince cam tozu uçucu kül olarak adlandırılır ve geri kazanılır. Bu uçucu kül, farklı endüstrilerde çeşitli amaçlarla kullanılabilir (Attarde vd. 2014). Uçucu kül, elektrostatik çöktürücüler kullanılarak veya genellikle filtre torbaları olarak adlandırılan filtre kumaş toplayıcılarda baca gazlarından yakalanır. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri yakma yöntemlerine, kömür kaynağına ve partikül şekline göre değişir (Rossow 2003).

Uçucu kül, genellikle portland çimentosu ve kireçten daha ince bir yapıya sahiptir. Uçucu kül, tipik olarak 10 ila 100 mikron arasında değişen silt boyutlu parçacıklardan oluşan küresel şekilli bir malzemedir. Bu küçük cam küreler, taze betonun akışkanlığını ve işlenebilirliğini artırır. İncelik özelliği, uçucu külün puzolanik reaktivitesine katkıda bulunan önemli bir özelliktir. Uçucu kül, çoğunlukla silisyum dioksit, alüminyum oksit ve kalsiyum oksitlerinden oluşur. Magnezyum, potasyum, sodyum, titanyum ve kükürt de daha az oranda bulunur (Rossow 2003).

Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip olan ve çok ince taneli olarak elde edilen uçucu küllerin görüntüsü griye yakın bir renktedir. Bu çalışmada kullanılan Seyitömer uçucu külü örneği aşağıda gösterilen Şekil 2.1.'deki gibidir.



Şekil 2.1. Seyitömer uçucu külü

Genel olarak, uçucu kül, puzolanik reaktivitesi, inceliği ve betonun performansını iyileştirme kabiliyeti açısından değerlidir. Mukavemet, dayanıklılık, işlenebilirlik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli ölçüde faydalıdır.

2.1.2 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küllerin kimyasal bileşenlerine göre sınıflandırılmasında ASTM C 618 (American Society for Testing and Materials) ve TS EN 197-1 (Türk Standartları Enstitüsü-European Norm) standartları kullanılır.

ASTM C 618 standartlarına göre uçucu küller F ve C sınıflarında kategorize edilmiştir. F sınıfı, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplam yüzdesi %70'ten fazla olan bitümlü kömürden elde edilir. Bu uçucu küllerin CaO yüzdesi tipik olarak %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak adlandırılır. F sınıfı uçucu kül, puzolanik özelliklere sahiptir.

C sınıfı uçucu kül, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarının %50'den fazlasını içeren linyit veya yarı-bitümlü kömürden elde edilir. C sınıfı uçucu kül, CaO'nun %10'dan fazla olması nedeniyle yüksek kireçli uçucu kül olarak da bilinir. C sınıfı uçucu kül bağlayıcı ve puzolanik özellikler gösterir.

Uçucu kül, TS EN 197-1'e göre silisi (V) ve kalkersi (W) olarak iki sınıfa ayrılır. V sınıfı uçucu kül, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden oluşan ince bir tozdan oluşur. Bu tür küllerin çoğu, alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum dioksit (SiO_2) gibi reaktif bileşenlerden oluşur. Demir oksit ve diğer bileşenler kalan kısmı oluşturur. Bu küllerde reaktif kireç (CaO) oranı %10'dan az, reaktif silis oranı %25'ten fazla olmalıdır.

W sınıfı uçucu kül, çimento ve beton üretiminde kullanılan önemli ince toz yapıda olan malzemelerdir ve hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri sayesinde çeşitli avantajlar sağlayabilirler. Bu tür uçucu kül genellikle CaO, SiO_2 ve Al_2O_3 bileşenlerinden oluşur, ayrıca Fe_2O_3 gibi demir oksit ve diğer bileşenleri içerebilir. Uçucu külün puzolanik özellik gösterebilmesi için reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis (SiO_2) oranının da %25'ten fazla olması gerekmektedir (Türker vd. 2009; Çinçin 2015; Gürbüz 2009).

Uçucu kül, kimyasal kompozisyonlarına bağlı olarak farklı kategorilere ayrılmaktadır. Silikoalüminoz uçucu kül, taş kömüründen elde edilen ve temel olarak silikoalüminat bileşiklerinden oluşan kül, Sulfokalsik uçucu kül ise linyit kömüründen elde edilen kül, diğerlerine göre daha yüksek miktarda SO_3 ve CaO içerirler. Silikokalsik uçucu kül ise genellikle linyit kömüründen elde edilir ve yüksek miktarda kireç (CaO) ve silika (SiO_2) içerirler. (Çelik, 2004).

Uçucu külün içerdiği analitik CaO miktarına dayanan bir başka sınıflandırma yöntemi ise son zamanlarda daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, uçucu külde CaO miktarının %10'un altında olması düşük kireçli ya da düşük kalsiyumlu uçucu kül olarak adlandırılır. %10'un üzerinde olması ise yüksek kireçli ya da yüksek kalsiyumlu uçucu kül olarak adlandırılır (Çelik 2004).

ASTM C 618'e göre uçucu kül, iki geniş kategoriye ayrılmaktadır (ASTM C 618, 1991). ASTM C 618 standardına göre, silikoalüminoz uçucu kül F sınıfına, silikokalsik uçucu külün bir kısmı C sınıfına Sulfokalsik uçucu kül ise C sınıfına aittir. Bu sınıflandırma, uçucu külün kimyasal bileşimi ve özelliklerine dayanır. Silikoalüminoz uçucu kül, genellikle silikoalüminatlardan oluşur ve F sınıfında sınıflandırılırken,

silikokalsik uçucu küller ve sülfokalsik uçucu küller, kalsiyum (CaO) ve sülfat (SO₃) içeriği gibi faktörlere bağlı olarak C sınıfına girerler.

Uçucu kül, betonda mineral katkı olarak kullanıldığında, kimyasal bileşimine göre C Sınıfı veya F Sınıfı kül olarak sınıflandırılır. Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) Spesifikasyonu C 618, C Sınıfı ve F Sınıfı uçucu külün kimyasal bileşimini tanımlar. C sınıfı küller genellikle alt bitümlü kömürlerden elde edilir ve esas olarak kalsiyum alümino-sülfat camının yanı sıra kuvars, trikalsiyum alüminat ve serbest kireçten (CaO) oluşur. C sınıfı kül, tipik olarak yüzde 20'den fazla CaO içerdiğinden yüksek kalsiyumlu uçucu kül olarak da adlandırılır. F Sınıfı küller tipik olarak bitümlü ve antrasit kömürlerden elde edilir ve kuvars, mullit ve manyetit de bulunan birincil olarak bir alümino-silikat camdan oluşur. F sınıfı veya düşük kalsiyumlu uçucu kül, betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için kullanılan puzolanik bir malzemedir ve CaO içeriği yüzde 10'dan daha azdır (Rossow 2003).

2.1.3 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Kimyasal ve mineral bileşenlerine bağlı olarak uçucu kül ten renginden koyu griye kadar değişebilir. Yüksek kireç seviyeleri genellikle ten renginde ve açık renklerde görülür. Kahverengimsi bir renk genellikle demirle bağlantılıdır. Koyu griden siyaha bir renk, genellikle yüksek yanmamış karbon içerdiğini gösterir. Genel olarak, uçucu kül rengi her kömür kaynağı ve santral için çok benzerdir (Rossow 2003).

Uçucu küllerin yoğunluğu 1.900-2.800 kg/m³ tür. Gevşek birim hacim ağırlıkları 800-1.100 kg/m³ tür. İri tanelerin yapısı nedeniyle, iri küller ince küllerden daha düşük yoğunluğa sahiptir. Ayrıca, yüksek demir içeren uçucu küller, yüksek alümina, silika ve karbon içeren küllere göre daha yoğundur (Akgül ve Yoncacı 2021).

Kömürün pulverize olma derecesi, termik santraldeki yakma işlemi, sonraki soğutma hızı ve elektro filtrelerin özellikleri uçucu küllerin inceliğini belirler. Uçucu kül tane boyutları tipik olarak 0,1-200 µm'dir. Linyit külleri ve kızdırma kaybı yüksek küller, daha iri tanelere sıklıkla rastlanır. Tane boyu analizi, uçucu külün yanma verimini tahmin etmek ve üretilen külün kullanım potansiyelini değerlendirmek için çok önemlidir (Akgül ve Yoncacı 2021).

2.1.4 Uçucu Küllerin Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri

Uçucu külün kimyasal bileşimi kullanılan kömürün özelliklerine ve proses koşullarına bağlı olarak değişir. (Türker vd. 2009). Bu nedenle, uçucu külün kimyasal bileşimini belirlemek için kömür örneği almak ve uygun analizler yapmak önemlidir. Uçucu külde yer alan temel bileşenler; silika (SiO₂), alümina (Al₂O₃), demir oksit (Fe₂O₃) ve CaO olup bunların miktarları ve bileşimleri, kullanılan kömürün özelliklerine ve proses parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca, uçucu külde SO₃ (kükürt trioksit), MgO (magnezyum oksit) ve alkali oksitler gibi diğer bileşenler de bulunabilir. Uçucu kül, yanma sürecindeki kömür ve diğer yanıcı malzemelerin bileşimine bağlı olarak yanmamış karbon ve bazı eser elementleri içerebilir. Bunlar arasında titanyum (Ti), fosfor (P), berilyum (Be), mangan (Mn) ve molibden (Mo) gibi elementler yer alabilir (Gökhan vd. 2009).

Uçucu kül sınıfları arasındaki temel fark, uçucu küldeki kimyasal bileşim miktarıdır. Bir uçucu külün kalitesi, uçucu özelliklerden (kömür), yakıtların birlikte yakılmasından, yanma ve baca gazı temizleme/toplama işlemlerinin çeşitli yönlerinden etkilenir. Betonda kullanım için uçucu külün en önemli yönleri Kızdırma Kaybı (LOI), incelik, kimyasal bileşim ve homojenliktir (Joel 2020).

Uçucu külün bazı tiplerinde yüksek miktarda CaO bulunması, uçucu külün kömürden kaynaklanan yanmamış karbon parçacıkları içermesinden kaynaklanabilir. Bu yanmamış karbon parçacıkları, uçucu kül bacadan toplandığında içerisinde kalabilir ve kalsiyum oksit (CaO) olarak analiz edilebilir (Çinçin 2015).

Ayrıca, kömürün içerdiği hidratlar veya karbonatlar da kızdırma sırasında bozularak bağlanmamış su veya CO₂ olarak kayba neden olabilir. Bu da kızdırma kaybı olarak adlandırılır. Kızdırma kaybı, kömürdeki yanmamış karbona ek olarak bağlanmamış su veya CO₂ kaybını da içerir. Kızdırma kaybı genellikle %1 ile %10 arasında değişir (Gürbüz 2009).

Çizelge 2.1'de verilen veriler, TS 639 ve ASTM C 618 gibi standartlara göre Türkiye'de elde edilen uçucu kül örneklerinin bileşimlerini ve özelliklerini belirli sınırlar içinde değerlendirmiştir (Tokyay 1993). Ancak bu sınırlar, uçucu külün kullanılacağı uygulama veya endüstriye göre değişebilir.

Çizelge 2.1. Türkiye'de bulunan bazı uçucu küllerin kimyasal bileşenleri

Bileşim (%)	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan	TS 639 Sınırları	ASTM C 618 Sınırları	
						F	C
SiO ₂	27.4	56.8	58.89	49.13	-	-	-
Al ₂ O ₃	12.8	24.1	21.89	15.04	-	-	-
Fe ₂ O ₃	5.5	6.8	9.31	8.25	-	-	-
S+A+F	45.7	87.7	89.79	72.42	>70	>70	>50
CaO	47.0	1.4	4.43	13.2	-	-	-
MgO	2.5	2.4	1.41	4.76	<5	<5	<5
Na ₂ O	(N+K) 0.3	(N+K) 0.3	0.24	2.2	-	<1.5	<1.5
K ₂ O	-	-	1.81	1.76	-	-	-
SO ₃	6.2	2.9	0.41	3.84	<5	<5	<5
K. K	2.4	0.6	1.39	0.72	<10	<12	<6

Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal bileşimlerinden ziyade mineralojik yapılarıyla ilişkilidir. Puzolanik özellik, uçucu külün çimento ile reaksiyona girerek hidratasyon sürecini hızlandırması ve betonun mekanik özelliklerini iyileştirmesi anlamına gelir.

Düşük kireçli uçucu küllerin ana aktif bileşeni amorf veya camsı bir faz olan alüminat ve silistir. Bu tür uçucu küllerin puzolanik özellikleri, rutubetli ortamda sönmüş kireç (Ca(OH)₂) ile reaksiyona girme yeteneklerine bağlıdır. Yüksek kireçli uçucu küller, içerdikleri serbest kireç, amorf silis, alümina ve trikalsiyum alüminat gibi maddeler nedeniyle hem puzolanik hem de bağlayıcı özellikler gösterebilir. Yüksek kireçli uçucu küller, düşük kireçli uçucu küllerden daha az camsı faz içerir. Bu camsı faz, hidratasyon sürecinde hidrat üretimini teşvik eder ve betonun dayanıklılığını artırır. Yüksek kireçli uçucu küllerde ise, bağlayıcı özelliklerin yanı sıra puzolanik özellikler de ön plana çıkabilir. Bu nedenle, uçucu külün kireç içeriği puzolanik özelliklerini ve bağlayıcı özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Düşük kireçli uçucu küllerde daha yüksek miktarda silis-alüminat camsı fazı bulunurken, yüksek kireçli uçucu küllerde daha fazla bağlayıcı özellik gösteren bileşenler bulunabilir (Kaplan ve Gültekin 2010).

Çizelge 2.2, Türkiye'deki belirli uçucu küllerin mineralojik bileşenlerini göstermektedir (Tokyay 1993).

Çizelge 2.2. Türkiye'deki çeşitli uçucu küllerin mineralojik bileşenleri

Mineral, %	Uçucu kül					
	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma B	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1.0	18.1	1.2	4.3	8.8	6.0
Kuvartz	4.5	10.9	5.6	5.1	13.9	22.4
Manyetit	0.8	0.2	2.5	0.6	4.1	2.9
Hematit	4.0	0.1	6.0	2.0	3.0	7.0
Anhidrit	12.2	-	9.3	7.4	-	-
Serbest CaO	18.6	0.7	5.5	9.8	0.9	1.0
Plajiyoklaz	~28	-	~15	~20	-	~25
Camsı ve amorf faz	~30	~70	~50	~50	~70	~35

2.1.5 Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Kullanım Alanları

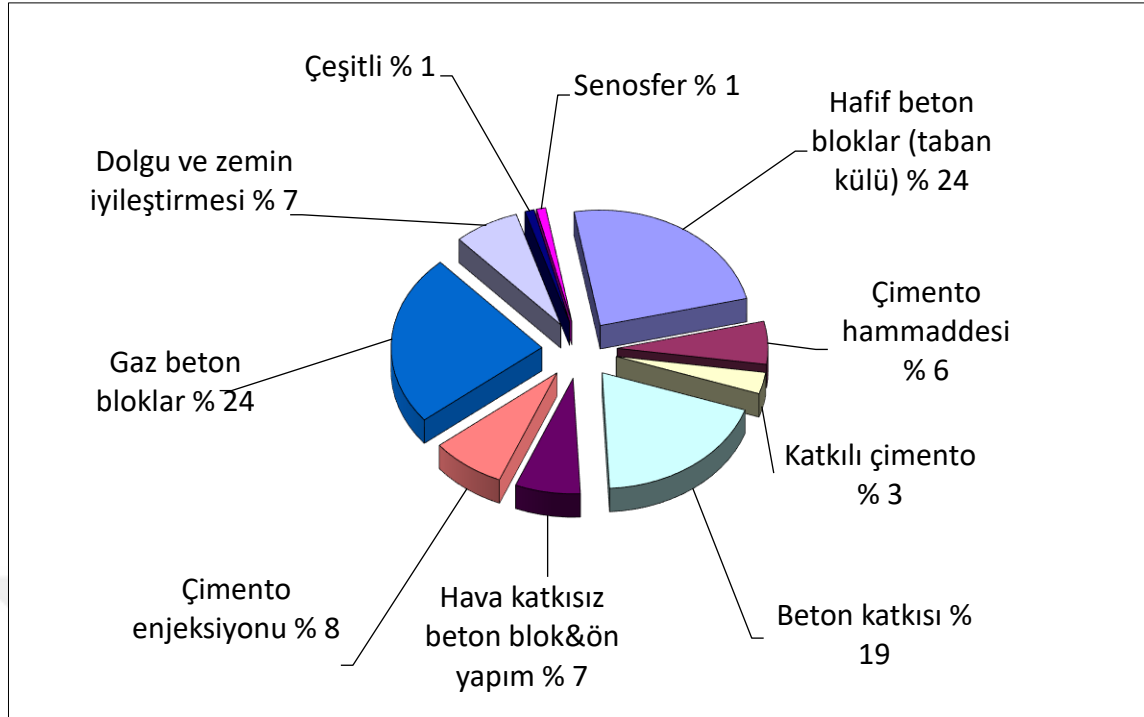
UK'lerin (Uçucu Küller) fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin incelenmesi, bunların inşaat sektöründe kullanılabileceğini gösterebilir. Dolayısıyla malzeme ve enerji tasarrufu sağlarken, doğal kaynakların tüketimini azaltabilir, çevre kirliliğinin önleyebilir. Aynı zamanda, uçucu külün kullanımı ekolojik dengeyi korumaya katkıda bulunabilir. İnşaat sektöründe, uçucu küller (UK'ler), çimento, beton, agrega, kerpiç, tuğla, gaz beton ve yalıtım malzemeleri üretiminde sıkça kullanılmaktadır. Ayrıca baraj ve yol yapımı gibi projelerde, geoteknik uygulamalarda da geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Türkiye ve dünya genelinde UK'lerin inşaat sektöründe kullanıldığı alanları özetleyen bir çizelge 2.3 de mevcuttur (Aruntaş 2006).

Uçucu kül, ince agreganın kısmen ikamesi olarak kullanılmış ve yapısal kullanım için tavsiye edilmiştir (Ayub vd. 2014). Uçucu kül betonun mukavemetini artırmakta ve pompalanmasını kolaylaştırmaktadır (Juan 2019). Uçucu kül, betonun işlenebilirliğini, pompalanabilirliğini, kohezyonluğunu, nihai mukavemetini ve dayanıklılığını iyileştirmenin yanı sıra günümüzde betonla yaşanan birçok sorunu daha düşük maliyetle çözmektedir (Rosenberg ve Arnie 2010). Uçucu külün betonda kullanılmasının en büyük nedeni, kullanımıyla ilişkili artan yaşam döngüsü beklentisi ve dayanıklılıktaki artıştır (Kevin 2011).

Çizelge 2.3. İnşaat sektöründe uçucu küllerin kullanıldığı yerler

Malzeme	Kullanım Amacı / Yeri
Çimento	Hammadde, Katkı ve İkame Malzemesi Olarak
Agrega	İnce Agreg, İri Agreg ve Hafif Agreg Olarak
Beton	Katkı ve İkame Malzemesi Olarak
Tuğla, Ateş Tuğlası	Katkı Malzemesi Olarak
Kerpiç	Bağlayıcı Malzeme Olarak
Yapı Malzemeleri	Blok, Panel, Duvar, Gaz Beton, Beton Boru, Cam, Boya, Seramik, Plastik, Harç
Çeşitli Yapılar / Uygulamalar	Baraj, Otoyol, Nükleer Santral, Geoteknik Uygulamalar

Türkiye'de uçucu kül kullanımıyla ilgili kapsamlı ve güncel verilerin eksikliği söz konusu olabilir, ancak genel olarak çimento ve tuğla üretiminde ve baraj yapımında yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Avrupa'da örnek olarak İngiltere'ye bakıldığında, Uçucu kül, özellikle hafif beton ve gaz beton blokları gibi ürünlerin üretiminde sıkça kullanılmaktadır. İngiltere'deki inşaat sektöründe uçucu kül, bu malzemelerin üretiminde önemli bir katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Bu kullanım, çimento üretimindeki enerji tasarrufu ve çevresel etkinlik sağlama gibi avantajları nedeniyle tercih edilen bir uygulamadır. Şekil 2.2. İngiltere'deki durumu göstermektedir (Tokyay 1993). İngiltere'de uçucu külün beton, hafif beton blok ve gaz beton blok üretiminde yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir.



Şekil 2.2. İngiltere'deki termik santrallerden sağlanan UK'lerin kullanım alanları

2.1.6 Uçucu külün agrega olarak kullanımı

UK'lerin agrega olarak kullanımı, özellikle son yıllarda bir hızlanma gözlenmektedir. Birleşik Krallık'ta yapılan çalışmalar, beton karışımında ince agreganın bir kısmının yerine alternatif malzemelerin kullanılabileceğini göstermiştir. Bu alternatif malzemeler genellikle atık malzemeler veya yan ürünlerdir ve sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlayabilirler (Ravina 1997, Papadakis 2000).

Uçucu külden elde edilen hafif agregalarla ilgili olarak, çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, yüksek sıcaklıkta sinterlenen uçucu kül, hafif beton yapımında kullanılmış ve betonun özelliklerini etkilemiştir. Chang ve Shieh (1996) ile Gesoğlu vd. (2004) tarafından yapılan çalışmalar, uçucu kül ile Portland çimento karışımının iri hafif agregaların, hafif betonun ve taşıyıcı betonun üretiminde etkili olduğunu göstermektedir.

UK'den üretilen hafif agregalarla ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır (Yamashita vd. 1992; Wasserman ve Bentur 1997; Kayall vd. 1999; Kayall vd. 2003). Bu çalışmalarda, Birleşik Krallık'ta yüksek sıcaklıkta sinterlenen yapay hafif agrega, hafif beton yapımında kullanılmış ve betonun özelliklerini etkilemiştir. İngiltere'de yapılan çalışmalar, bir miktar pulverize uçucu külün Portland çimentosu ile karıştırılarak elde edilen iri hafif agregaların hafif beton yapımı ve taşıyıcı beton yapımında kullanılabileceğini göstermektedir (Chang ve Shieh, 1996; Gesoğlu vd., 2004). UK, kil ve yıkıntı atığı ile yapay agrega olarak üretilmiş ve betonda başarıyla kullanılmıştır (Zakaria ve Cabrera 1996). Birleşik Krallık'ta yapılan bir araştırma, işlem sonrası beton içinde geri dönüştürülmüş agrega olarak adlandırılan atık agregaların kullanılmasıyla elde edilen betonun, doğal agregalar kullanılarak yapılan betonla benzer sonuçları verdiğini

göstermiştir (Collivignarelli ve Sorlini, 2001). Davies ve Kitchener (1996) tarafından yapılan çalışma, nükleer santral inşaatında uçucu külün kullanımının bir örneğini sunmaktadır. İngiltere'de inşa edilen bir nükleer santralde hafif agrega olarak betona 1.300 ton sinterlenmiş uçucu kül karıştırıldı. Bu uygulama, uçucu külün sinterlenerek hafif agrega haline getirilmesiyle inşaat sektöründe farklı alanlarda kullanılabileceğini göstermektedir.

2.2 Çimento

Çimento, kum, çakıl ve diğer mineral parçalarını birleştirmek için kullanılır. Bu birleştirme özelliğini yerine getirebilmesi için çimentoya su gereklidir. Çimento su ile reaksiyona girerek sertleşen bir bağlayıcı madde olarak kullanılır. Kırılmış kalker, kil, demir cevheri ve/veya kum gibi malzemeler, çimentoya karıştırılarak beton veya harç üretiminde kullanılır. Bu malzemeler öğütülerek toz haline getirilir ve çimento ile kullanıldığında, suyla karıştırıldığında kimyasal reaksiyona girer ve sertleşme sürecini başlatır. Bu madde döner fırınlarda 1400 ila 1500 °C'de pişirilir ve ardından ani olarak soğutulur. Meydana gelen ürün, "klinker" olarak adlandırılır. Daha sonra, Portland çimentosu, klinkere %4-5 oranında alçı taşı eklendikten sonra öğütülerek elde edilir (Ersoy 1985 ve Lkhagva 2006).

Portland çimentosu, yapı malzemeleri sektöründe en yaygın olarak kullanılan çimento türlerinden biridir. Son zamanlarda, Portland çimentosu hala geniş bir kullanıma sahip olsa da özel talepler veya belirli uygulamalar için üretimi daha az yapılmaktadır. Bunun nedeni, diğer çimento türlerine kıyasla Portland çimentosunun maliyetinin daha yüksek olmasıdır (Şimşek 2003). Ancak, genellikle diğer çimento türlerinin bileşimlerinde de Portland çimentosu bulunmaktadır. Çünkü Portland çimentosu, yapı malzemelerinde istenen dayanım, bağlama özellikleri ve reaksiyon hızını sağlamak için önemli bir bileşendir. Diğer çimento türleri, Portland çimentosunun bileşimine ek olarak farklı katkı maddeleri veya mineral bileşenler içerebilir.

Çimento suyla karıştırıldıktan sonra bir hamur haline gelir ve belirli bir süre sonra katılaşmaya başlar. Bu katılaşma süreci "priz" olarak adlandırılır. Katılaşma süresi, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebilir, özellikle ortam koşullarına bağlıdır. Normal koşullar altında, çimento karışımının katılaşma süresi genellikle 1 ila 10 saat arasında gerçekleşir. Ancak, sıcaklık arttıkça katılaşma süreci hızlanabilir. Sıcaklığın artması, kimyasal reaksiyonların daha hızlı gerçekleşmesine ve suyun buharlaşmasına neden olabilir, bu da katılaşma sürecini hızlandırır. Bununla birlikte, aşırı yüksek sıcaklıkların da kontrol edilmesi önemlidir, çünkü aşırı sıcaklıklar çimentonun istenmeyen özellikler kazanmasına neden olabilir. Katılaşma ile, betonun dayanım kazanma süreci olan "sertleşme" başlar. Sertleşme süreci, çimentonun içerisindeki minerallerin hidrasyonu ile ilgilidir. Çimento hamurunun tamamen dayanmaya ulaşması uzun bir süre alır ve bu süreç zamanla devam eder. Yani, çimentolu karışımın tam dayanımını kazanması için zaman gerekmektedir (Ersoy 1985).

2.3 Agrega

Beton üretiminde kullanılan kum, çakıl, kırmataş gibi malzemeler, genel olarak "agrega" olarak adlandırılır. Agrega, beton içinde hacimsel olarak önemli bir yer kaplar ve genellikle betonun hacminin %60-75'i arasında bir oranda bulunur. Agregalar, tane

boyutlarına göre iki kategoriye ayrılır: ince agregalar ve kaba agregalar. İnce agregalar, genellikle kum veya kırma kum gibi tane boyutlarına sahip olan malzemelerdir. Bu tür agregalar, betonun ince dolgu malzemesi olarak işlev görür ve betonun yüzey dokusunu etkiler. Kaba agregalar ise genellikle çakıl, kırmataş gibi daha büyük tane boyutlarına sahip malzemelerdir. Kaba agregalar, betonun dayanımını artırmak ve betonun mukavemetini sağlamak için kullanılır. Bu tür agregalar, betonun içindeki boşlukları doldurarak betonun yoğunluğunu artırır ve mekanik dayanımını iyileştirir. Agregaların doğru boyut dağılımı ve kalitesi, betonun fiziksel özelliklerini ve performansını etkiler. Agregaların uygun seçimi, betonun dayanıklılığı, işlenebilirliği ve nihai kullanım amacına uygunluğu açısından büyük önem taşır.

Beton, farklı agrega türlerinin bir araya gelmesiyle oluşur. Beton karışımında kullanılan agrega çeşitleri oldukça geniştir. Bu çeşitler arasında kum, çakıl, kırma taş, yüksek fırın cürufu, pişmiş kil, bims, genleştirilmiş perlit ve uçucu kül agregaları da bulunmaktadır. (Mindness ve Young 1981).

Betonun büyük bir kısmı agregalardan oluştuğu için agregaların tüm özelliklerinin bilinmesi gerekir. Agregalar sağlam olmalı, suya maruz kalmamalı ve parçalanmamalıdır. Özellikle betonda kullanılan agregaların, betonun özelliklerini olumsuz etkilememesi ve yapıya zarar vermemesi önemlidir. Agregaların, çimento içeriğiyle etkileşime girerek zararlı bileşiklerin oluşumuna neden olmaması ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye atmaması gerekmektedir. Tanelerin şekli, dokusu ve boyutları uygun olmalı ve uygun standartlara göre dağıtılmalıdır. Agregada zararlı maddeler bulunmamalıdır (Bloem ve Gaynor 1963).

2.3.1 Agregaların sınıflandırılması

Agregaların çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılması mümkündür. Agregalar genellikle elde edilmiş şekillerine, tane büyüklüklerine ve yoğunluklarına göre sınıflandırılırlar. Agreganın sınıflandırılması aşağıdaki gibidir;

2.3.1.1 Elde edilmiş şekillerine göre agregaların özellikleri

Doğal Agregalar:

Doğada bulunan doğal kaynaklardan elde edilen malzemelerdir. Örnek olarak kum, çakıl, kırmataş, yüksek fırın cürufu vb. verilebilir.

Yapay Agregalar:

Endüstriyel işlemlerle üretilen malzemelerdir. Örnek olarak genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş kil, uçucu kül agregaları vb. verilebilir.

İskoçya'da inşa edilen ilk yapı, "Lytag" (sinterlenmiş uçucu kül hafif agregası) ve doğal kumdan oluşan hafif betondan yapılmıştır (Clarke 1993).

2.3.1.2 Tane büyüklüklerine göre agregaların özellikleri

İnce Agregalar:

4mm'den daha küçük tane boyutuna sahip malzemelerdir. Kum, kırma kum, yapay kum, kil gibi örnekler verilebilir.

Kaba Agregalar:

4mm'den daha büyük tane boyutlarına sahip malzemelerdir. Çakıl, kırma taş, yapay taş, çakıl taşı gibi örnekler verilebilir.

Taşunu (Filler):

0,25mm'den daha küçük tane boyutuna sahip malzemelerdir.

2.3.1.3 Yoğunluklarına göre agregaların özellikleri

Hafif Agregalar:

Düşük yoğunluğa sahip malzemelerdir. Betonun ağırlığını azaltmak ve yalıtım özelliklerini artırmak için kullanılırlar. Örnek olarak hafif dolomit, bims, köpük cam agregaları vb. verilebilir.

Hafif agregalar, belirli yoğunluk kriterlerine uygun olarak tanımlanır. Türk Standartları'na (TS) göre, hafif agregalar aşağıdaki şekilde tanımlanır:

TS 1114'e göre, hafif agregalar kırılmış veya kırılmamış gözenekli inorganik agregalardır ve su, çimento ve gerektiğinde katkı maddeleriyle karıştırılarak hafif beton üretiminde kullanılır. Bu agregaların gevşek birim ağırlığı 1200 kg/m^3 'ü aşmamaktadır.

TS 1114'e göre, doğal hafif agregalar, gözenekli bir yapıya sahip olan tüf, bims (ponza), sünger taşı, lav cürufu, diatomit vb. gibi kırılmış veya kırılmamış agregalardan oluşur. Bu agregalar, meydana gelişleri sırasında doğal olarak gözenekli bir yapı kazanmışlardır. Yapay hafif agregalar: TS 1114, inorganik malzemeleri ısıtma, sinterleştirme, soğuk bağlama, gaz veya köpük oluşturma yöntemleriyle gözenekleştirilerek elde edilen kırılmış veya kırılmamış agregalar olarak tanımlar. Bu agregalar, kil, uçucu kül, kuvars, perlit, obsidiyen, vermikülit, şist, arduvaz vb. içerir.

Ağır Agregalar:

Yüksek yoğunluğa sahip malzemelerdir. Betona ağırlık ve dayanıklılık kazandırmak için kullanılırlar. Örnek olarak kırma taş, granit, bazalt vb. verilebilir.

2.3.2 Agregaların fiziksel özellikleri

Agregaların fiziksel özellikleri, betonun performansı ve dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bazı önemli fiziksel özellikler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

2.3.2.1 Agreganın porozitesi

Porozite agregaların içindeki gözeneklerin hacim oranını ifade eder. Daha yüksek porozite, betonun su emme kapasitesini artırır ve donma-çözülme hasarına yol açabilir.

Agreganın görünür porozitesi (açık gözenek oranı) ve gerçek porozitesi (açık + kapalı gözenek oranı), hafif betonların birim hacim kütlesi ve basınç dayanımı gibi fizikomekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Davraz ve Başpınar 2011).

Karışım agregasının incelik modülü ve hedeflenen beton kıvamı, beton karıştırma suyu miktarını belirleyen önemli unsurlardır. İncelik modülü değeri, karışım agregası içerisinde ince agrega miktarının artması veya iri agrega miktarının azaltılması nedeniyle düşer. İncelik modülü küçüldükçe, karışım agregasının ortalama tane boyutu da küçülür. Tane boyutundaki küçülme birim hacmini dolduran tane sayısının artması, taneler arasındaki boşluk hacminin artmasına neden olur ve bu da karışım agregasının porozitesinin artmasına neden olur. Agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurmak için gereken çimento miktarı ve bu çimentoyu hamur haline getirmek için gereken karıştırma suyu miktarı aynı oranda artmaktadır (Selçuk 2012).

2.3.2.2 Agrega – su bağıntısı

Agregaların yüzeylerindeki suyu emme kabiliyetini ifade eder. Su bağıntısı, agregaların beton karışımına su verme yeteneğini etkiler.

Agrega-su bağıntısı, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişir. Bu faktörler arasında aşağıdakiler bulunur:

Agreganın emdiği su:

Agrega, yapısına bağlı olarak suyu emme yeteneğine sahiptir. Agrega içerisindeki gözenekler suyu emebilir veya suyu itebilir. Bu emilim kapasitesi, agreganın özelliklerine ve porozitesine bağlıdır. Agreganın su emme kapasitesi, agreganın mineral bileşimi ve yüzey özellikleri gibi faktörlerden etkilenir.

Tanelerin yapısı ve kökeni:

Agregalar farklı mineral bileşimlerine ve yapısal özelliklere sahip olabilir. Örneğin, bazalt ve granit gibi bazaltik kayalar, genellikle daha yoğun bir yapıya sahiptir ve su emme kapasiteleri daha düşüktür. Diğer taraftan, pumice gibi volkanik kayalar veya bims gibi hafif agregalar daha poroz bir yapıya sahiptir ve su emme kapasiteleri daha yüksektir.

Tane boyutu büyüklüğü:

Agrega içerisindeki farklı tane boyutları, su emme yeteneğini etkiler. Daha küçük taneler, genellikle daha fazla yüzey alanına sahip olduğundan su emme kapasitesi daha yüksek olabilir. Büyük taneler ise daha az yüzey alanına sahip olduğundan su emme kapasiteleri daha düşük olabilir. Dolayısıyla, agreganın tane boyutu da agrega-su bağıntısını etkileyen bir faktördür.

Agrega taneleri arasındaki boşluklarda su dört şekilde bulunabilir:

Tamamen kuru taneler:

Bu agregada tanelerinde su yoktur. Bu taneler genellikle tamamen kurumuş durumdadır ve su emme yetenekleri çok düşüktür.

Kuru yüzeyli taneler:

Görünüşte tamamen kuru olan tanelerdir, ancak içlerindeki boşlukların bir kısmı su ile dolu olabilir. Bu durumda agreganın yüzeyinde nem veya su izleri olmamasına rağmen, iç kısımlarında su tutma kapasitesi olabilir.

Kuru yüzeyli doymuş taneler:

Bu durumda, tanelerin boşlukları su ile dolmuş ve iç kısımları nemli veya doymuş durumdadır. Ancak, tanelerin yüzeyi tamamen kuru olabilir.

Islak taneler:

Su, tanelerin yüzeyinde ve agregada boşluklarında bulunur. Bu durumda agregaların yapısı, suyu tutma yeteneğine sahiptir.

2.3.2.3 Özgül ağırlık

Agregaların birim hacminin kütlesini ifade eder. Özgül ağırlık, agregaların yoğunluğunu belirler ve betonun mukavemeti üzerinde etkili olabilir.

Özgül ağırlık bir malzemenin birim hacminin, aynı hacimdeki bir başka malzemenin ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Özgül ağırlık hesaplanırken taneler arasındaki boşluklar göz ardı edilir ve sadece malzemenin kütlesi ve hacmi dikkate alınır. Agregaların özgül ağırlığı, elde edildiği kayacın kökenine ve mineral bileşimine bağlı olarak değişir. Farklı kaynaklardan elde edilen agregalar farklı özgül ağırlıklara sahip olabilir. Örneğin, granit gibi bazaltik kayalardan elde edilen agregalar genellikle yüksek özgül ağırlığa sahipken, kalker veya kumtaşı gibi tortul kayalardan elde edilen agregalar daha düşük özgül ağırlığa sahip olabilir.

Lkhagva (2006) tarafından gerçekleştirilen deneylerde, birçok uçucu kül agregası için özgül ağırlık tayini yapılmış ve bu değerler tek tek hesaplanmıştır. Çizelge 2.4 kuru özgül ağırlık ve suya doymuş yüzey kuru özgül ağırlık deneylerinin sonuçlarını göstermektedir.

Çizelge 2.4. Uçucu kül agregası kuru ve suya doygun yüzey kuru özgül ağırlığı

Termik santral	Kuru özgül ağırlığı (kg/m ³)	Suya doygun yüzey kuru özgül ağırlığı (kg/m ³)
İskenderun Sugözü	2 097	1 742
Çayırhan	2 025	1 699
Tunçbilek	1 821	1 459
Seyitömer	1 918	1 521
Orhaneli	1 931	1 625
Çatalağzı	1 673	1 483

2.3.2.4 Kompasite

Agregaların parçacık şekil ve boyutlarına bağlı olarak doluluk oranını ifade eder. Daha iyi bir kompasite, beton karışımının homojenliğini ve sıkıştırılabilirliğini artırır.

Agreganın kompasitesi, belirli bir hacim içindeki tanelerin gerçek hacmini ifade eder. Bu değer, birim ağırlığın özgül ağırlığa bölünmesiyle elde edilir. Agregalar genellikle yoğun ve sıkıştırılmış malzemeler olduğu için özgül ağırlıkları birim ağırlığından daha yüksektir. Dolayısıyla kompaktlık (kompasite) değeri birden küçük değer alır (Şimşek 2016). Sıkıştırma işlemine tabi tutulmadan agregalar yerleştirildiğinde kompasite 0,40 ila 0,70 arasında bir değer alır. Agreganın düşük kompaktlığı, üretilen betonun kompaktlığını ve mukavemetini olumsuz etkilemesine, dış etkilere karşı dayanıklılığı azaltmasına ve su geçirgenliğini artırmasına, betonun iç yapısında daha fazla boşluk ve gözenek olduğunda, çatlaklar ve zayıf bölgeler oluşma olasılığının artmasına ve daha fazla kusurlu malzemenin kullanılmasına neden olur (Postacıoğlu 1987).

2.3.2.5 Birim ağırlıkları

Agregaların birim hacim başına düşen ağırlığını ifade eder. Birim ağırlık, betonun hafiflik veya ağırlık özelliklerini etkiler. Bir agreganın birim hacminin ağırlığı, yığın halindeki agreganın ağırlığıdır ve taneler arasındaki boşlukları da içerir. Kurutulmuş bir agregayı gevşek bir şekilde bir kabın içine doldurarak elde edilen birim ağırlık, "gevşek birim ağırlık" olarak bilinir. Aynı agregayı kurutulmuş halde belirli bir sayıda çubuk darbesiyle sıkıştırarak elde edilen birim ağırlık ise "sıkışık birim ağırlık" olarak bilinir.

Betonun bileşiminin anlaşılması ve üretim sürecinde kullanılan malzeme miktarının hesaplanması için agregalar birim ağırlığının bilinmesi önemlidir. Betonarme betonlar için kullanılacak agreganın birim ağırlığı 1,50 ila 1,85 g/cm³'tür. Kırma taşlar için bu ağırlıklar

1,30 ila 1,50 g/cm³'tür. Agreganın granülometrisi, pürüzlü malzeme miktarı, yerleştirme şekli ve özgül ağırlığı, agreganın birim ağırlığını belirler (Postacıoğlu 1975; Baradan 1996). Özkul (1999) tarafından yapılan araştırma, betonun taşıma gücü, dayanıklılığı ve dayanımı ile agreganın birim ağırlığı arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir. Araştırmaya göre, genellikle beton agregalarının birim ağırlığı 1,2-1,8 kg/ dm³ arasında değişmektedir. Bu da betonun kalitesini ve performansını etkileyen önemli bir faktördür. Örneğin, hafif agregalı betonlar için doğal veya yapay hafif agregalar kullanılır.

2.3.2.6 Dona dayanıklılık

Agregaların donma-çözülme döngüleri sırasında fiziksel ve kimyasal olarak dayanıklı olması önemlidir. Dona karşı dayanıklılık, betonun hasar görme riskini azaltır.

Don dayanıklılığı, agrega bünyesinde bulunan boşlukların büyüklüğü ve yapısıyla yakından ilişkilidir. Donma-çözülme sürecinde, özellikle 0,005 mm'den küçük boşluklara sahip orta geçirgenlikteki agregaların parçalandıkları gözlemlenmiştir. Bu boşluklardaki suyun donarak genişmesi, boşluk cidarlarına baskı yapar ve kırılmalara yol açar. Agregaların su emme kapasitesi, dona karşı dayanıklılığı etkileyen önemli bir faktördür. Su emme özelliği yüksek olan agregalar, dona karşı daha düşük dayanıklılığa sahip olma eğilimindedir (Yalçın ve Gürü 2006).

Gao ve diğerleri (2002) tarafından yapılan bir çalışmaya göre, yüksek performanslı hafif betonlarda dona dayanıklılık ve dayanıklılık açısından en önemli faktörler mikro çatlaklardır. Beton donma-çözülme çevrimine maruz kaldığında, suyun donması ve genişmesi gerilim oluşturarak çatlak oluşumuna neden olur. Ayrıca, tekrarlı donma-çözülme sürecinde ısı gerilmeleri de oluşabilir. Uçucu kül ilavesi, betonun iç yapısının yoğunluğunu artırarak mikro çatlakların oluşumunu ve ilerlemesini önleyecektir.

2.3.3 Agrega granülometrisi (tane büyüklüğü dağılımı)

Bir agreganın farklı tane boyutlarının yüzdesel dağılımını gösteren eğriye "granülometri eğrisi" denir. Bu eğri, tane boyutlarına göre yüzdesel ağırlık veya yüzdesel geçiş değerlerini gösterir. Granülometri eğrisinin belirlenmesi için genellikle elek analizi deneyi yapılır. Bu deneyde, agreganın farklı tane boyutlarındaki taneleri belirli eleklerden geçirilir ve elde edilen ağırlık oranlarına dayanarak granülometri eğrisi çizilir. Beton karışım agregasının tanecik boyutu dağılımı, "ideal granülometri eğrileri" ile uyumlu olmalı ve "ideal bölge" içerisinde yer almalıdır. Referans granülometri eğrileri, agreganın en büyük boyutuna bağlı olarak TS 706 EN 12620 standardına göre belirlenir. Bu eğriler, betonun işlenebilirliği, mekanik dayanımı, kompaktlık, geçirgenlik, dayanıklılık gibi özelliklerini optimize etmeyi amaçlar.

Agrega bileşenleri, standartlara uygun granülometriye sahip olmalıdır çünkü bu, beton karışımının istenen özelliklerini elde etmek için önemlidir. Kompaktlık, betonun dayanıklılığı ve performansı için kritik bir faktördür ve iyi bir granülometri, bu hedefe ulaşmak için önemli bir faktördür. Kompasitesi arttıkça betonun dayanımı artacaktır.

2.3.4 Agregaların mekanik özellikleri

Dayanıklı, kırılmayan, aşınmayan, sağlam ve sert agregalar, betonun genel performansını artırır ve yapıların daha uzun ömürlü olmasını sağlar. Bu nedenle, beton üretiminde kullanılan agregaların bu özelliklere sahip olması önemlidir. Agregaların mekanik özellikleri, betonun genel mekanik performansını etkileyen faktörler arasında yer alır. Basınç dayanımı, aşınma dayanımı, çarpmaya dayanımı ve tane sertliği agregaların mekanik özelliklerinden bazılarıdır. Ayrıca elastik modül, tokluk, eğilme dayanımı ve kırılma dayanımı gibi faktörler de agreganın mekanik özellikleri arasında yer almaktadır.

Agreganın tane dayanımı

Taşın cinsi ve petrografik özellikleri dikkate alındığında, agreganın tane dayanımı yaklaşık olarak hesaplanabilir. Özellikle kırma taş kullanılan agregalar için basınç dayanımı önemli bir ölçüttür.

TS 706 EN 12620'ye göre kırma taş kullanılan agregalar için silindir basınç dayanımı belirli bir minimum değere sahip olmalıdır. Standart bu basınç dayanımının en az 1000 kg/cm² olmasını önermektedir. Bu değer, agreganın dayanıklılığını gösterir. Ancak, basınç dayanımı 1000 kg/cm²'nin altında olan durumlarda, aşınmaya dayanıklılık deneyleri gibi ek deneyler uygulanabilir. Bu deneyler, agreganın aşınma direncini ve dayanıklılığını değerlendirmeye yardımcı olur.

Agregaların basınç dayanımı

Basınç dayanımı, agregaların en önemli özelliklerinden biridir. Malzeme porozitesi basınç dayanımıyla yakından ilişkilidir. Agreganın dayanımı, içerisindeki porozitenin azalmasıyla birlikte artar çünkü porozite, malzemenin içerisindeki boşlukların dayanımını azaltır. Daha az poroziteye sahip agregalar, daha az boşluk içerir ve daha sağlam bir yapıya sahiptir. Agreganın dayanımı ayrıca, agreganın iç yapısına da bağlıdır. İç yapı bileşenlerin tanelerinin güçlü olmasını ve birbirlerine yeterince bağlanabilmesini gerektirir. Eğer agreganın iç yapısındaki bileşen taneler zayıf veya bağlantıları yetersiz ise, bu düşük dayanımı etkileyebilir. Bu nedenle, agreganın dayanımı, elde edildiği kayacın mineral bileşimi, doku ve yapısı gibi faktörlere bağlı olarak değişir (Şengül, 2000).

Agrega dayanımı, normal dayanımlı betonda çok az etki yapar. En önemli faktörlerden biri agrega granülometrisidir. Bu, agreganın şekli, betonun yoğunluğu, işlenebilirliği, sıkıştırılabilirliği ve dayanımı üzerinde etkilidir. Hafif betonlar, özellikle yüksek dayanım gerektiren yapısal uygulamalarda bazen daha düşük mekanik dayanıklılığa sahip olabilir. Örnek olarak, hafif betonların kullanılan agregadan daha dayanıklı olması, betonun genel dayanımını her zaman azaltmayabilir (Şengül, 2000).

Agreganın aşınmaya dayanımı

Agregaların aşınma ve darbe dayanımı özellikle yol ve yüzey betonlarının aşınmaya maruz kalacağı durumlarda önemli bir faktördür. Bir malzemenin darbe altında kırılmaya, parçalanmaya veya dağılmaya karşı dayanımı, aşınma dayanımı olarak bilinir (Ekmekyapar ve Örüng, 1997). Katrancı'ya (1999) göre, agregaların özgül ağırlığı ve sertlik gibi özellikleri, agregaların aşınma dayanımını etkiler.

Agreganın çarpmaya dayanıklılığı

Çarpma dayanımında kullanılan agrega büyük bir etkiye sahiptir. Bu test, agreganın bir silindir veya özel bir cihaz içine yerleştirildiği ve belirli bir yükseklikten, belirli bir ağırlık ve sayıda düşürülerek etkisi altında bırakıldığı bir dayanıklılık testi yöntemidir. Bu düşme, malzemenin direncini ve dayanıklılığını ölçmek için kullanılır. Agreganın elekten elenmesiyle, çarpma etkisi altında dayanıklılığını belirlemek mümkündür (Şimşek 2016).

2.3.5 Agregada bulunabilecek zararlı maddeler

Betonun prizini veya sertleşmesini bozan, mukavemetini veya kompaktlığını zayıflatan, kırılmasına neden olan veya korozyona karşı donatıyı tehlikeye atan maddeler zararlı olarak sınıflandırılır. Beton agregalarının temizliği, üretim sırasında herhangi bir zararlı maddenin bağlayıcıya veya karışıma zarar vermemesi için çok önemlidir. Agregalarda istenmeyen zararlı maddeler 3 kategoriye ayrılır.

Hidratasyonu etkileyen kirli maddeler:

Bu organik maddeler, agrega yığını içinde çok küçük parçacıklar halinde bulunurlar. Çürümüş bitkiler ve humuslu topraklar gibi maddeler genellikle ince agregada bulunurlar. İri agregalar genellikle yıkanma sırasında temizlenir. Bu maddeler, çimentonun hidratasyon sürecini etkileyerek betonun prizini yavaşlatabilir. Bu durum özellikle betonun ilk günlerindeki dayanımı ve genel dayanım ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyebilir.

Aderansı etkileyen maddeler:

Silt ve kil gibi ince maddeler, agrega yığınının içine veya tanelerin yüzeylerine yapışır. Betondaki ince maddenin miktarı arttıkça, betonun aynı işlenebilirliği sağlamak için daha çok su gerekecektir. Bu da su-çimento oranını artırarak betonun dayanımını ve dayanıklılığını olumsuz etkiler. Ayrıca, ince maddeler agrega tanelerinin yüzeyini kaplayarak tanelerle çimento hamuru arasındaki yapışma gücünü azaltır ve betonun dayanımını düşürür.

Yumuşak ve mukavemeti düşük maddeler:

Kömür, odun gibi hafif maddeler, agregalarda bulunan diğer zararlı maddeler gibi davranabilir. Bu tür maddeler, agregaların içine yapışmış durumda olan ve agrega tanelerine yapışık olan yumuşak ve düşük mukavemetli maddelerdir. Eğer bu maddeler aşırı miktarda bulunursa, betonun dayanımı ve dayanıklılığı olumsuz yönde etkilenebilir. Su miktarında değişikliklere neden olarak hacimlerinde büyük değişikliklere yol açabilirler. Donma-çözülme olaylarına maruz kaldıklarında kolayca parçalanabilirler ve betonda yerel renk değişikliklerine neden olabilirler (Neville 1981; Hansen 1967; Bloem ve Gaynor 1963).

3 MATERYAL VE METOT

Çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, uçucu kül ile soğuk bağlama yöntemi kullanılarak üretilen agreganın bazı fiziksel özellikleri incelenmiştir. Ardından, farklı hamur karışım oranları denemeleri yapılarak tek bir karışım oranı belirlenmiş ve bu karışım oranına göre agrega numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde kür koşulları, bağlayıcı ve agrega içeriği gibi değişkenlerin etkisi araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, fiziksel ve mekanik deneyleri gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada, farklı harç karışım tasarımları oluşturularak hazırlanan numunelerde kullanılan malzemelerin özellikleri ve malzeme üzerinde yapılan deneysel testler, malzemenin karışım oranları, taze ve sertleşmiş harç numuneleri üzerinde çeşitli fiziksel, mekanik ve dayanıklılık deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.1 MATERYAL

3.1.1 Agrega

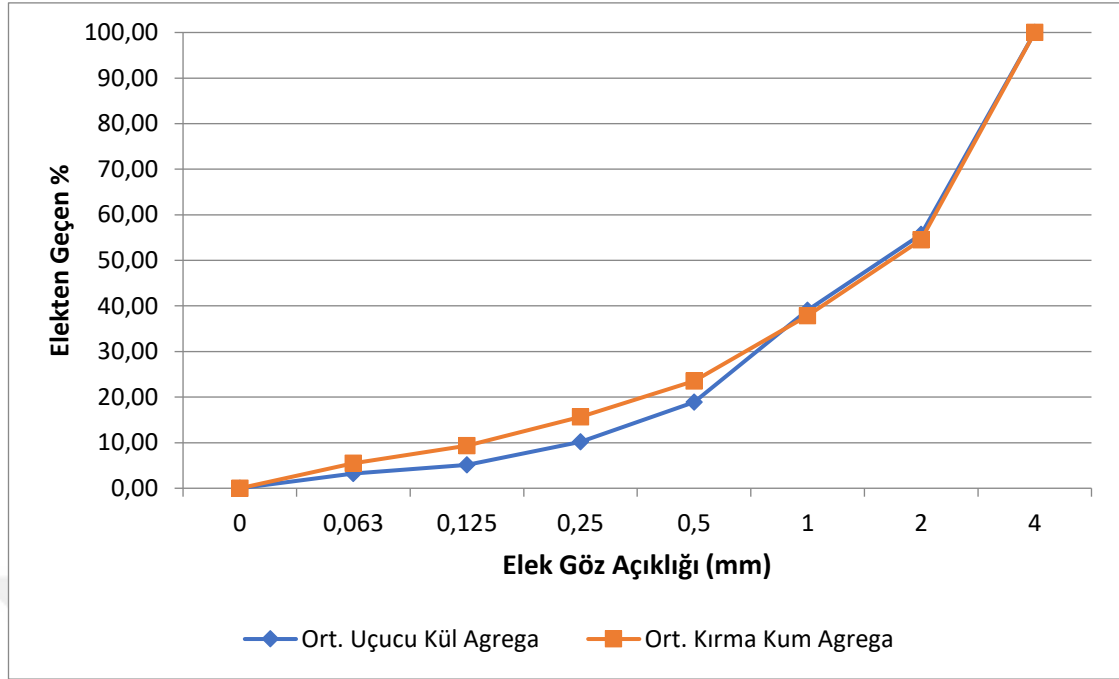
Bu çalışmada, uçucu külün agrega olarak kullanılması için soğuk bağlama yöntemiyle uçucu kül agregası üretilmiştir. Bu yöntemle uçucu kül ve kırma kumun farklı oranlarda agrega olarak kullanılması sağlanmıştır. Çalışmada agrega olarak kullanılan UK'ler Seyitömer Termik Santrallerinden temin edilmiştir. Bu çalışmada F tipi UK kullanılmıştır. UKA ve KKA'nın elek analizi, TS EN 933-1 ve ASTM C-136 standartlarına göre yapılmıştır. Her iki agrega için agrega yığınının en az üç ayrı yerinden numune alınarak elek analizi deneyleri yapılmıştır ve buna göre gradasyon eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğrilerin de ortalaması alınarak agregaların tane boyutu dağılımları belirlenmiştir. Elek açıklıkları sırasıyla 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 ve 0.063 mm olarak belirlenmiştir. Deney, en üst elek (4 mm) üzerine bir miktar agrega yerleştirilerek vibrasyon cihazı ile titreştirilerek gerçekleştirilmiştir. Her bir elek üstünde kalan agrega miktarları tartılarak elek üstü kümülatif ağırlıklar bulunmuştur. Elek üstü yüzde yığılımlı değerler kullanılarak agregaların incelik modülleri bulunmuştur. Granülometri eğrileri, elekten geçen yüzde yığılımlı değerler kullanılarak logaritmik olarak çizilmiştir.

Bileşenler için UKA ve KKA'larının özgül ağırlık tayini suya doygun kuru yüzey haline getirildikten sonra ASTM C128-01'e göre Balon Joje ve Le Chatelier Balonu yöntemi ile yapılmıştır. Fakat her iki agrega için de standart bir yöntem olması için balon Joje ile bulunan değerler dikkate alınmış ve özgül ağırlık değerleri hesaplanmıştır. UKA'nın özgül ağırlığı $1,54 \text{ g/cm}^3$ bulunurken KKA'nın özgül ağırlığı ise $2,65 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Agregalar ile yapılan deneyler tezin bulgular bölümünde yer verilmiştir.

Çizelge 3.1. Seyitömer uçucu külün kimyasal bileşimi

Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO ₂	54.49	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	20.58	-	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	9.27	-	-	-	-	-	-
S+A+F	84.34	-	-	-	>70.00	>70.00	>50.00
CaO	4.26	-	-	-	-	-	-
MgO	4.48	-	-	-	<5.00	-	-
SO ₃	0.52	<3.00	-	-	<5.00	<5.00	<5.00
K ₂ O	2.01	-	-	-	-	-	-
Na ₂ O	0.65	-	-	-	-	-	-
KK	3.01	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl-	0.006	<0.10	-	-	-	-	-
Serb.CaO	0.26	<1.00	-	-	-	-	-
Reak.SiO ₂	39.01	>25.00	>25.00	>25.00	-	-	-
Reak.CaO	2.49	-	<10.00	>10.00	-	-	-

ASTM C 618 Amerikan standardına göre, Seyitömer uçucu kül F sınıfı uçucu kül sınıfına girer. Bu, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ yüzdesi %70'ten büyük olduğu içindir. V (silissi) sınıfında, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az ve reaktif silis miktarının %25'ten fazla olduğu için bu uçucu kül sınıfına girer. Seyitömer uçucu külü, CaO aktivitesi %3,5 olduğu için düşük aktiviteli küller sınıfında yer almaktadır. Birçok araştırma, Seyitömer uçucu külünün F sınıfı uçucu kül sınıfına uygun olduğunu ASTM C 618 Amerikan standardına göre göstermiştir. Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları, Türker ve arkadaşları tarafından hazırlanan Çizelge 3.1'de yer almaktadır (Demir 2005; Bentli vd. 2005; Çinçin 2015).



Şekil 3.1. Ortalama UKA ve KKA gradasyon eğrisi



(a)



(b)

Şekil 3.2. (a) Uçucu kül agregası; (b) Kırma kum agregası

3.1.2 Bağlayıcı

Antalya Bölgesi'nde faaliyet gösteren Göltaş Çimento Fabrikası'ndan sağlanan TS EN 197-1 CEM I 42,5 R Portland çimentosu, bu çalışmada hidrolik bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı, TS-EN 196-6 standardına uygun olarak Le Chatelier balonu yöntemi kullanılarak belirlenmiştir ve $3,12 \text{ g/cm}^3$ olarak tespit edilmiştir.

3.1.3 Karışım Suyu

Harç üretiminde kullanılan karışım suyu, iki temel görevi yerine getirir: Karışım suyu, kuru çimento ve agregalar ile birleştirilerek homojen bir karışım elde edilmesini, çimento taneciklerinin yüzeyine yapışarak onları birbirine bağlanmasını ve sertleşmesini sağlar. Bu çalışmada içilebilir ve temiz olan Antalya şebeke suyu, herhangi bir ön işlem veya arıtma işlemi yapılmadan olduğu gibi kullanılmıştır.

3.1.4 Süper Akışkanlaştırıcı

Çalışmada, taze beton karışımlarının kıvamını ve işlenebilirliğini sağlamak için Fosroc Aurocast 535 süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi, TS EN 934-2+A1 (2013) ve ASTM C 494-99a (2002) standartlarına uygun olarak kullanılmıştır.

3.2 METOT

3.2.1 Karışımların hesaplanması ve hazırlanması

Bu çalışmada uçucu kül, çimento ve su kullanılarak agrega üretimi yapılmıştır. Daha sonra üretilen bu agregaların tane boyu dağılımını bulmak için elek analizi deneyi uygulanarak soğuk bağlanmış UK agregaları hacimce %0, %25, %50, %75, %100 oranlarında kalker kökenli kırma agrega ile yer değiştirilerek harç karışımı hazırlanmıştır. UKA'nın su emme oranı yüzdece yüksek çıktığı için karışım miktarları hesaplanırken farklı bir yöntem kullanılmıştır. Öncelikle her iki agreganın hacimce ağırlıkları hesaplanmıştır. Bu ağırlıklarına göre su emme miktarları belirlenmiştir. UKA'nın su emmesi yüzdece yüksek olduğu için ilk hesaplanan UKA ağırlığı alınmamıştır. Bu UKA ilk ağırlık kullanılarak yapılan deney çalışmalarında 1 dm³ hazırlanan harç yaklaşık olarak 1.5 dm³ kalıpları doldurmuştur. Dolayısıyla bulunan UKA ağırlığının, kalıp numunelere döküldükten sonra uygun bir hacim elde etmek için yüzde yüze su emme yüzdesi de dahil edilerek hesaplama yapılmıştır. Çıkan sonuçlar neticesinde agregaların son su emmeleri hesaplanarak su miktarları da tayin edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.3. (a) Agreg a hamurunun kalıptan çıkarılması; (b) Harçların kalıptan çıkarılması; (c) Harçların kür tankına konulması

Karışım kodları aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

100UKA: Agregası olarak kullanılan uçucu kül agregası ile kırma kum agregası hacimce yer değiştirilmiştir. %100 uçucu kül agregası kullanılmıştır.

75UKA: Agregası olarak hacimce %75 uçucu kül agregası, %25 kırma kum agregası kullanılmıştır.

50UKA: Agregası olarak hacimce %50 uçucu kül agregası, %50 kırma kum agregası kullanılmıştır.

25UKA: Agregası olarak hacimce %25 uçucu kül agregası, %75 kırma kum agregası kullanılmıştır.

0UKA: Agregası olarak kullanılan uçucu kül agregası ile kırma kum agregası hacimce yer değiştirilmiştir. %100 kırma kum agregası kullanılmıştır. Kontrol numunesidir.

Çizelge 3.2. Karışımlara giren bileşen miktarları (kg/m³)

Karışım Kodu	Çimento (kg/m ³)	KKA (kg/m ³)	UKA (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Süper Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)
100UKA	350	0,00	733,53	558,11	0,00
75UKA	350	476,60	550,15	472,41	0,00
50UKA	350	953,21	366,77	386,71	1,75
25UKA	350	1429,81	183,38	301,01	3,50
0UKA	350	1906,42	0,00	215,31	4,38

3.2.2 Uçucu kül üzerinde yapılan deneyler

3.2.2.1 Uçucu kül özgül ağırlığı

Uçucu külün özgül ağırlığı, karışıma girecek uçucu külün hacimce miktarını belirlemek için tayin edilmiştir ve ASTM C128-01'e göre yapılmıştır. Karışımlarda kullanılacak uçucu kül özgül ağırlığının tayin edilmesi için balon joje ve Le Chatelier balonu ile iki farklı deney yöntemi kullanılmıştır. Uçucu külün özgül ağırlığı, Le Chatelier balonu yönteminden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Uçucu kül özgül ağırlığı 1,70 g/cm³ olarak bulunmuştur.



Şekil 3.4. Le Chatelier Balonu

3.2.2.2 Uçucu kül agregası karışımlarının hesaplanması ve hazırlanması

Karışıma girecek malzemeler ağırlıkça belirlenerek hesaplanmıştır. Farklı su/bağlayıcı oranları denenerek karışım için en uygun su miktarı seçilmiştir. Buna göre yapılan farklı deneyler sonucunda 100g bir karışımda bağlayıcı olarak kullanılan 82,5g uçucu kül ve 17,5g çimentoya 60g su eklenerek bir karışım oluşturulmuştur. Bu miktarlara göre karışıma giren bağlayıcı ve suyun birim hacimleri belirlenmiştir. Böylece karışım oranları 1 dm³ hacim için hesaplanmıştır. Agregası üretmek için hazırlanan karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0,6 ile sabit tutulmuştur.

Çizelge 3.3 Uçucu kül agregası birim hacim karışım oranları

AĞIRLIKÇA HESAPLAMA	Ağırlık (g)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
Çimento	17,5	3,12
Uçucu Kül	82,5	1,7
Su	60	1

3.2.3 Agregalar üzerinde yapılan deneyler

Bu çalışmada öncelikle uçucu kül, çimento ve su kullanılarak soğuk bağlanmış agregası üretilmiştir. Kırma kum agregası ile uçucu kül agregası hacimce %0, %25, %50, %75, %100 oranlarında yer değiştirilerek harç karışımına eklenmiştir.

3.2.3.1 UKA hamurunun karışım tasarım yöntemi

UKA hazırlamak için su ve bağlayıcı olarak Seyitömer uçucu kül ve çimento kullanılmıştır. Kullanılan malzemeler ile ağırlıkça farklı oranlarda hamur karışımları hazırlanarak deneme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan ilk denemede ağırlıkça Su/Bağlayıcı oranı 0.65 alınmıştır. Çimento miktarının az tutulması için 100 g bağlayıcıda 90 g uçucu kül, 10 g çimento kullanılmıştır. Fakat bu çalışmadaki deney sonuçları analiz edildiğinde alınan değerler uygun görülmemiştir. Bundan sonra malzemelerin miktarlarında ağırlıkça değişiklikler yapılarak en uygun karışımı elde etmek için farklı oranlarda karışımlar yapılmıştır. Son olarak ağırlıkça su bağlayıcı oranı 0.6 alınmasına karar verilmiştir. Bağlayıcı olarak 100 gram bağlayıcıda 82.5 g uçucu kül kullanılırken 17.5 g çimento kullanılmıştır. Böylece bu karışımlar ile hacimce ağırlıklar hesaplanarak 40x40x160 mm'lik prizmatik bir kalıp için gerekli olan karışım miktarı belirlenmiştir. Hamurlar mümkün olduğunca 1 dm³ olarak hazırlanmıştır. Miksere bağlayıcılar ve suyun 2/3'ü eklenerek 2 dakika boyunca 62 devir/dakika hızda karıştırılmıştır. Daha sonra homojenlik kaybını önlemek için hazne tabanı bir ıspatula yardımı ile karıştırılıp dağılan ve yapışan taneciklerin tekrar karışım içerisine dönmesi sağlanmıştır. Karıştırma işlemi devam ederken geri kalan su ilave edilerek 2 dakika boyunca karışım tekrarlanmıştır.



Şekil 3.5. Hamur veya harç karışımının hazırlandığı mikser

3.2.3.2 UKA kalıp numunelerinin agrega haline getirilmesi

Üretilen karışımlar 40 x 40 x 160 mm'lik prizmatik kalıplara yerleştirilmiş ve üstleri nemden korunmak için plastik bir örtüyle kapatılmıştır. 24 saat sonra sertleşmiş numuneler kalıptan çıkarılıp hava ve neme maruz kalmaması için plastik örtüler ile sarılarak laboratuvar ortamında 28 gün boyunca bekletilerek kürlenmeye bırakılmıştır. Bu süreçte 7 ve 28 günlük olarak dayanım testlerine tabi tutulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 3.6. (a) UKA hamurunun kıvam tayini; (b) Hamurun kalıplara yerleştirilmesi

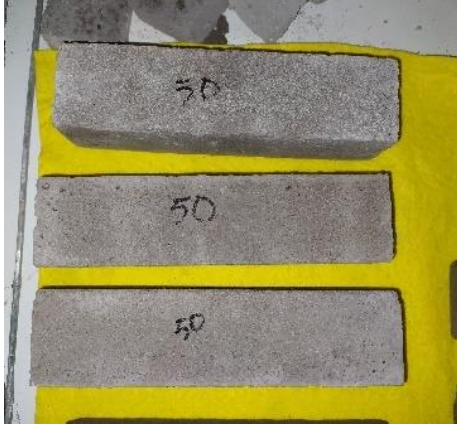


(a)



(b)

Şekil 3.7. (a) Numunelerin kalıptan çıkarılması; (b) Numunelerin plastik poşetlere sarılması



Şekil 3.8. Numunelerin plastik poşetten çıkarılması

Agregalar Şekil 3.7.'deki hale geldikten sonra laboratuvar ortamında yaklaşık 1 hafta nemini alması için bırakılmıştır. Daha sonra bu UKA numuneleri çeneli kırıcı ile kırılarak kaba agregaya haline getirilmiştir. Hafif yapıda olan UKA numunelerinin, deneme sonuçlarına bakıldığında kolayca kırılabildiği ve ufalanmaların olduğu görülmüştür. Bunun neticesinde agregaya numunelerinin daha sert bir hal alması için çimento miktarı artırılarak çeneli kırıcı makinesinde kırılma işlemi sırasında ince agregaya gradasyonuna yaklaşık bir değer elde etmek ve numunelerin kolayca ufalanmasını önlemek için kaba agregaya halinde kırılmıştır. Daha sonra manuel olarak elle veya çekiç ile ince agregaya haline getirilmiştir. Numunelerin 4mm elek altında kalması için bu işlemler yapılmıştır. Yapılan elek analizleri ile KKA granülometri eğrisine yakın bir grafik elde edilene kadar UKA'nın kırma işlemleri ve elek analizleri devam etmiştir. KKA granülometri eğrisine en yakın grafik bulunduktan sonra kırılan numunelerin tamamı 4mm ile 0.063mm arasında bir dizi elekten geçirilmiştir. KKA granülometri eğrisine yakın bir değer elde etmek için 0.25mm elek altında kalan parçacıkların yaklaşık olarak yarısı UKA içine dahil edilmemiştir.



Şekil 3.9. UKA'nın laboratuvar tipi çeneli kırıcıda ince agregaya haline getirilmesi



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.10. (a) UKA'nın büyük boyutlar halinde çeneli kırıcıda kırılması; (b) Büyük boyutlu UKA'nın çeneli kırıcıda küçültülmesi; (c) 4mm elekten geçmeyen UKA'nın manuel olarak kırılması; (d) UKA'nın 4mm elekten geçirilmesi

3.2.3.3 Agregaların özgül ağırlığı

Agregaların özgül ağırlığı Le Chatelier ve balon joje olmak üzere 2 farklı deney yöntemleri ile belirlenmiştir. Hata payını azaltmak amacıyla deney en az 3 kez tekrarlanmış ve bulunan değerlerin ortalamaları hesaplanmıştır. Önemli bir diğer konu ise özgül ağırlık hesaplamalarında agregaların SDKY halde olması gerekmektedir. Özgül ağırlığı bulmak için 40-80 g arası agregaya ve sıvı olarak standarda uygun malzemeler tercih edilmiştir. UKA agregasının özgül ağırlığını bulmak için Le Chatelier balonuna standarda uygun sıvı ile ilk ölçüm değeri alınmıştır. Sonra agregaya eklenerek ikinci okuma bulunmuştur. Agreganın hepsinin balona dökülmesi ve topaklanma olmaması, doğru ölçümler ve hesaplamalar için önemlidir. Bu nedenle, çalışmada agregaya balona dökülürken dikkat edilmiş ve tamamının döküldüğünden emin olunmuştur. Deney tamamlandığında, gerekli hesaplamalar yapılmış ve özgül ağırlık değerleri belirlenmiştir.

Aynı deneyler KKA için balon joje kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre UKA özgül ağırlığı 1,54g/cm³, KKA özgül ağırlığı 2,65g/cm³ olarak bulunmuştur. Bu veriler bulgular bölümünde de verilmiştir.

3.2.3.4 Agregaların su emme miktarı tayinleri

Agreganın yüzdesel su emme tayini deneyi, ASTM C128-01 standardına göre yapılmıştır. Agregayı SDKY haline getirmek için, öncelikle standartlara uygun şekilde yığını temsil eden belli miktar agregaya 24 saat boyunca suda bekletilip suya doymun hale getirilmiştir. Agreganın suyu süzildükten sonra, agregaya ısıtıcı plaka üzerinde 150 °C 'de sürekli karıştırılıp suya doymun kuru yüzey (SDKY) haline gelmesi için Abraham konisi kullanılarak kontrol edilmiştir. Suya doymun kuru yüzey haline gelip gelmediğini anlamak için kesik huni yöntemi kullanılmıştır.

Numune, geniş yüzeyi alta gelecek şekilde duran kesik huni biçimindeki metal kalıba gevşek bir şekilde yerleştirilerek, suya doymun kuru yüzey (SDKY) haline geleceği öngörülmektedir. Sıkıştırma çubuğu kullanılarak hafif şekilde 25 defa şişlenmiştir. Kesik huni çıkarıldığında numunenin hala konik bir şekilde duruyor olması, içerisinde serbest nem bulunduğunu gösterir. Bu durumda numunenin kurutmaya devam edilmesi ve belirli bir süre sonra bir kez daha aynı işlemin yapılması gerekmektedir. Numunenin konik şeklinin serbestçe bozulduğu görüldüğünde SDKY hâlinde olduğu anlaşılır. Ya da koni kaldırılıp bir ıspatula yardımı ile agregaya ortadan yarılar, eğer agregaya koni şeklinden ayrılarak dağılırsa ve merkezdeki agregalar az da olsa birbirini tutarsa, agregaya SDKY haline gelmiş demektir. Herhangi bir nedenle aşırı kurutulduğunda az miktarda su püskürtülerek nemlendirilen numune kesik huni ile tekrar test edilir.

SDKY hâline getirilmiş numuneden belli bir miktar alınarak tartılmıştır ve geriye kalan numune etüve koymak için ayrılmıştır. 65°C Etüvde 24 saat bekletilerek kurutulmuştur. Malzemenin SDKY ağırlığı (M₂) olarak kaydedilmiştir. Sonrasında, numune etüve yerleştirilerek etüv kurusu haline getirilmiştir. Numune biraz bekletilerek soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra numune, ölçü kabına doldurularak tartılmıştır. Numunenin kuru ağırlığını belirlemek için, önceden belirlenmiş olan ölçü kabının tare değeri bu tartıdan çıkarılmıştır ve böylece numunenin kuru ağırlığı (M₁) belirlenmiştir. Böylece agregaların yüzdece su emme oranları aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$m_i = \frac{M_2 - M_1}{M_1} * 100 \quad (3.1)$$

m_i : İnce agreganın su emme oranı (%)

M₁ : Numunenin etüv kurusu ağırlığı (g)

M₂ : Numunenin DKY durumdaki ağırlığı (g)



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.11. (a) Isıtıcı plaka yardımıyla UKA agregalarının SDKY hale getirilmesi; **(b)** Abrams konisi ile SDKY hal tayini; **(c)** SDKY haldeki UKA agregalar



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.12. (a) Isıtıcı plaka yardımıyla KKA agregalarının SDKY hale getirilmesi; **(b)** Abrams konisi ile SDKY hal tayini; **(c)** SDKY haldeki KKA agregalar

Agregaların su emme yüzdesini hızlı bir şekilde ölçmek için, etüv yönteminin yanı sıra nem ölçer cihaz da kullanılmıştır. Su emme değeri, karışımı hesaplamak için kullanılan değerlerin ortalamasıdır. UKA su emme tayininde $0,57\text{g/cm}^3$ hesaplanmışken, KKA su emmesi $0,038\text{ g/cm}^3$ hesaplanmıştır.



Şekil 3.13. Agregaların su emme değerlerini hesaplamada kullanılan nem ölçüm cihazı

3.2.3.5 Agregaların birim hacim ağırlık ve taneler arası boşluk miktarı tayini

Bu deney, TS EN 1097-3 standardı baz alınarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak agregalar 75 °C'de etüvde sabit kütleye ulaşana kadar bekletilmiştir. Ardından, 1 litrelik kabın ağırlığı (M_1) ölçülmüştür. Kabın kenarından çevresinde dönerken bir miktar taşacak şekilde agregaya doldurulmuş ve fazla agregaya üstünden alınarak üst yüzey düzlenmiştir. Kabın içindeki gevşek agregaya ile tartım yapılmıştır (M_2). Aşağıdaki formül kullanılarak gevşek yığın yoğunluğu hesaplanmıştır:

$$\rho_b = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (3.2)$$

Deney üç kez tekrarlanarak ortalaması alınmıştır.

Sıkışık birim hacmin hesaplanması için kabın 1/3'ü doldurulmuş ve 25 kez şişlenmiştir. Ardından, kabın 2/3'üne kadar doldurulmuş ve yine 25 kez şişlenmiştir. Son olarak, kabın tamamı doldurulmuş ve 25 kez şişlenmiştir. Her tabakanın şişlenmesi sırasında önceki tabakaya kadar sıkışmanın gerçekleşmesi sağlanmıştır. Kabın üst yüzeyi düzeltilerek tartılmıştır (M_2). Aşağıdaki formül kullanılarak sıkışık yığın yoğunluğu hesaplanmıştır.

$$\rho_b = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (3.3)$$

Burada;

ρ_b : Gevşek yığın yoğunluğunu (Mg/m^3),

ρ_s : Sıkışık yığın yoğunluğunu (Mg/m^3),

M_1 : Boş ölçü kabı kütlesini (kg),

M_2 : Ölçü kabı ve deney numunesinin kütlesini (kg),

V : Ölçü kabının hacmini (l) temsil etmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.14. (a) KKA'nın şıkışık birirm hacim ağırlıklarının belirlenmesi; (b) KKA'nın gevşek ve sıkışık birirm hacim ağırlıklarının belirlenmesi; (c) UKA'nın şıkışık birirm hacim ağırlıklarının belirlenmesi; (d) UKA'nın gevşek ve sıkışık birirm hacim ağırlıklarının belirlenmesi

3.2.3.6 Agregaların tane büyüklüğü dağılımı tayini

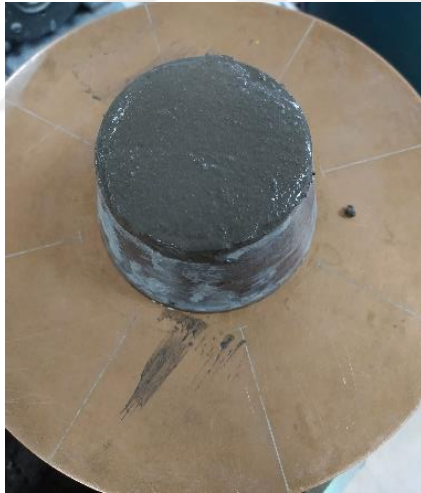
Granülometri eğrileri, elekten geçen yüzde kümülatif değerler kullanılarak logaritmik olarak çizilmiştir. Üretilmiş olan agregaların tane boyu dağılımını bulmak için elek analizi deneyi TS EN 933-1 ve ASTM C-136 standardına göre yapılmıştır. Harç üretmede ince agregalar kullanıldığı için elek göz açıklıkları 4 mm'den başlamıştır. Elek göz açıklıkları 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm ve 0,063 mm'dir. Elek göz açıklıkları büyükten küçüğe göre, en üstteki en büyük olacak şekilde, sıralanmıştır. Deney için bir miktar agregalar en üstteki eleğe (4 mm) koyulup sarsma cihazı ile sarsılmıştır. Elek üzerinde kalan agregalar miktarları ölçülmüştür ve elek üstü kümülatif ağırlıklar bulunmuştur. Agreganın incelik modülü elek üstü yüzde yığılımlı değerleri hesap

edilerek belirlenmiştir. Bu elek analizi deneyi her iki agrega (UKA ve KKA) için de ayrı ayrı uygulanmıştır. Agregaların elek analizi tayini oluşturulurken agrega yığının en az üç farklı yerinden alınan numunelerin her birine elek analizleri yapılmıştır. Elde edilen bu değerlerin ortalaması alınarak gradasyon eğrisi oluşturulmuştur. Gradasyon eğrisi Şekil 3.1’de gösterildiği gibidir.

3.2.4 Taze harçlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler

3.2.4.1 Akma Tablası Deneyi

Akma tablası deneyi, TS EN 1015-3 standardına göre gerçekleştirilmiş ve taze harçların işlenebilirliği ve kıvam tayini için kullanılmıştır. Harçların uygun işlenebilirliğe sahip olması, taze halde segregasyonu önlemek açısından önemlidir. Deney öncesinde akma tablası nemli bir bezle temizlenmiştir. Kesik koni şeklindeki bir kalıp, akma tablasına ortasına yerleştirilmiş ve taze harç iki aşamada ıspatula ile doldurulmuştur. Her aşamada harç, sıkıştırma çubuğuyla 10 kez şişlenerek sıkıştırılmıştır. Koni doldurulduktan sonra üst tabaka bir mala yardımıyla düleştirilmiş ve harç kalıntıları temizlenmiştir. Koni etrafında dağılan harç kalıntıları bir bezle temizlendikten sonra koni kalıbı kaldırılmıştır. Sonrasında kol 15 kez çevrilerek harç sarsılmıştır. Sarsılma etkisiyle yayılan harcın en geniş iki kısmının ölçümleri alınmış ve bu ölçümler ortalama yayılma çapını elde etmek için ikiye bölünmüştür.



(a)



(b)

Şekil 3.15. (a) Akma tablası üzerinde kesik koni düzeneği; (b) Akma tablası deneyi

3.2.4.2 Taze harçlarda birim hacim ağırlık ve taneler arası boşluk miktarı tayini

Taze harcın birim hacim ağırlığı tayini için TS 1015-6 standardı uygulanmıştır. İşlem şu adımlarla gerçekleştirilmiştir:

Yayılma çapı değeri 140 mm'den daha düşük olan harçlar için vibrasyon metodu uygulanmıştır. Bu metotta önce kabın tartımı yapılmış, ardından içerisine harç doldurularak kap tamamen dolana kadar titreşime devam edilmiştir. Son olarak, hassas bir tartıda tartım yapılmıştır.

Yayılma çapı değeri 140 mm ile 200 mm arasında değişen harçlar için şok metodu uygulanmıştır. Kabın yarısı harçla doldurulduktan sonra kap sağlam bir yüzeye 10 kez düşürülmüş ve ardından diğer yarısı doldurularak aynı işlem tekrarlanmıştır. Son olarak, kap hassas bir tartıda tartılmıştır.

Yayılma çapı değeri 200 mm'den daha yüksek olan harçlarda ise kabın tamamı taşana kadar harçla doldurulmuştur. Kabın kenarları nemli bir bezle silindikten sonra kap hassas bir tartıda tartılmıştır.

Taze harcın birim hacim ağırlığı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.4)$$

ρ_m : Taze harç birim hacim ağırlığı (kg/m³)

m_1 : Kabın ağırlığı (kg)

m_2 : Kabın ve taze harcın ağırlığı (kg)

V : Kabın hacmi (m³)



Şekil 3.16. Taze harcın birim hacim ağırlık tayini

3.2.5 Sertleşmiş harçların fiziksel deneyleri

3.2.5.1 Sertleşmiş harcın su emme miktarı, kuru birim ağırlık, görünür birim ağırlık, görünür boşluk oranı tayini

Numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, ASTM C 642 standardına uygun olarak 7. ve 28. günlerde birim ağırlık, su emme ve görünür boşluk oranları, "Arşimet Terazisi" kullanılarak ölçülmüştür.

Kür tankından çıkarılan numunelerde öncelikle SDKY (su doymun kuru yoğunluğu) birim ağırlık ölçümü yapılmıştır. Numunelerin yüzeyi kuruduktan sonra, önce havada tartılmış, ardından terazinin su içeren kefesine yerleştirilmiş ve ağırlıklar kaydedilmiştir.

Numunelerin kuru birim ağırlığını belirlemek için numuneler etüvde 75°C'de kurutulmuştur. Termal çatlakların önlenmesi amacıyla, daha fazla sıcaklıklardan kaçınılarak 75°C sıcaklık tercih edilmiştir. Etüvdeki kuruma süresi, numunelerde bulunan uçucu kül agregası miktarına bağlı olarak değişmektedir.

Su emme oranı fazla olan uçucu kül agregası, 24 saatlik kurutma süresi boyunca nemini kaybetmemiştir. Bu nedenle, bazı numuneler için kurutma süresi 48 saate kadar uzamıştır.

Kockal ve Ozturan (2011)'e göre numuneler kuruduktan sonra, numunelerin nihai kuruluşunu ölçmek ve ASTM C 642'ye göre hedef değerleri hesaplamak için aşağıdaki formüller kullanılmıştır:

$$A = \frac{W1}{W2 - W3} \quad (3.5)$$

$$A = \frac{W1}{W1 - W3} \quad (3.6)$$

$$A = \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} * 100 \quad (3.7)$$

$$A = \frac{W_2 - W_1}{W_1} * 100 \quad (3.8)$$

A: Kuru birim ağırlık (Mg/m³) B: Görünür birim ağırlık (Mg/m³) C: Görünür boşluk oranı (%) D: Su emme (%)

Burada:

A= Kuru birim ağırlık

B=Görünür birim ağırlık

C=Görünür boşluk oranı (%)

D=Ağırlıkça su emme oranı (%)

W₁: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (kg)

W₂: SDKY ağırlığı (kg)

W₃: Su içindeki ağırlık (kg)

3.2.5.2 Kılcal su geçirimsizlik deneyi

Numune boyutları 40x40x160 mm olan prizma numunelerin kılcal su emme katsayıları, numunenin tabanının suyla temas ettirilerek ve yan taraflarının parafinle izole edilerek 1.dk, 5.dk, 20.dk, 40.dk, 1.sa, 24.saat boyunca emilen su miktarıyla hesaplanmıştır. Yan taraflardan 3-4 mm suya batırılmış silindirik çubuklar kullanılmıştır.

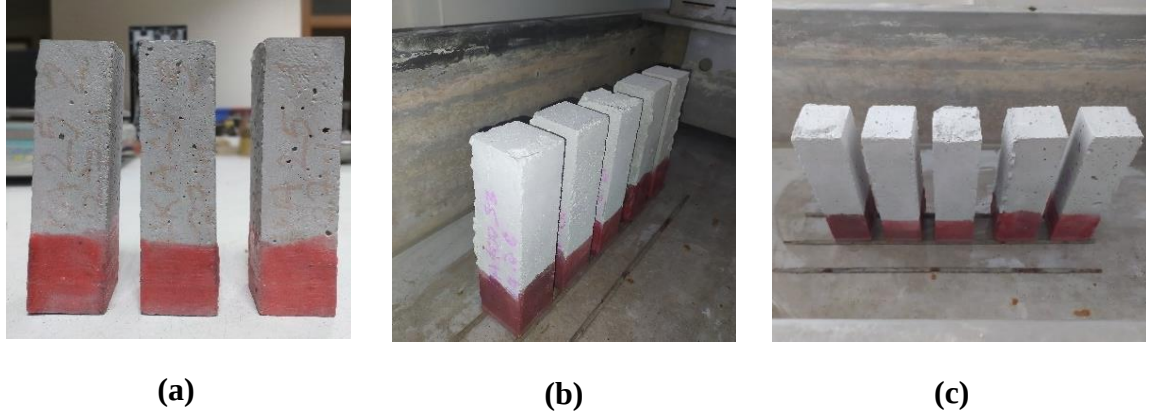
Kılcal su emme katsayısı,

Q (emilen su miktarı, cm³),

A (suya temas eden yüzeyin alanı, cm²) ve

t (zaman, sn) değerlerine göre aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$K = \frac{Q}{A * \sqrt{t}} \quad (3.9)$$



Şekil 3.17. (a) Parafinle izole edilen numuneler; **(b)** Kılcal geçirimsizlik tayini deney düzeneği; **(c)** Kılcal geçirimsizlik deneyi

3.2.6 Sertleşmiş harçların ve UKA hamurunun mekanik deneyleri

3.2.6.1 Eğilmede çekme dayanımı tayini

TS EN 1015-11 standardına uygun olarak gerçekleştirilen deneyde, çekme kuvvetine maruz kalan çimentolu karışımların çekme dayanımını belirlemek için üç nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Kür tankından çıkarılan 40x40x160 mm boyutlarındaki prizma numuneler, yükleme tablasındaki iki silindir mesnetin arasına yerleştirilerek üçüncü bir silindire tam ortalanmıştır. Numunenin tam orta noktası işaretlenerek yükleme tablasına yerleştirilmiştir. Bu deneyler sertleşmiş harçlar ve UKA hamuru için geçerlidir.

UKA 7 ve 28 günlük olarak plastik poşetlerden çıkarıldıktan sonra yükleme tablasındaki iki silindir mesnetin arasına yerleştirilerek üçüncü bir silindire tam ortalanmıştır. Bu deneyler UKA hamuru için geçerlidir.

Deney sonucunda elde edilen maksimum yük (P) kullanılarak numunelerin eğilmede çekme dayanımı (σ) MPa cinsinden aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

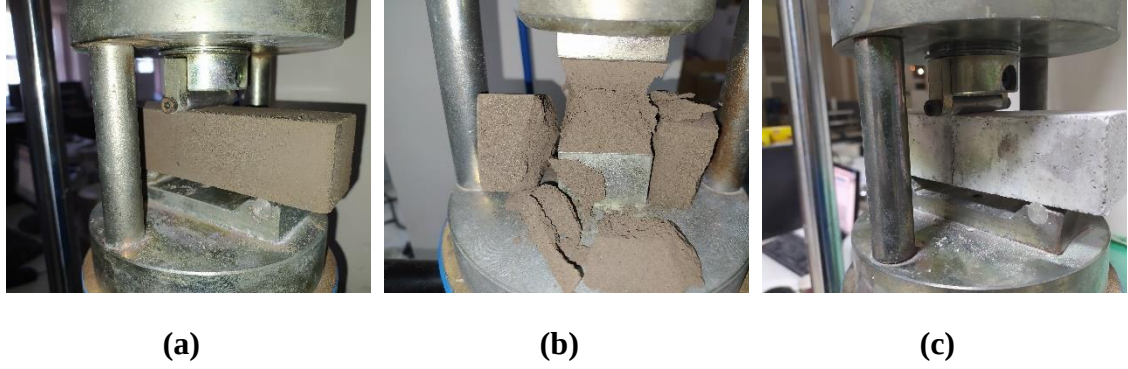
$$\sigma = \left(\frac{P * L * 6}{4 * b * h^2} \right) \quad (3.10)$$

Burada

L, yükleme tablası mesnetler arasındaki açıklığı,

b numunenin genişliğini,

h ise numunenin yüksekliğini göstermektedir.



Şekil 3.18. (a) UKA üç nokta eğilme deneyi düzeneği; **(b)** UKA deney sonrası numune görünümü; **(c)** Sertleşmiş harçların üç nokta eğilme deneyi düzeneği

3.2.6.2 Basınç dayanımı tayini

Basınç dayanımı tayini için, 40x40x160 mm boyutlarına sahip numuneler üç nokta eğilme deneyi sonucunda ortadan ikiye bölünen kırık parçalar kullanılmıştır. Bu parçalar, yükleme yüzeylerine sahip çerçevenin içine yerleştirilmiştir. Diğer yüzeylere kıyasla yükleme yüzeyi, daha pürüzlü olduğundan dolayı yükleme ekseninde konumlandırılmıştır. Numune boyutu 40x40x40 mm olarak kabul edilerek basınç dayanımı deneyi, 7 ve 28 günlük kür sonundaki numuneler için TS EN 1015-11 standardına göre gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.11)$$

σ : Basınç dayanımı (MPa)

P: Maksimum yük (N)

A: Yükün uygulandığı kesit alanı (mm²)

Aynı işlemler plastik poşetten çıkarılan UKA için de uygulanmıştır. Farklı olarak UKA, plastik poşette bekletilmiştir. 7 ve 28 günlük kürlerin sonunda bu numunelere basınç dayanımı tayini yapılmıştır.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.19. (a) UKA Basınç dayanımı tayini öncesi; **(b)** UKA deney sonrası numune görünümü; **(c)** Sertleşmiş harçların basınç dayanımı tayini öncesi; **(d)** Sertleşmiş harçların deney sonrası numune görünümü

3.2.6.3 Elastisite modülü tayini

Elastisite modülü, bir malzemenin şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direnci ifade eder. Bu, malzemenin yük altında şekil değiştikten sonra tekrar eski haline dönebilme özelliğinin bir ölçüsüdür. Elastisite modülü, malzemenin rijitliğini belirleyen faktörlerden biridir ve rijitlikle doğru orantılıdır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elastik bölgesindeki lineer kısmı üzerinden hesaplanır.

Elastisite modülünü hesaplamak için teğet, başlangıç teğet, sekant ve kiriş yöntemleri gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Örneğin kiriş yönteminde, gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerinde maksimum gerilmenin %40'ına denk gelen bir nokta belirlenir. Bu noktadan, birim şekil değiştirme değeri 5×10^{-5} olan bir noktaya bir kiriş çizilir. Betonun gerilme şekil değiştirme eğrisi, iki nokta arasında bir doğru çizilerek belirlenir. Bu

doğrunun eğimi, elastisite modülünü hesaplamak için kullanılır. TS EN 12390-13 standardına göre elastisite modülü aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.12)$$

σ_1 : 5×10^{-5} değerindeki birim şekil değiştirmesine karşılık gelen gerilme miktarı (MPa)

σ_2 : $(\sigma_{\max}) \times 0,4$ değerine eşit olan gerilme miktarı (MPa)

ε_1 : 5×10^{-5} değerindeki birim şekil değiştirme miktarı

ε_2 : σ_2 değerindeki birim şekil değiştirme miktarı

Eğilme ve basınç dayanımı verileri, belirli bir stres seviyesi altında deformasyonun nerede meydana geldiğini gösterir ve stres-gerinim eğrisi olarak adlandırılan bir eğri oluşturur. Deplasman kontrollü UTEST presi kullanılarak, sertleşmiş numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri belirlenmiştir. 40x40x160 prizmatik numuneler dakikada 3.9 mm deplasmanla kırılmış, 40x40x40 küp numuneler ise dakikada 4 mm deplasmanla kırılmış ve UTEST Malzeme Test programı kullanılarak elde edilen verilerle gerilme-gerinim eğrileri çizilmiştir.

4 BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Harç Bileşenlerinin Fiziksel Deney Bulguları

Bu bölümde, çimento, uçucu kül agregası ve kırma kum agregası bileşenlerinin fiziksel deney sonuçlarına dair bir inceleme yapılmıştır.

4.1.1 Fiziksel deney bulguları

Agregaların özgül ağırlıkları, balon joje ve Le Chatelier balonu kullanılarak hesaplanmıştır. Her iki yöntemde de ölçümler yapıldıktan sonra değerlerin aritmetik ortalaması bulunmuştur. Agregaların özgül ağırlık tayininde, agregalar SDKY halinde kullanılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre agregalar ve çimentonun özgül ağırlıkları Çizelge 4.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Bileşenlerin özgül ağırlıkları

Bileşenler	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
Çimento	3,12
Uçucu Kül Agregası	1,54
Kırma Kum Agregası	2,65
Uçucu Kül	1,7

Agregaların özgül ağırlıklarını doğru bir şekilde belirlenmesi, karışıma girecek malzeme miktarlarını doğrudan etkilemektedir. Gerçek değerinden daha yüksek veya daha düşük bir özgül ağırlığın hesaplanması, karışıma girmesi gereken malzeme miktarının hafife alındığı veya olduğundan fazla tahmin edildiği anlamına gelir. Eğer özgül ağırlıklar yanlış hesaplanırsa, karışımın bileşenlerinin doğru oranlarda olmadığı ve sonuç olarak malzeme özelliklerinin yanlış yorumlanabileceği bir durum oluşabilir. Bu durumda yapılan deneylerde istenmeyen sonuçlara yol açabilir.

SDKY haldeki agregaların su emme tayinlerinde en doğru sonucu elde etmek için kuru agrega ağırlıkları bulunurken etüv fırını ve nem ölçüm cihazı kullanılmıştır. Su emme değerlerinin hesaplanmasında bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır. Uçucu kül agregaları yapıları gereği boşluklu yapıda olduğu için ağırlıkça su emme kapasiteleri fazladır. Dolayısıyla mümkün olduğunca fazlaca deney yapılmış ve su emme tayini hesaplamasına oldukça önem verilmiştir.

Karışımlar yapılırken 1 m³ karışım için gerekli olan UKA miktarı hesaplanmıştır. Buna göre kullanılacak agrega miktarı belirlenmiş ve su emmesi hesaplanmıştır. Dolayısıyla karışım yapılmadan 1 gün öncesinde karışıma girecek UKA'nın doymuş hale gelmesi için su emme miktarı UKA'na eklenmiştir. Yaklaşık olarak 24 saat kadar bekletilmiştir. Sonrasında karışıma eklenmiştir. Dağcı (2018) tarafından yapılan çalışmaya göre, Seyitömer uçucu külünün %50'si görünür boşluk oranının en yüksek olduğu numunedir.

Su emme özelliği açısından en düşük değer %100 killi numunelerde bulunurken, en yüksek değer %60 Seyitömer uçucu küllü numunelerde bulunmuştur.

Elsharief vd. (2005) tarafından yürütülen deneysel çalışmada hafif agregalar kurutulmuş ve 24 saat suya doyurulmuş olarak kullanılmıştır. Bu çalışma, kılcal su emme deneyi kullanılarak suya doymuş agregaların ve kuru agregaların su emme oranları karşılaştırmıştır. Yapılan araştırmalar, suya doymuş agregaların su emme oranlarının kuru agregalara göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu, agregaların su emici özelliklerinin beton karışımlarının su geçirgenliği ve dayanıklılığını etkilediğini göstermektedir. Araştırmacılar, bu farkın nedenini, suya doymuş agregaların kullanıldığı harçlarda arayüzey mikro yapısının daha fazla boşluk içermesine bağlamışlardır.

Çizelge 4.2. Bileşenlerin su emme yüzdeleri

Agrega	Su Emme (%)
Uçucu Kül Agregası	57
Kırma Kum Agregası	3,8

Çizelge 4.3'teki veriler, agregaların yerleştirme şekillerine bağlı olarak elde edilen sıkışık ve gevşek birim hacim ağırlık deneylerinin sonuçlarını göstermektedir.

Çizelge 4.3. Agregaların gevşek ve sıkışık birim hacim ağırlıkları

Agrega	Gevşek BHA (g/cm³)	Sıkışık BHA (g/cm³)
Uçucu Kül Agregası	0,56	0,61
Kırma Kum Agregası	1,47	1,57

Bulunan verilere dayanarak, agregaların yüzdesel olarak sıkışma oranları karşılaştırıldığında kırma kum agregasının sıkışma oranının %8,92 uçucu kül agregasının ise %6,80 olduğunu hesaplanmıştır. Dolayısıyla, uçucu kül agregasının kırma kum agregasına kıyasla belirli bir hacmi daha yüksek bir doluluk oranıyla kapladığı anlaşılmaktadır. Bu, uçucu kül agregasının diğer agregalara göre daha fazla hacim kapladığı ve daha yoğun bir şekilde yerleştiğini göstermektedir.

Çizelge 4.4. Agregaların incelik modülleri

Agrega	İncelik Modülü (g/cm³)
Uçucu Kül Agregası	4,68
Kırma Kum Agregası	4,54

Yapılan ilk deneylerde uçucu kül agregasının elek analizi sonuçları kırma kum agregası sonuçlarına uzak çıkmıştır ve uçucu kül agregasının incelik modülü kırma kum agregasından düşük çıkmıştır. Dolayısıyla agregaların incelik modüllerinin ve gradasyon eğrilerinin birbirine yakın olması için oldukça fazla deney yapılmıştır. Elek analizleri neticesinde uçucu kül agregasının 0.25mm elek altında kalan parçacıkların yaklaşık yarısının karışım agregasına dahil edilmemesi ile her iki agreganın gradasyon eğrileri birbirine yakın çıkmıştır. Normalde uçucu kül agregası, kırma kum agregasına kıyasla daha ince tanelere sahip bir agregadır. Ancak, deneylerle agreganın boyutlarının birbirine yakın olması hedeflenmiştir.

4.2 Harçların Taze Hal Deney Bulguları

Çizelge 4.5. Taze haldeki harçların birim hacim ağırlık ve yayılma çapı değerleri

Karışım	BHA (g/dm³)	Yayılma Çapı (cm)
100UKA	1537,7	19
75UKA	1609,7	18,5
50UKA	1900,3	18
25UKA	2141,5	16,5
0UKA	2284,7	17

Taze harçların kıvam tayini ve birim hacim ağırlık tayini deneyleri yapılmıştır. Uçucu kül miktarı azaldıkça harçların işlenebilirliğini arttırmak için bağlayıcı miktarına %1 ve %1,5 oranında süper akışkanlaştırıcı eklenmiştir. Süper akışkanlaştırıcı, harcın akışkanlığını ve işlenebilirliğini arttırmak için kullanılan bir katkı maddesidir. Bu şekilde, uçucu kül miktarının azaltılmasıyla birlikte harcın işlenebilirliği optimize edilmeye çalışılmıştır.

Çizelge 4.1'e göre, yayılma değerlerinin 16,5 cm ile 19 cm arasında ve birim hacim ağırlık değerlerinin 1537,7 ile 2284,7 arasında değiştiği gözlenmektedir. En yüksek yayılma değeri 19 cm ile 100UKA karışımında elde edilirken, en düşük yayılma değeri ise 16,5

cm ile 25UKA karışımında görülmektedir. Bu bilgilere dayanarak, farklı karışımların yayılma değerleri ve birim hacim ağırlıkları değişkenlik göstermektedir.

Uçucu kül agregasının artışıyla yayılma çapında artış olduğu görülmekteyken, harçların birim hacim ağırlıkları ters orantılı olarak düşmektedir. Elde edilen sonuçlara göre; uçucu külün su emmesinin yüksek olması ve emeceği kadar suyun önceden ilave edilip SDKY halinde harç karışımına eklenmesi bu durumun en etkili sebeplerinden biri olarak açıklanabilir. İşlenebilirliğin, hacimce uçucu kül agregası yoğunluklu karışımlarda daha iyi olması da bu durumla bağlanabilmektedir. Mindess ve VeYoung, (1981)'a göre birçok durumda, etkin absorpsiyon değeri, agreganın belirli bir süre içinde suyu absorplayabilme kapasitesini temsil eder. Ancak, bu süreden sonra su emme hızı daha yavaş gerçekleşebilir. Bu nedenle, hafif agregaların kullanımdan önce belirli miktarda suyla doyurulması gereklidir. Bu işlem, agreganın maksimum su emme kapasitesine ulaşmasını sağlar ve yapı malzemesinin istenen özellikleriyle uyumlu hale gelmesine yardımcı olur.

Hafif agregaların su emme oranı ve su emme hızı, yapı malzemelerinin dayanıklılığı, işlenebilirliği ve performansı üzerinde etkilidir. Bu nedenle, hafif agregaların doğru su emme özelliklerine sahip olması ve gerektiğinde uygun şekilde suyla doyurulması önemlidir.

4.3 Sertleşmiş Fiziksel Hal Deney Bulguları

Bu bölümde, harç numunelerinin KURU yığın yoğunluğu, SDKY yığın yoğunluğu, görünür porozite ve ağırlıkça su emme deney sonuçları yer almaktadır. Deney sonuçları üzerinde, agrega hacimce yer değiştirme oranı etkileri tartışılmıştır. Fiziksel hal deneyleri 7 ve 28 günlük numuneler üzerinde incelenmiştir.

4.3.1 Kuru yığın yoğunluk değerleri

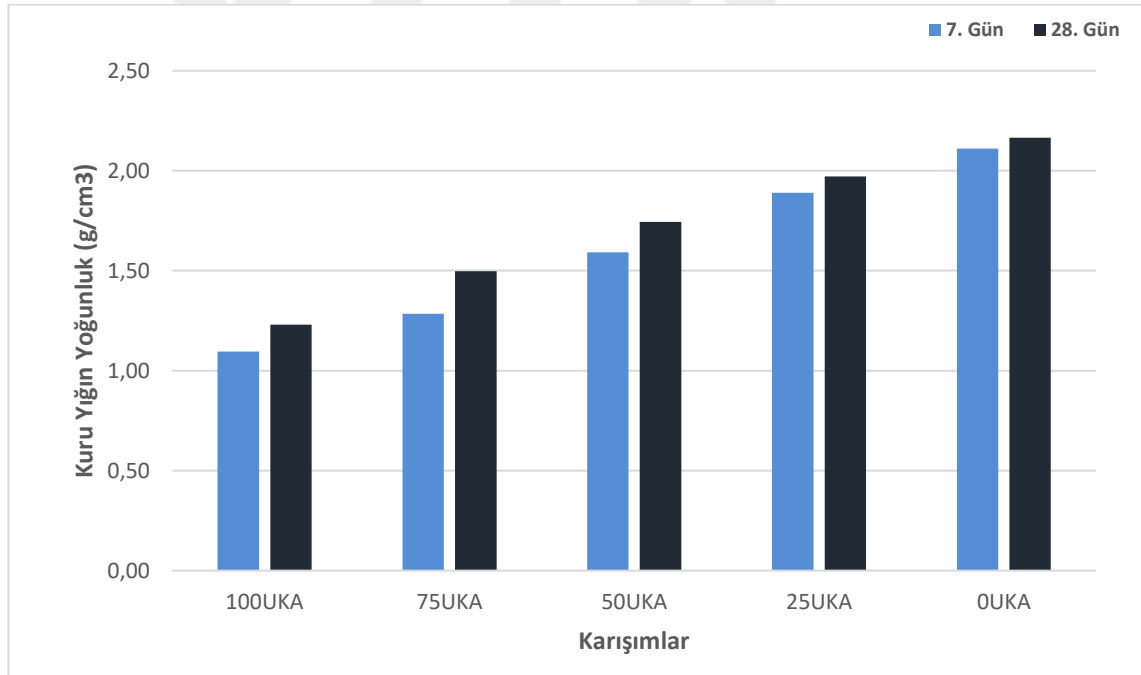
Harç numunelerin kuru yığın yoğunluk değerleri Çizelge 4.6 ve Şekil 4.1'de sergilenmektedir. Tüm karışım kodları incelendiği zaman, en düşük kuru yığın yoğunluk değeri 100UKA karışımında $1,10 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunurken, en yüksek kuru yığın yoğunluk değeri ise 0UKA karışımında $2,11 \text{ g/cm}^3$ olduğu görülmektedir. Uçucu külün yer değiştirme oranı arttıkça kuru yığın yoğunluk azalmıştır. Bu durum uçucu külün camsı bileşen içeren çok ince taneciklerden oluşması ve yoğunluğunun kırma agregaya göre daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu bulgulara benzer sonuçların elde edildiği çalışmalar literatürde mevcuttur. Ali ve Kambiz (2011) tarafından yürütülen araştırmaya göre, uçucu kül miktarındaki artışın ideal su muhtevasını artırırken, maksimum kuru birim hacim ağırlığını azalttığı gösterilmiştir. Uçucu kül miktarının artması, genellikle karışımdaki ince malzeme oranının artmasına neden olur. Bu nedenle su ihtiyacını ve optimum su muhtevası da yükseltir. Çimento ve kullanılan agregalar genellikle uçucu külden daha yüksek birim hacim ağırlığına sahipken, uçucu kül miktarı arttıkça karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalmıştır. Dolayısıyla kuru yığın yoğunluk değerlerinde de azalma görülmüştür.

Uygunoğlu (2008)'na göre hafif agregalı betonlarda kullanılan agregaların birim hacim ağırlığı, betonun dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Genel olarak, hafif agregaların yoğunluğu arttıkça, betonun dayanımı da artar.

Dağcı (2018)'in çalışmasında da Seyitömer uçucu kül numunesinin kuru birim ağırlığı diğer denediği numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Aynı şekilde bu deney sonuçlarında uçucu kül agregasının miktarı arttıkça kuru birim ağırlığında daha düşük sonuçlar bulunmuştur.

Çizelge 4.6. Karışımların kuru yığın yoğunluk değerleri (g/cm^3)

Karışım Kodu	7. Gün (g/cm^3)	28. Gün (g/cm^3)
100UKA	1,10	1,23
75UKA	1,28	1,50
50UKA	1,59	1,74
25UKA	1,89	1,97
0UKA	2,11	2,17



Şekil 4.1. Karışımların kuru yığın yoğunluk değerleri

Sertleşmiş harçların kuru yığın yoğunlukları 7 ve 28 günlük kür süresi sonunda değerlendirilmiştir. Numune yaşının ilerlemesiyle birlikte kuru yığın yoğunluk değerlerinde artış gözlenmiştir.

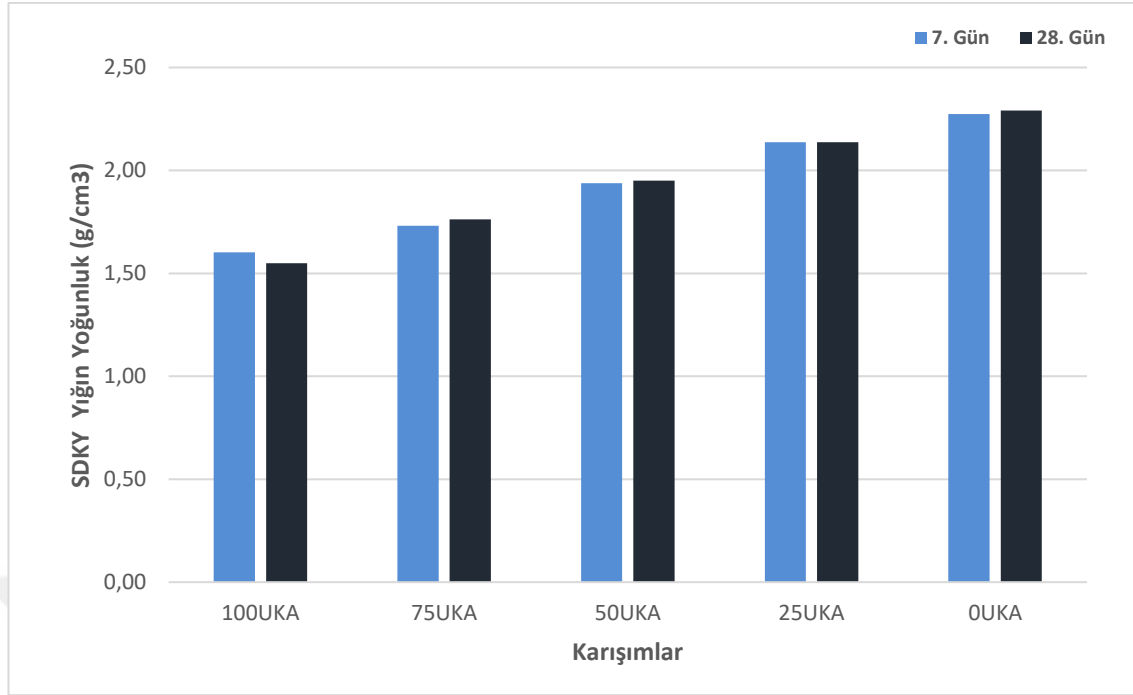
4.3.2 SDKY yığın yoğunluk değerleri

Harç numunelerin SDKY yığın yoğunluk değerleri Çizelge 4.7 ve Şekil 4.2’de görülmektedir. Tüm karışım kodları incelendiği zaman, en düşük SDKY yığın yoğunluk değeri 100UKA karışımında 7. ve 28. gün için sırasıyla 1,60g/cm³ ve 1,55 g/cm³ olarak bulunurken, en yüksek SDKY yığın yoğunluk değeri ise 0UKA karışımında 7. ve 28. gün için sırasıyla 2,27g/cm³ ve 2,29 g/cm³ olduğu görülmektedir. Uçucu külün yer değiştirme oranının artması SDKY yığın yoğunluğa düşüş olarak yansımıştır. Bu düşüşün nedeni uçucu külün su emme oranının yüksek olması ve yoğunluğunun kırma agregaya göre daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Yaşlanma süresi arttıkça genel olarak SDKY yığın yoğunluklarda az da olsa artış görülürken, %100 uçucu kül agregası içeren harç karışımındaki 28. gün sonunda alınan değerlere göre az da olsa bir düşüş olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.7. Karışımların SDKY yığın yoğunluk değerleri (g/cm³)

Karışım Kodu	7. Gün (g/cm ³)	28. Gün (g/cm ³)
100UKA	1,60	1,55
75UKA	1,73	1,76
50UKA	1,94	1,95
25UKA	2,14	2,14
0UKA	2,27	2,29



Şekil 4.2. Karışımların SDKY yığın yoğunluk değerleri

4.3.3 Karışımların görünür boşluk değerleri (GBO)

Harç numunelerin GBO değerleri Çizelge 4.8 ve Şekil 4.3'te görülmektedir. Tüm karışım kodları incelendiği zaman, en yüksek GBO değerleri 100UKA karışımında 7. ve 28. gün için sırasıyla 50,63 g/cm³ ve 32,00 g/cm³ olarak bulunurken, en düşük GBO değeri ise 0UKA karışımında 7. ve 28. gün için sırasıyla 16,32 g/cm³ ve 12,62 g/cm³ olduğu görülmektedir.

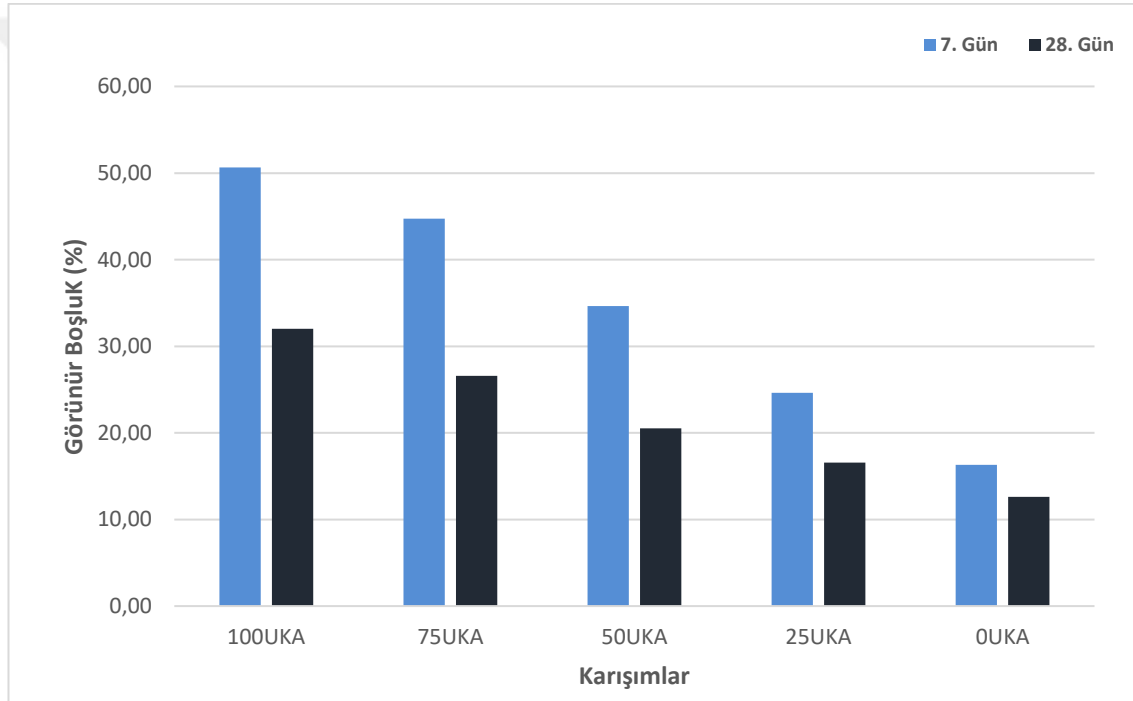
Çalışmada kırma kum agregası yerine farklı oranlarda kullanılan uçucu kül agregası, görünür boşluk oranlarında farklı değerler oluşturmıştır. Uçucu kül agregası içeriği arttıkça görünür boşluk oranlarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Su emme değeri ile görünür boşluk değerleri arasında bir paralellik bulunabilir. Dolayısıyla uçucu kül agregasının su emmesi yüksek olduğu için diğerlerine kıyasla görünür boşluk değeri fazla çıkmıştır. Buna ek olarak yaşlanma süresi arttıkça görünür boşluk değerlerinde azalma görülmüştür. 7 günlük uçucu kül agregası katkılı harç numunelerindeki görünür boşluk değeri artış oranı daha fazla görülürken 28 günlük uçucu kül agregası katkılı numunelerde bu oran daha az değişmektedir. Dolayısıyla erken yaşlarda harç karışımına eklenen uçucu kül agregası miktarının artmasıyla birlikte boşluklu bir yapı olduğu söylenebilir.

Yapılan bir çalışmaya göre görünür boşluk oranının en yüksek olduğu değer harç karışımlarında yarı yarıya kullanılan Seyitömer uçucu kül numunesidir (Dağcı 2018).

Ünal ve Uygunoğlu (2004) uçucu külün inşaat sektöründe değerlendirilmesi adlı çalışmasında uçucu kül katkısının artışıyla su emme ve boşluk oranının arttığını gözlemlemişler. Ayrıca kürlenme süresi arttıkça boşluklu yapıda azalmalar da olmuştur.

Çizelge 4.8. Karışımların görünür boşluk değerleri (%)

Karışım Kodu	7. Gün (%)	28. Gün (%)
100UKA	50,63	32,00
75UKA	44,73	26,59
50UKA	34,65	20,54
25UKA	24,63	16,56
0UKA	16,32	12,62

**Şekil 4.3.** Karışımların görünür boşluk değerleri

4.3.4 Su emme yüzdesi değerleri

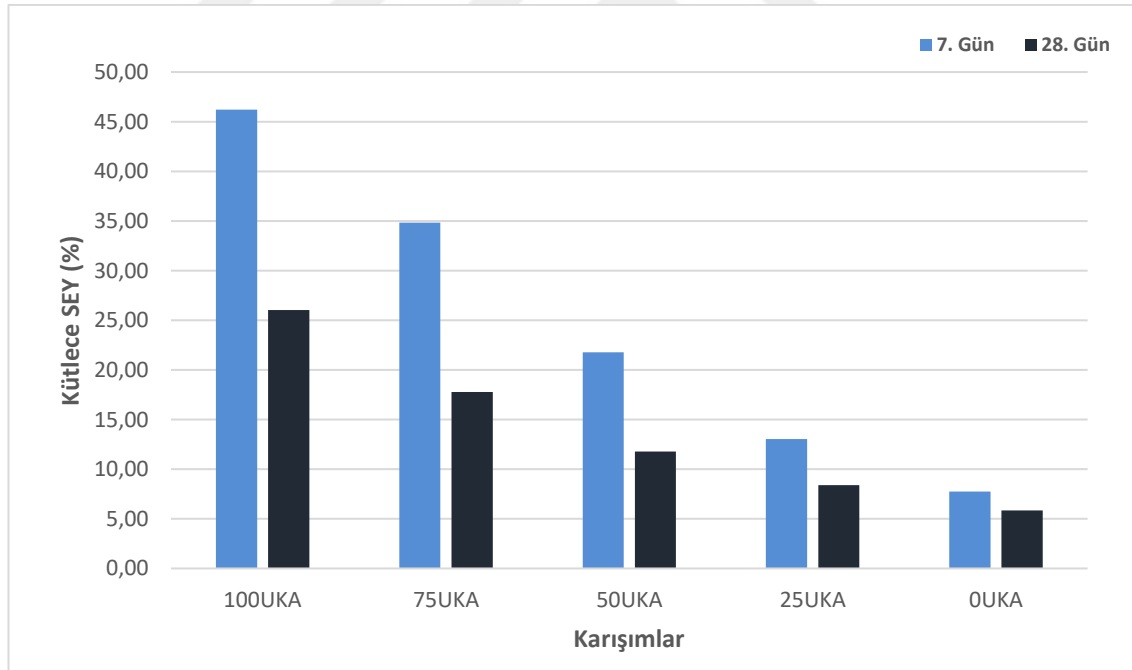
Harç numunelerin su emme yüzdesi değerleri Çizelge 4.9 ve Şekil 4.4'te görülmektedir. Tüm karışım kodları dikkate alındığında, en yüksek su emme yüzdesi değerleri 100UKA karışımında 7. ve 28. gün için sırasıyla 46,22 g/cm³ ve 26,03 g/cm³ olarak bulunurken, en düşük su emme yüzdesi değerleri 0UKA karışımında 7. ve 28. gün için sırasıyla 7,73 g/cm³ ve 5,83 g/cm³ olarak tespit edilmiştir.

Deneylerde, harçların su emme değerlerinin uçucu kül agregası miktarının artmasıyla paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Diğer bir deyişle, uçucu kül agregasının artmasıyla su emme değerlerinde bir artış görülürken, kırma kum agregası miktarının artmasıyla bu

değerlerin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durumun sebebi, uçucu kül agregasının daha ince tane boyutlarına sahip olmasıdır. Bu etki, matrisin içindeki ince malzeme oranının artmasına ve sonuç olarak boşlukları doldurup geçirimsizliği arttırmasına olanak sağlamaktadır.

Çizelge 4.9. Karışımların SEY değerleri (g/cm³)

Karışım Kodu	7. Gün (g/cm ³)	28. Gün (g/cm ³)
100UKA	46,22	26,03
75UKA	34,82	17,76
50UKA	21,77	11,77
25UKA	13,03	8,40
0UKA	7,73	5,83



Şekil 4.4. Karışımların kütlege SEY (su emme yüzdesi) değerleri

Harçlarda su emme değerleri ile görünür boşluk oranları arasında doğru orantılı bir ilişki gözlenmektedir. Yani, su emme değeri yüksek olan harçlar genellikle daha fazla görünür boşluk oranına sahiptir. Öte yandan, harçların su emme oranıyla kuru yığın yoğunlukları

arasında ters bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Daha düşük kuru yığın yoğunluğu olan harçlar genellikle daha yüksek su emme değerlerine sahiptir.

Lkhagva (2006) tarafından yapılan deney sonuçlarına göre, Seyitömer termik santrali uçucu külün mikroyapısı kendine özgü bir yapıya sahiptir. Bu uçucu külün şekilsiz ve süngerimsi bir dokusu olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, bu yapı su ihtiyacını artırıcı bir nitelik gösterdiğini belirtmiştir.

Bu çalışmada kullanılan Seyitömer uçucu külünden mevcut yöntemlerle üretilen agregalar fazla gözeneklilik ve su emme kapasitesi göstermiştir. Soğuk bağlama yöntemi kullanıldığı ve presleme işlemi yapılmadığı için üretilen agregalar gözenekli yapıdadır. Bu agregaların su emilimini azaltmak ve şişmesini önlemek için sinterlenmesi gerektiği düşünülmektedir. Koçkal ve Özturan (2010-2011) çalışmalarında da soğuk bağlama işleminde su geçirgenliğinin sinterleme işlemine göre daha fazla olduğunu bulmuşlardır.

4.3.5 Kılcal geçirimlilik deneyi bulguları

Gesoğlu vd. (2012) tarafından belirtildiği gibi kılcal su geçirgenliği, beton veya harç numunelerinin su geçirgenliğini değerlendirmek için kullanılan dayanıklılık testlerinden biridir. Malzemenin boyutu, türü, gözenek yapısı, çimento bazlı kimyasal veya mineral bileşenleri, harç veya beton karışımını oluşturmak için kullanılan karışım oranları ve hava boşluklarının hacmi ve boşluk yapısı suya ne kadar geçirgen olduğunu etkiler.

Harçların kılcal su emme katsayısı değerleri Çizelge 4.10-11 ve Şekil 4.5-6'da gösterilmiştir. Karışımlar incelendiğinde, 1.dk, 5.dk, 20.dk, 40.dk, 1.sa, 24.saatteki en yüksek kılcal su emme katsayısını 7. gün için $5,35 \times 10^{-3} \text{ cm/sn}^{1/2}$ olmak üzere 75UKA numunesi gösterirken, en düşük değeri ise 0UKA 0,84 $\text{cm/sn}^{1/2}$ numunesi göstermektedir. 28. gün için, 1.dk, 5.dk, 20.dk, 40.dk, 1.sa, 24.saatteki en fazla kılcal su emme katsayısı $3,76 \times 10^{-3} \text{ cm/sn}^{1/2}$ olmak üzere 100UKA numunesi gösterirken, en düşük değeri ise $0,61 \times 10^{-3} \text{ cm/sn}^{1/2}$ olmak üzere 0UKA numunesinden elde edilmiştir. Karışımların kılcal su emme katsayıları için K1, K5, K20, K40, K60, K60*24 verilen bu kodlamalar sırasıyla 1. Dakika, 5. Dakika, 20. Dakika, 40. Dakika, 60. Dakika ve 1 günlük şeklinde açıklanmaktadır.

Karışım sonuçları incelendiğinde uçucu kül agregası oranı arttıkça kılcal su emme katsayılarında da artış gözlemlenmiştir. Ayrıca kılcal su emme sürelerindeki artış ile kılcal su emme katsayıları ters orantılıdır. Kılcal su emme süreleri arttıkça her karışım serisindeki kılcal su emme katsayılarında azalış görülmektedir. Kılcal su emme katsayıları 1. dakikada her karışım serisi için en yüksek değerleri gösterirken 24 saatte en düşük kılcal su emme katsayılarına sahiptir.

Dağcı (2018)'in yaptığı deney sonuçlarına göre kılcal geçirimlilik değerleri farklı numuneler arasında değişmektedir. %40 Seyitömer uçucu küllü numunede 850°C'de en yüksek kılcal geçirimlilik gözlenirken, Seyitömer uçucu küllü numunenin %50'sinde 950°C'de en yüksek kılcal geçirimlilik tespit edilmiştir. Ayrıca, 850°C'de killi numunede en az kılcal geçirimlilik saptanmıştır. Çayırhan uçucu küllü numunelerle karşılaştırıldığında, Seyitömer uçucu kül katkılı numuneler daha yüksek kılcal geçirimlilik göstermektedir.

Lkghva (2006) tarafından yapılan çalışmaya göre Tunçbilek ve Seyitömer uçucu küllerinin mikroyapıları incelendiğinde, bu küllerin şekilsiz ve süngerimsi bir dokuya sahip olduğu görülmüştür. Bu süngerimsi dokuları, su ihtiyacını artırıcı bir niteliğe sahip olmalarını sağlamaktadır. Pelet numuneleri üzerinde yapılan analizlerde, Tunçbilek ve Seyitömer uçucu küllerinin pelet numunelerinin en yüksek oranda nem içerdiği belirlenmiştir. Bu pelet numuneleri ağırlıkça yaklaşık olarak %25,13 ve %23,49 oranında nem içermektedir. Diğer uçucu küller ise daha az süngerimsi yapılara sahip olduğu için pelet numuneleri daha az oranda nem içermektedir.

Seyitömer uçucu külden soğuk bağlama yöntemiyle yapılan uçucu kül agregasının mikroyapıları gereği su ihtiyacı fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun uçucu kül agregası kılcal geçirgenliğine artış olarak yansımakta olduğu görülmektedir.

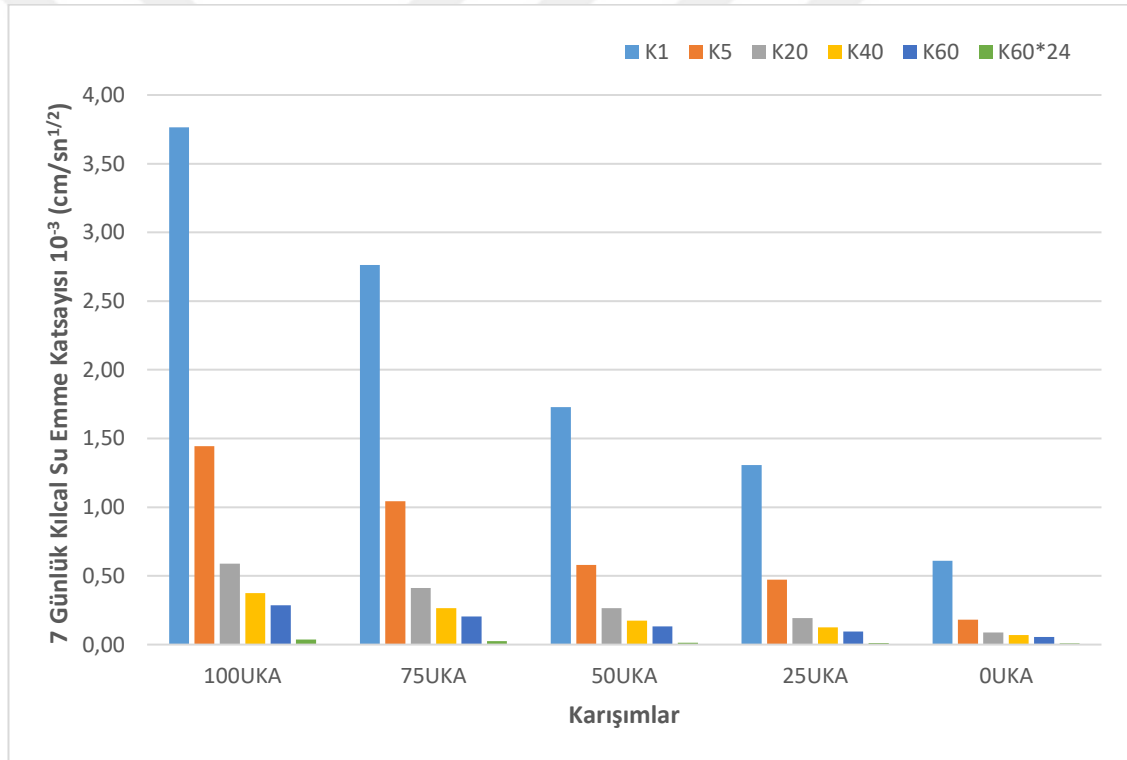
Gomathi,ve Sivakumar (2015) yaptıkları çalışmada farklı uçucu kül agregalı beton karışımları arasında, soğuk bağlı uçucu kül-bentonit agregalı beton karışımları (62BT-CB) için maksimum su emilimi $5,67 \times 10^{-3} \text{ cm/s}^{0,5}$ olarak elde edilmiştir. %40 soğuk bağlı uçucu kül bentonit agregası içeren betonda (40BT-CB) minimum $4,55 \times 10^{-3} \text{ cm/s}^{0,5}$ ’lik bir su emilimi gözlemlenmiştir. Sinterlenmiş uçucu kül-bentonit agregalı beton (62BT-S) durumunda, su emiliminin soğuk bağlı uçucu kül agregası betonlarından daha düşük olduğu bulunmuştur. Bunun başlıca nedeni, sinterlenmiş agregaların soğuk bağlı agregalara kıyasla daha az gözenekliliğe ve rafine mikroyapısal gelişime sahip olmasıdır. Yine Gomathi ve Sivakumar (2015)’a göre sorpsiyon, yerçekimine karşı hareket eden betonun kılcal kanallarından geçen betonda bulunan yüzey nemini emmesi olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle, uçucu kül agregalı betonun kılcal sorptivitesini ölçmek için ideal bir test yöntemi olarak değerlendirilebilir.

Çizelge 4.10. Sertleşmiş harç karışımlarının 7 günlük kılcal su emme katsayıları ($\times 10^{-3} \text{ cm/sn}^{1/2}$)

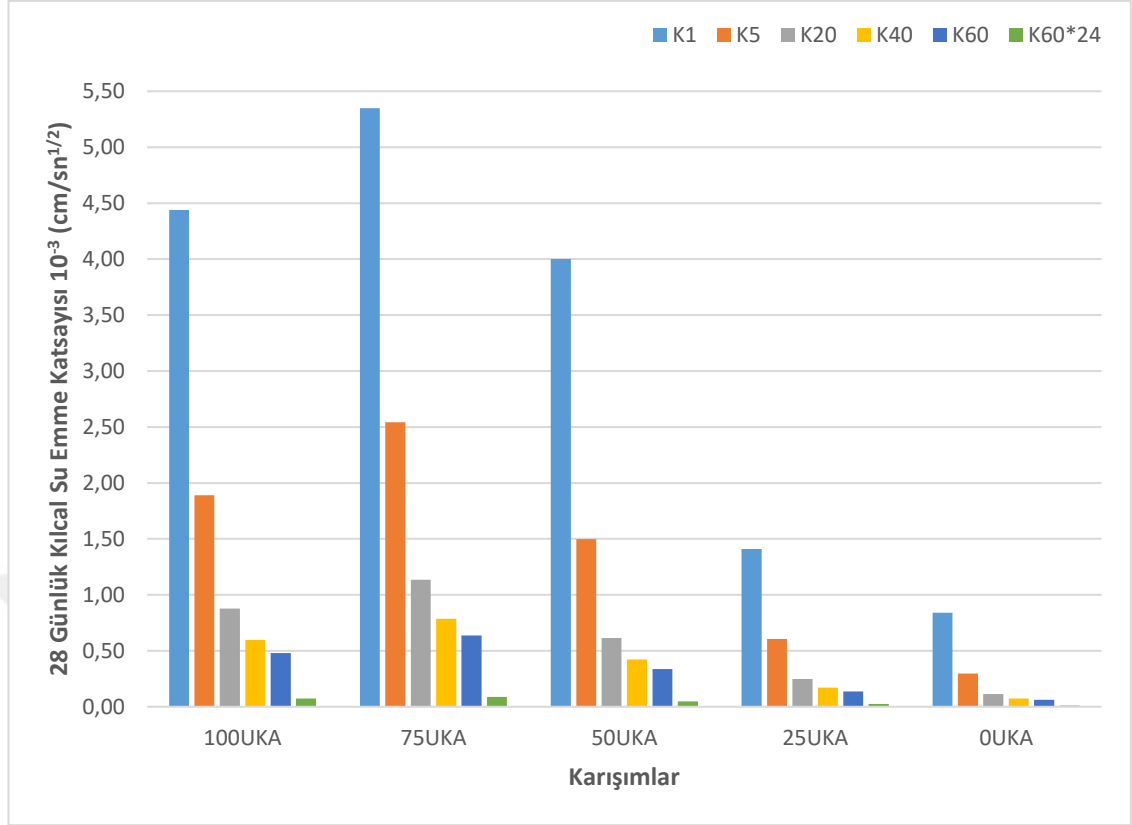
Karışım Serisi	K1	K5	K20	K40	K60	K60*24
100UKA	4,44	1,89	0,88	0,60	0,48	0,07
75UKA	5,35	2,54	1,13	0,79	0,64	0,09
50UKA	4,00	1,50	0,61	0,42	0,34	0,05
25UKA	1,41	0,61	0,25	0,17	0,14	0,02
0UKA	0,84	0,30	0,11	0,07	0,06	0,01

Çizelge 4.11. Sertleşmiş harç karışımlarının 28 günlük kılcal su emme katsayıları ($\times 10^{-3}$ cm/sn^{1/2})

Karışım Serisi	K1	K5	K20	K40	K60	K60*24
100UKA	3,76	1,44	0,59	0,37	0,29	0,04
75UKA	2,76	1,04	0,41	0,27	0,20	0,02
50UKA	1,73	0,58	0,26	0,17	0,13	0,01
25UKA	1,31	0,47	0,19	0,12	0,10	0,01
0UKA	0,61	0,18	0,09	0,07	0,06	0,01



Şekil 4.5. Sertleşmiş harç karışımlarının 7 günlük kılcal su emme katsayı değerleri



Şekil 4.6. Sertleşmiş harç karışımlarının 28 günlük kılcal su emme katsayı değerleri

4.4 Soğuk Bağlanmış Agregaların Mekanik Hal Deneyi Bulguları

4.4.1 Uçucu kül agregalarının eğilmede çekme dayanım değerleri

Bu çalışmada ayrıca uçucu kül agregalarının eğilmede çekme dayanımları tayin edilmiştir. Deneyler 7 ve 28 günlük plastik poşette kürlenmiş uçucu kül agregaları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uçucun kül agregasının 7 ve 28 günlük eğilmede çekme dayanımı sonuçlarına bakıldığında sırasıyla 2,29MPa ve 3,03MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.7. Uçucu kül agregası numunesinin eğilmede çekme dayanım testi sonrası kırılma yüzeyi

Uçucu kül agregası numunesinin eğilmede çekme dayanımı testi sonrası kırılma yüzeyi, Şekil 4.8'de gösterildiği gibi basınçtan etkilenmemiş ve yüzeyleri boyunca kırılmıştır.

4.4.2 Uçucu kül agregalarının basınç dayanım değerleri

Bu çalışmada, uçucu kül agregalarının basınç dayanımları da belirlenmiştir. Deneyler, 7 ve 28 günlük sürelerde plastik poşet içerisinde kürlenmiş uçucu kül agregaları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uçucu kül agregasının 7 ve 28 gün boyunca basınç dayanımı test sonuçları sırasıyla 6,04 MPa ve 10,02 MPa olarak bulunmuştur.

Portland çimentosu kullanılmadıkça F sınıfı uçucu kül kullanımının soğuk bağlı hafif agregada üretiminde uygun olmadığı öne sürülmektedir. Çalışmada kullanılan uçucu kül ASTM C618 F sınıfı olduğundan ve kendi başına herhangi bir çimento özelliği taşımadığından bu uçucu kül ile yapılan hafif agregalar suda ayrışabilen tanecikleridir. Bağlayıcı olarak uçucu küle az miktarda Portland çimentosu eklenerek üretilen agregaların dayanıma etkisi yetersiz kalmıştır. Bu durumun birden fazla olası nedeni olabilir. Örneğin, uçucu kül ve Portland çimentosu arasındaki kimyasal etkileşimlerin yetersiz olması, kullanılan malzemelerin uyumsuzluğu veya karışım oranlarının optimize edilmemesi gibi faktörler etkili olabilmektedir. Fakat agregada üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan Portland çimentosu oranının artırılmasıyla dayanımda da artış olduğu görülmüştür.

4.5 Sertleşmiş Harçlarda Mekanik Hal Deneyi Bulguları

Numunelerin mekanik özellikleri üzerinde fiziksel özelliklerin etkisi önemli bir faktördür. Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı gibi mekanik testler, beton numunelerinin dayanıklılığını ve taşıma kapasitesini değerlendirmek için kullanılan önemli parametrelerdir. Bu bölümde, numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki fiziksel özelliklerin etkilerini göz önünde bulundurarak, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı testlerinin sonuçları tartışılmıştır.

4.5.1 Eğilmede çekme dayanımı değerleri

4.5.1.1 Harç numunelerinin eğilmede çekme dayanım değerleri

Eğilmede çekme dayanımı testleri, numunelerin 7. ve 28. günlerinde gerçekleştirilmiş ve numunelere ait dayanım değerleri Çizelge 4.12 ve Şekil 4.7'de sunulmuştur. Genel olarak incelendiğinde karışım numunelerinin 7 ve 28 günlük eğilmede çekme dayanımları arasında çok büyük bir farklılık görülmemiştir. UKA miktarının azalmasıyla eğilmede çekme dayanımları artmıştır. Soğuk bağlanmış agregada karışımli harç, 7 günlük maksimum agregada (UKA100) değişimi için maksimum 3,60 MPa eğilmede çekme dayanımı göstermiştir. Ardından UKA75 numunesinin 7 günlük eğilmede çekme dayanımları 3,86 MPa olarak bulunmuştur. Bu numuneler arasındaki fark incelendiğinde birbirlerine çok yakın değerler çıktığı görülmektedir. Fakat aynı numunelerin 28 günlük eğilmede çekme dayanımları incelendiğinde sırasıyla 3,67 MPa ve 4,12 MPa ölçüldüğü görülmektedir. UKA100 ve UKA75 numunelerinin 7 günlük dayanımları arasında %7'lik bir artış olurken 28 günlük dayanımları arasında %12'lik bir artış görülmektedir. Bu duruma kür süresinin artması gösterilebilir. Ayrıca uçucu kül agregada oranının artması

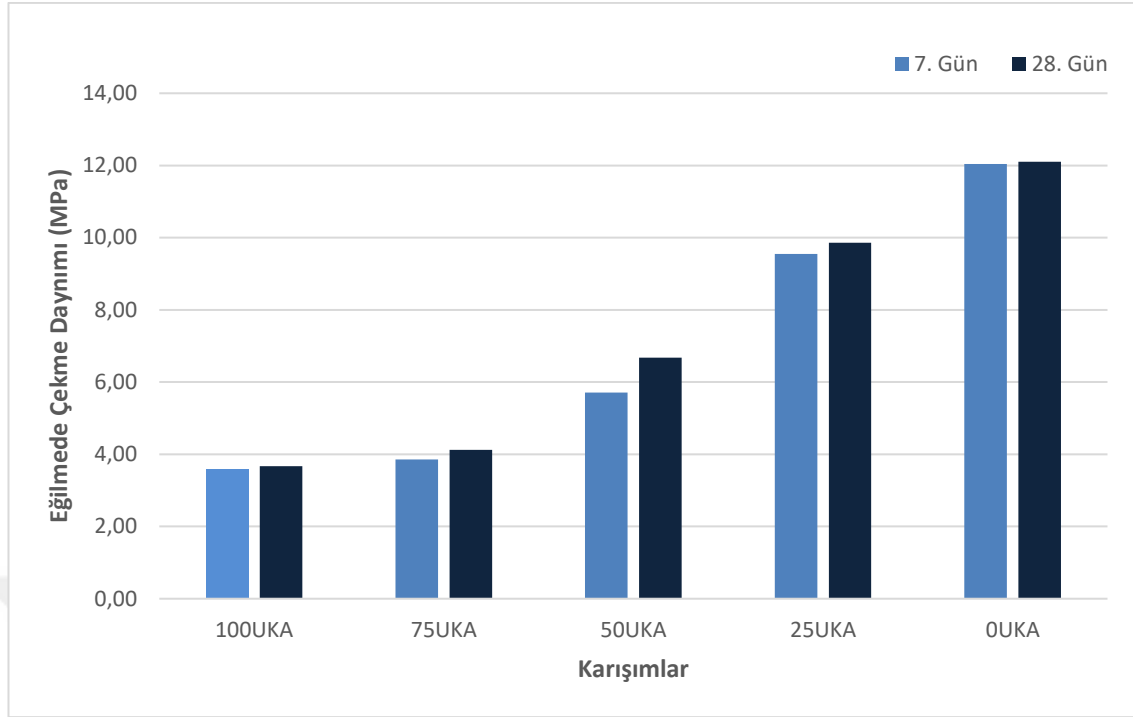
eğilmede çekme dayanımını düşürmektedir. Uçucu kül gibi hafif agregaların matristeki kötü davranışı ve fiziksel özellikleri bu duruma neden olabilir. Bu konuyla ilgili yapılan araştırmalarda da aynı durum söz konusu olmuştur.

Gomathi ve Sivakumar (2015) yaptığı bir çalışmada daha yüksek uçucu kül agrega ilaveleri, uçucu kül agregalarından kaynaklanan göçme düzlemi nedeniyle (testten sonra kırık beton yüzeyinden gözlemlendiği gibi) mukavemet artışına neden olmadığını görmüşlerdir. Bu durumun açıkça, betonun çekme özellikleri, beton numunesinde maksimum çap geriliminin gelişmesi nedeniyle agregalardan ziyade harç özelliklerine (agreganın düşük elastik modülünden dolayı) bağlı olduğunu vurgulamıştır.

Köker (2019) hafif agrega katkılı beton geopolimer harçların mekanik ve durabilite özellikleri çalışmada geopolimer harçların eğilme dayanım değerleri, uçucu kül agrega ilavesi ile birlikte 1., 7., ve 28. günlerde %25 uçucu kül agrega içeriğinden sonra sürekli olarak düştüğü gözlenmiştir. Bu durumun agreganın matris içerisindeki zayıf davranışından ve fiziksel özelliklerinden kaynaklandığı söylenebilir.

Çizelge 4.12. Karışımların eğilmede çekme dayanımı değerleri (MPa)

Karışım Kodu	7. Gün (MPa)	28. Gün (MPa)
100UKA	3,60	3,67
75UKA	3,86	4,12
50UKA	5,71	6,67
25UKA	9,55	9,86
0UKA	12,04	12,10



Şekil 4.8. Karışımların eğilmede çekme dayanımı değerleri (MPa)

4.5.2 Basınç dayanımı değerleri

4.5.2.1 Harç numunelerinin basınç dayanım değerleri

Numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı test sonuçları Çizelge 4.13 ve Şekil 4.9'da gösterildiği gibidir. 7. ve 28. günlük basınç dayanım değerleri incelendiğinde, en düşük basınç dayanım değeri 75UKA numunesinde tespit edilmiştir. Bu 75UKA numunesinin basınç dayanım değerleri sırasıyla 8,37 MPa ve 13,57 MPa olarak hesaplanmıştır. En yüksek değere sahip olan 0UKA'nın 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında sırasıyla 39,94MPa ve 44,36MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca kür süresi arttıkça basınç dayanımlarında da artışlar görülmektedir. 100UKA numunesinin basınç dayanımını 75UKA numunesine göre daha fazla çıkması beklenirken az bir fark olsa da daha düşük çıkmıştır. Bunun nedeni olarak malzemenin mineralojik özelliğinin etkili olduğu düşünülmektedir. Bu sonuçlara göre UKA miktarındaki artışa bağlı olarak dayanımlarda düşüş görülmüştür. Bunun başlıca nedeni, UKA'nın puzolan reaksiyonunun normal sıcaklıkta yavaş bir süreç olmasından kaynaklanmaktadır.

Lkhagva (2006) tarafından yapılan çalışmada, Seyitömer uçucu kül agregasıyla üretilen beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımının 13.81 N/mm² değeri ile en düşük olduğu tespit edilmiştir.

Gomathi ve Sivakumar (2015) yaptıkları çalışmada uçucu kül agrega katkılı betonun etkileri, çeşitli mekanik özellikler açısından değerlendirilmiştir. Test sonuçları, sinterlenmiş uçucu kül agregalarının maksimum ikamesinin (%62) soğuk bağlı agregalara

kıyasla mukavemette kayda değer bir gelişme gösterdiğini göstermiştir. En önemlisi, soğuk bağlı agrega ikamesi durumunda, buharla kürlen beton numunelerin mukavemet kazancı, sıcak suyla kürlen beton karışımlarından nispeten daha yüksek çıkmıştır. Test sonuçları ayrıca betonun basınç dayanımının çimento içeriği ile arttığını göstermiştir. Test edilen uçucu kül agregalı beton karışımlarının basınç dayanımı, kaba agreganın hacmine ve uygulanan kürleme yönteminin türüne bağlı olduğunu vurgulamıştır.

Dağcı (2018), çalışmasında %100 killi numunelere kıyasla 850 °C'de Seyitömer ve Çayırhan uçucu küllü numunelerin basınç dayanımlarının daha düşük olduğunu bulmuştur. Bu durum, uçucu kül içeren numunelerin kil numunelere kıyasla daha düşük basınç dayanımında olduğunu göstermektedir. Öte yandan, 950 °C sıcaklıkta %10 Seyitömer uçucu küllü numunenin, diğer numunelere ve %100 killi numuneye göre en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu tespit etmiştir. Bu sonuçlar, farklı uçucu kül içeriği ve sıcaklık değerlerinin basınç dayanımı üzerinde etkili olduğunu ve Seyitömer uçucu kül agregası miktarının artmasıyla basınç dayanımında düşüşler olduğunu göstermektedir.

Dayanım azalmasının betonun yoğunluğu ile doğru orantılı olduğu da tahmin edilmektedir; burada yoğunluktaki azalma, dayanımda azalma ile sonuçlanmıştır.

Uçucu kül miktarının artmasıyla basınç dayanımındaki düşüş değeri her uçucu kül tipi için farklılık göstermektedir. Bu farklılık, uçucu külün kimyasal bileşim ve parçacık büyüklüğü dağılımının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bazı diğer uçucu küller, Seyitömer uçucu külünden farklı olarak yalnızca puzolanik özelliklerle sınırlı kalmayıp aynı zamanda bağlayıcı özellik de gösterir. Bu özellikleri sayesinde, diğer uçucu küller ile hazırlanan karışımlar, Seyitömer uçucu külü ile karşılaştırıldığında daha yüksek dayanım elde etmektedir.

Literatürde, çeşitli agregalar kullanılarak yapılan betonların basınç dayanımına ilişkin özellikleri incelendiğinde, soğuk bağlanmış agregaların en az, sinterlenmiş uçucu kül agregalarının fazla ve genişletilmiş kil agregasının en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Koçkal ve Özturan (2007) yaptığı bir araştırmada hafif agregaların dayanımı ve elastisite modülü değerleri, agrega içindeki boşlukların dağılımına, biçimine ve toplam hacmine bağlı olarak değişeceğini belirtmiştir. Hafif agregalı betonlar, büyük ve düzensiz biçimlenmiş boşluklar nedeniyle genellikle daha düşük dayanıma sahiptir.

Hossain (2004) çalışmasında da betonun basınç dayanımı, elastisite modülü, hafif agregaların hacmi, agrega-çimento matriksi arayüzeyi ve beton bileşenlerinin elastik özellikleri gibi faktörlerden etkilendiğini belirtmiştir.

Gesoğlu vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada, agrega tipinin beton üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada 28 ve 56. günlerde basınç testi yapılarak beton numunelerin dayanımı ölçülmüştür. Agregada çimento kullanılması, agreganın özgül ağırlığını artırırken aynı zamanda su emme oranını azaltır. F sınıfı uçucu küllerin düşük bağlayıcılık özelliğine sahip olması nedeniyle, agrega üretiminde kullanılmalarının uygun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, hafif betonların dayanımının agrega dayanımı üzerinde doğrudan etkisi olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmada, peletleştirilmiş agregalarla üretilen betonlarda çimento oranının artmasıyla dayanımın arttığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, çimento içeriği miktarının hafif betonların basınç dayanımındaki değişimi

yöneten hafif agregaların gücü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Joseph ve Ramamurthy (2009) tarafından yapılan çalışmada ise, değişik karışım oranlarına sahip soğuk bağlı uçucu kül agrega betonlarının basınç dayanımı ve çalışılabilirlik üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, Tepki Yüzeyi Metodolojisi kullanılarak istatistiksel olarak tasarlanmış deneyler yapılmış ve soğuk bağlı agreganın hacim fraksiyonu, su içeriği, çimento içeriği gibi değerlerin beton özellikleri üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Soğuk bağlı uçucu kül agregalı betonlar için yeni bir karışım tekniği geliştirilmiştir. Bu teknik, agreganın kırılmasına ve betonun dayanımının azalmasına neden olan çimento bileşimindeki artışın yanı sıra soğuk bağlı agregada hacim oranının artmasının betonun özelliklerini etkilediğini göstermiştir.

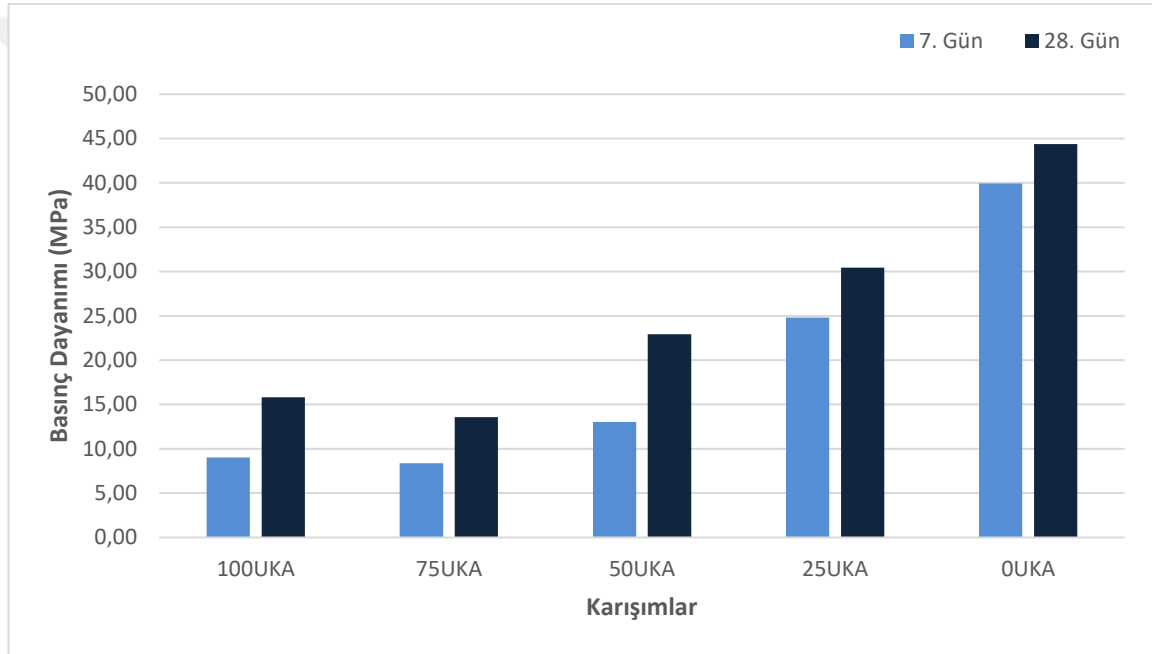
Güneyisi vd. (2013) tarafından yürütülen çalışmada, soğuk bağlanmış veya sinterlenmiş uçucu kül agregaları kullanılarak hafif betonların dayanım ve özellikleri incelenmiştir. Çalışmada Portland çimentosu ve F sınıfı uçucu kül kullanılarak soğuk bağlı agrega, bentonit ve uçucu kül agrega peletlerinden oluşan sinterlenmiş agregalar üretilmiştir. İki farklı su/bağlayıcı oranına sahip biri 0,35 diğeri ise 0,55 olan beton serisi tasarlanmıştır. Soğuk bağlı ve sinterlenmiş agregalardan oluşan betonların dayanımları, 28 günlük kürlenme süresince gaz geçirgenliği ve hızlı bir şekilde klorür iyonu geçirgenliği gibi faktörler göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Ayrıca basınç dayanım testi yapılarak aynı yaşta dayanım düzeyleri de gözlemlenmiştir. Bu çalışma, sinterlenmiş agrega içeren hafif betonun, soğuk bağlı agrega içeren hafif betona göre daha iyi çalıştığını göstermiştir. Sonuçlar da sinterlenmiş agregaların betonun dayanım ve geçirimsizlik özelliklerini artırabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla soğuk bağlı agregalar sinterlenmiş agregalara göre daha az dayanım göstermektedir.

Agregalara kırma yöntemi uygulandığı için beton içinde pürüzlü bir yapı oluşturabilir ve bu durum, önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi 0,40 su/çimento oranı için kenetlenmeyi artırabilir. Bununla birlikte, agregaların gözenekli bir yüzeye sahip olmaması, agrega ve çimento matrisi arasındaki yüzey geçiş bölgesinin dayanımını etkileme potansiyeline sahiptir. Gözeneksiz bir yüzey, agrega ve çimento matrisi arasında tam bir bağlantı sağlamada zayıf noktalar oluşturabilir, yeterli mekanik tutunmayı sağlamayabilir ve bu da betonun genel dayanımını etkileyebilir. Bu durumun, beton numunelerinde düşük dayanım değerlerine yol açabileceği söylenebilir.

Yapılan bu çalışmalara göre uçucu kül agregasının harç malzemesi olarak kullanılması genel olarak daha düşük dayanım değerleri gösterse de uçucu kül agregasının üretim olasılığı Verma vd. (1998) tarafından tartışılmıştır ve blok yapımı veya diğer uygulamalarda da kullanılabileceği belirtilmiştir (Garg vd. 1995). Dolayısıyla bu çalışma için de aynı durumun geçerliliği söz konusudur.

Çizelge 4.13. Karışımların basınç dayanımı değerleri (MPa)

Karışım Kodu	7. Gün (MPa)	28. Gün (MPa)
100UKA	9,01	15,82
75UKA	8,37	13,57
50UKA	13,03	22,91
25UKA	24,80	30,42
0UKA	39,94	44,36

**Şekil 4.9.** Karışımların basınç dayanımı değerleri (MPa)

4.5.3 Mekanik deneylerden elde edilen gerilme şekil değiştirme grafikleri

7. ve 28. günlerde sertleştirilmiş harçlar üzerinde yapılan eğilme ve basınç deneylerinden elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak karışımların karışımların, basınç ve eğilme yükleri altında gerilme-şekil değiştirme davranışları incelenmiştir. Bu deneylerin amacı, karışımların mekanik davranışını daha ayrıntılı bir şekilde analiz etmek ve harcın dayanıklılığını, elastik ve plastik deformasyon özelliklerini değerlendirmektir.

Basınç yükleri altındaki 7 ve 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, uçucu kül agregasının artmasıyla birlikte dayanımlar düşüş gösterse de şekil değiştirmesi devam etmiştir ve şekil değiştirme davranışları daha sünek bir yapıda seyretmiştir. Uçucu kül agregası içeriğinin artmasıyla birlikte betonun dayanımında genellikle bir düşüş

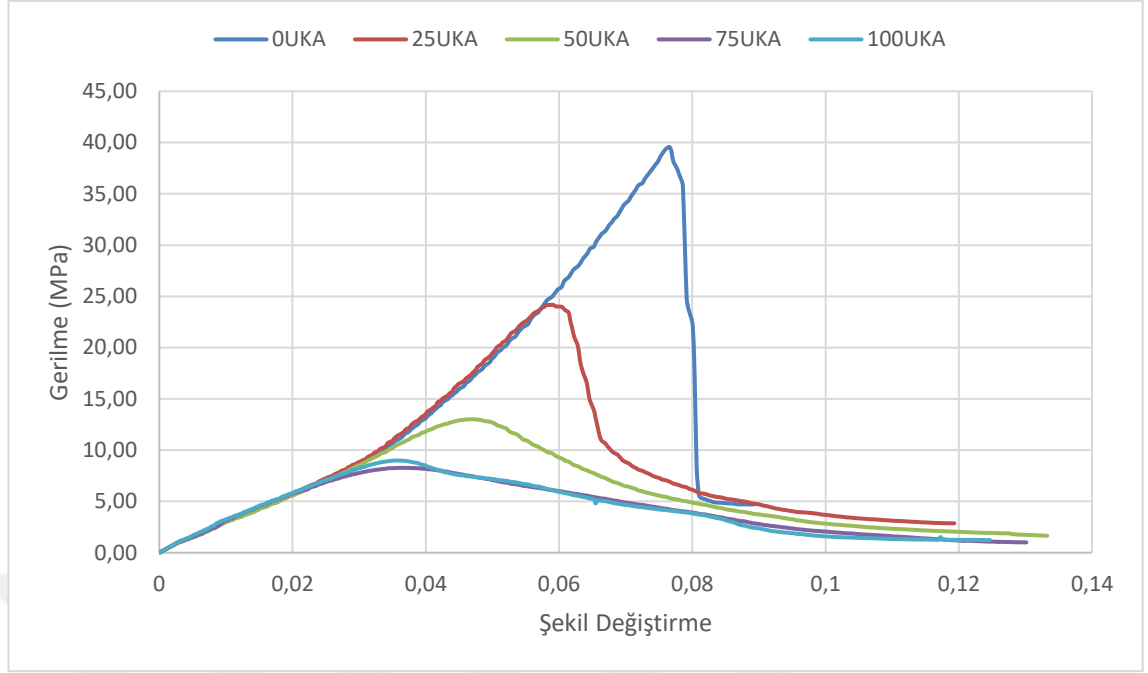
meydana gelirken, yük taşıma kapasitesinde bir artış gözlenebilmektedir. Uçucu kül, agregalar arasındaki bağları güçlendirebilir ve betonun daha iyi bir yapısal bütünlüğe sahip olmasını sağlayabilir.

75UKA, 50UKA, 25UKA ve 100UKA agrega numunelerinin dayanımları ile kür süresi arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Başka bir deyişle, kür süresi arttıkça bu numunelerin dayanımı da artmaktadır. Aynı şekilde, şekil değiştirme davranışı da kür süresi ile yükselmektedir. Bu demektir ki, numunelerin plastik bölgedeki deformasyon kabiliyeti kür süresiyle birlikte az da olsa artış göstermiştir (Şekil 4.10-11).

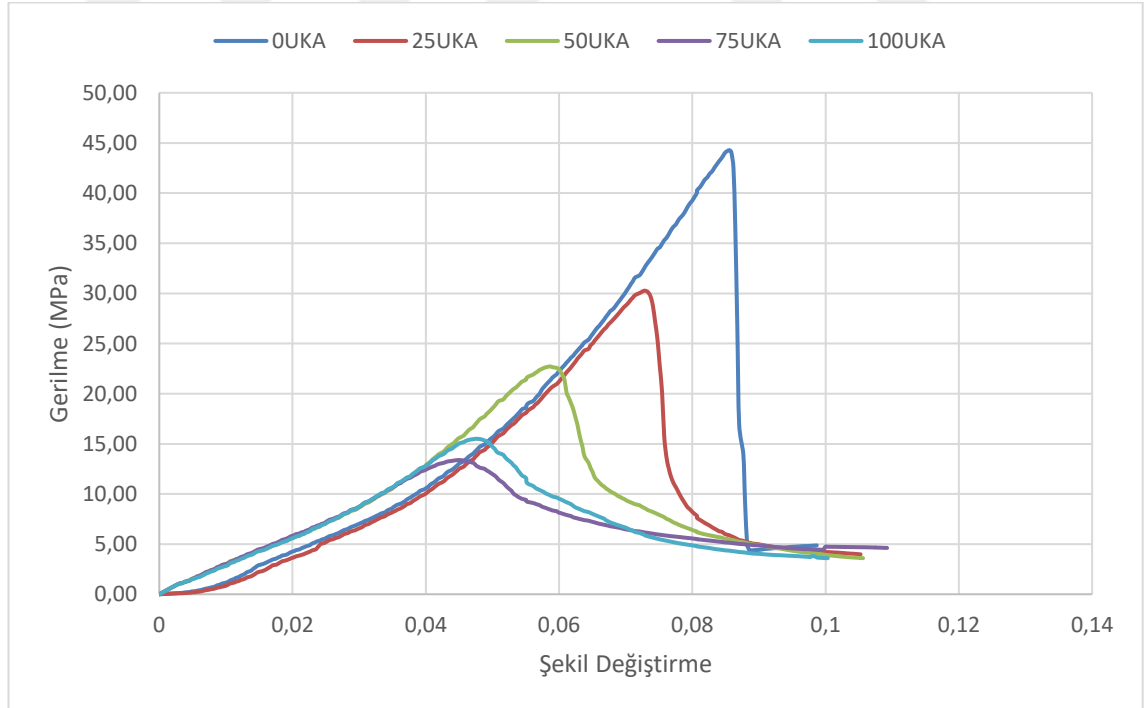
Numunelerin şekil değiştirme yetenekleri, içerdikleri agregaların cinsine ve miktarına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Nesbit (1996)'e göre Elastisite modülü, kullanılan agregaların boyutu ve miktarı, betonun elastisite modülü üzerinde belirleyici bir faktördür. Kırmataş gibi daha düzensiz şekle sahip agregalar kullanıldığında elastisite modülü genellikle düşük olabilir. Bunun sebebi, bu tür agregaların daha az bağlantı noktası sağlaması ve daha zayıf bir yapı oluşturmalarıdır. Öte yandan, yuvarlak çakıl gibi daha düzenli şekle sahip agregalar kullanıldığında elastisite modülü genellikle yüksek çıkar. Bu agregaların daha fazla bağlantı noktası sağlaması ve daha güçlü bir yapı oluşturmalarıyla açıklanabilir.

UKA numunelerinin 28 günlük durumu, 7 günlük duruma kıyasla daha rijit bir davranış sergilemektedir. Rijitlik, malzemenin elastik bölgedeki davranışını ifade eder, yani yük uygulandığında malzemenin şekil değiştirmeye karşı direncini belirtir. Uzun bir kür süresi, daha fazla hidrasyon ve kristal oluşumunu sağlayarak, malzemenin mukavemetini artırabilir ve daha rijit bir yapı elde edilebilir. Ancak malzeme bileşenlerinin (agregalar, çimento, su/çimento oranı vb.) ve kür süresinin kombinasyonu da harç karışımının mekanik özelliklerini belirlemek için dikkate alınmalıdır.

Uçucu kül agregası numunelerinde, elastisite modülü ile basınç dayanımı arasında benzerlikler bulunmaktadır. Bu bağlamda, uçucu küllü betonlarda elastisite modülü, başlangıçta kontrol numuneye göre daha düşükken, zamanla daha yüksek seviyelere ulaşır.



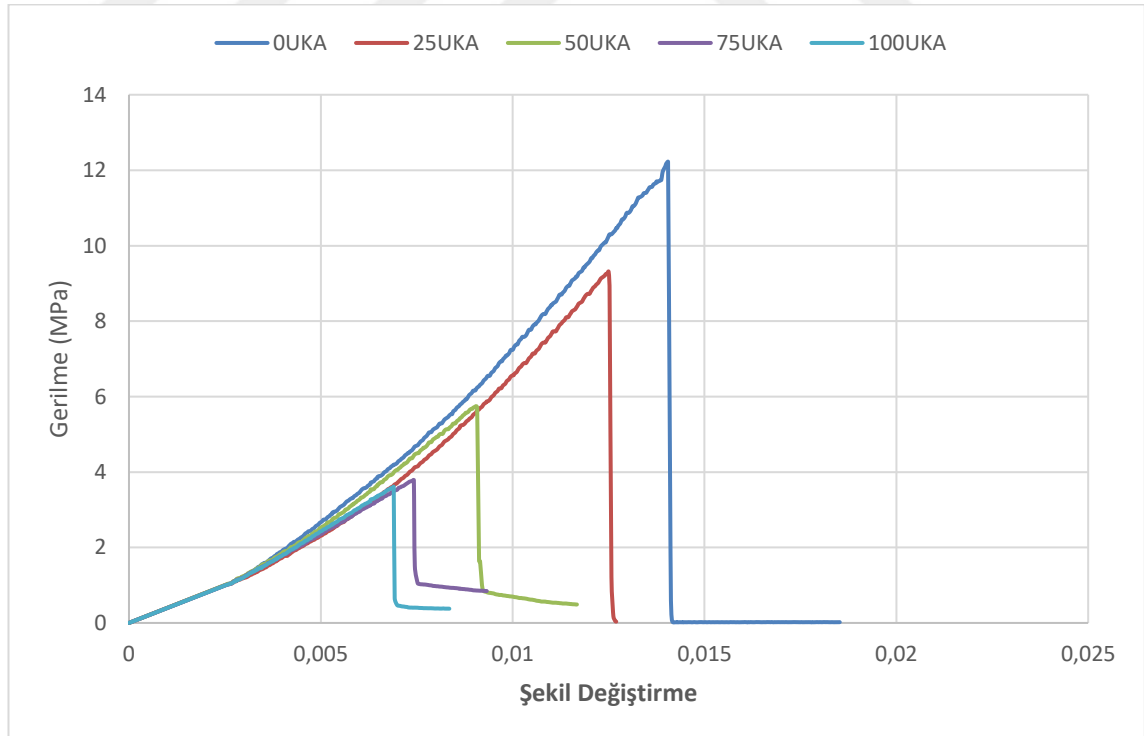
Şekil 4.10. Karışımların basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri



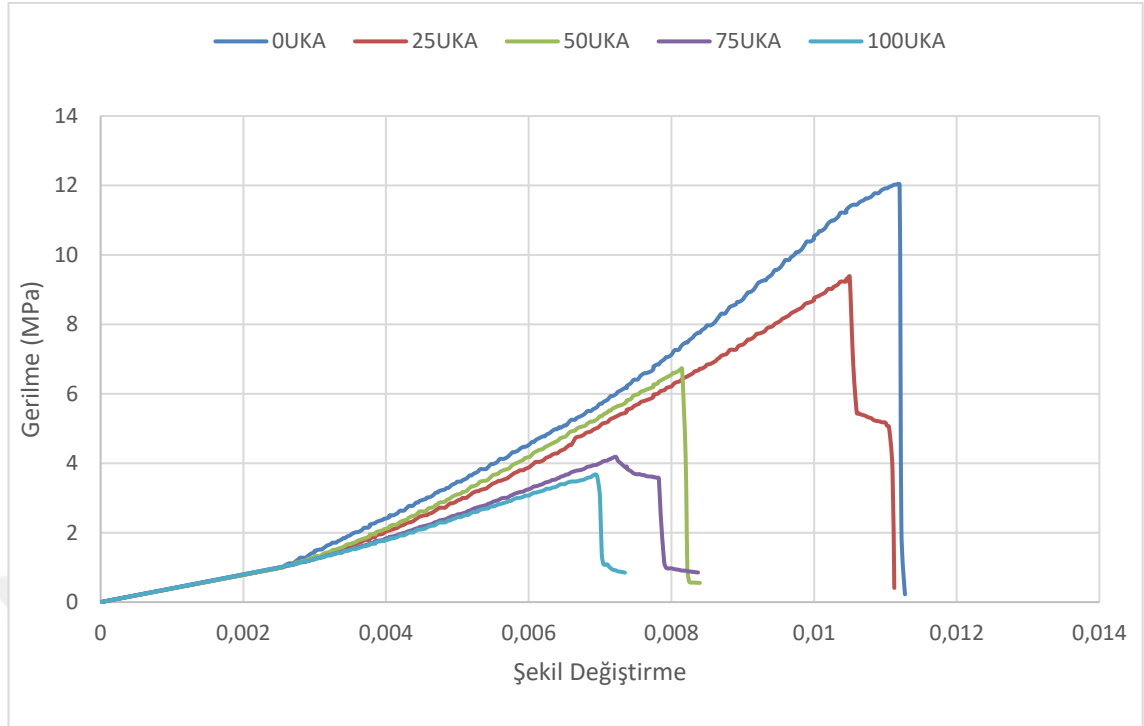
Şekil 4.11. Karışımların basınç yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Eğilme yükleri altındaki 7 ve 28 günlük dayanımlar arasındaki değerler birbirine çok yakındır. Kürlenme süresinin artması dayanım üzerinde yüksek oranda bir etki göstermese de şekil değiştirme davranışında numuneler daha fazla süneklik kazanmıştır. 7 ve 28 günlük dayanımlar (Şekil 4.12-13)'te görüleceği gibi eğilme yükleri altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, UKA0 karışımlarında maksimum dayanıma ulaşıldıktan sonra belirgin bir şekilde dayanımda düşüş yaşanırken, UKA içeriğinin artmasıyla bu düşüşün daha yumuşak olduğu ve maksimum dayanıma ulaşıldıktan sonra karışımların yük altında ezilmediği ve hala yük taşımaya devam ettiği görülmüştür. Özellikle %50, %75 ve %100 oranındaki karışımlar tepe dayanım değerine ulaştıktan sonra mukavemeti önemli ölçüde düşürmeden ilerleme yeteneğine sahip olmuştur.

Gomathi ve Sivakumar (2015) yaptıkları çalışmaya göre sinterlenmiş uçucu kül agregası içeren betonların eğilme gerilmesi kapasitesi, soğuk bağlı uçucu kül agregası içeren betona kıyasla maksimum %34,72'ye varan artış göstermiştir. Yük-deformasyon özelliklerinden elde edilen deneysel eğilimler, uçucu kül agregasındaki azalma ile artan bir eğilim göstermiştir. Bu, deformasyonda belirgin bir azalmaya neden olarak daha yüksek eğilme modülüne neden oldu. Pik yükün yaklaşık %92'sinde çatlamanın başladığı gözlemlenmiş ve agrega tanelerinin kırılması pik yükten sonra meydana gelmiştir. Farklı tipte uçucu kül agregası beton numunelerinin son uçtaki yük deformasyon özellikleri, agregaların daha yüksek fraksiyona kıyasla daha düşük hacim fraksiyonu durumunda maksimum bir zirve öncesi sertleşme göstermiştir.



Şekil 4.12. Karışımların eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri



Şekil 4.13. Karışımların eğilme yükleri altındaki 28 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri

4.6 Kimyasal analiz sonuçları

Karışımın içerisinde yer alan kil, su ve Seyitömer uçucu külünün XRF analiz sonuçları aşağıda belirtilmiştir.

Çizelge 4.14. Seyitömer uçucu külünün kimyasal bileşimi (XRF)

Oksit	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O
%	0,66	3,65	24,89	51,04	0,08	0,32	2,31
Oksit	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	NiO	Ba
%	3,12	0,90	0,10	0,12	11,79	0,23	0,11

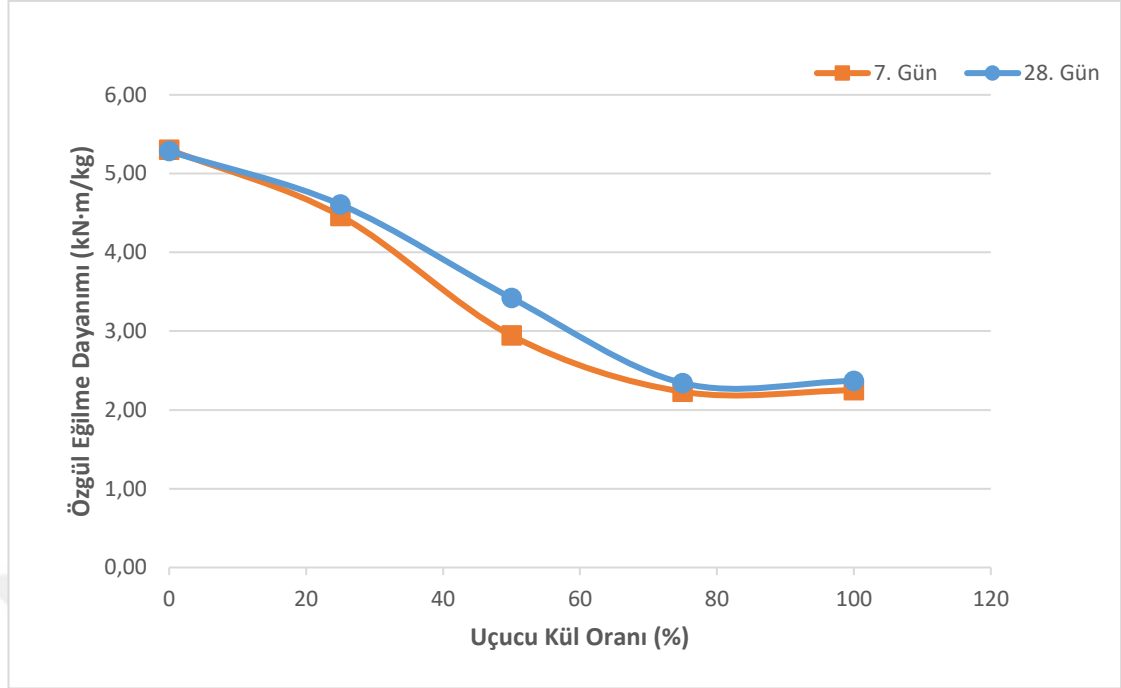
Soru: Seyitömer uçucu külü, ASTM C 618 Amerikan standardına göre F sınıfı uçucu kül sınıfına aittir. Bu sınıflandırma, uçucu külün bileşimine ve özelliklerine göre yapılır. ASTM C 618 standardına göre, F sınıfı uçucu külün CaO miktarı %10'dan az ve ve SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ yüzdesi %70'ten fazla olmalıdır. Seyitömer uçucu külünün bu kriterleri karşıladığı birçok çalışmada tespit edilmiştir, bu da onun F sınıfı uçucu kül sınıfına girdiğini gösterir (Çinçin 2015; Bentli vd. 2005; Demir 2005).

Seyitömer uçucu külünün XRF analiz sonuçlarına göre, Dağcı (2018)'nin çalışmasında Çizelge 4.14'te belirtilen değerler elde edilmiştir. Bu XRF analizi, Seyitömer uçucu külü, TS EN 197-1 Türk standardına göre V (silis) sınıfı uçucu kül sınıfına girmektedir. Bu sınıflandırma, uçucu külün mineralojik bileşimine ve aktivitesine dayanır. Ayrıca, Seyitömer uçucu külü, TS EN 197-1 Türk standardına göre "çok düşük aktiviteli küller" sınıfına da girmektedir. Bu sınıflandırma, uçucu külün kimyasal aktivitesini belirlemek için kullanılır. Dolayısıyla Seyitömer uçucu külünün standartlara uygun olduğunu göstermiştir.

Seyitömer uçucu külün XRD analizi de incelenmiştir. XRD analizi, kristal yapıya sahip maddelerin tanımlanması ve analiz edilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz sonucunda elde edilen veriler, uçucu külün mineralojik bileşimini belirlemeye yardımcı olur. Seyitömer uçucu külü XRD (X-ışını kırınımı) analizi incelendiğinde kuvars, magnetit ve anortit mineral fazlarının varlığı tespit edilmiştir.

4.7 Özgül Dayanım

Yaşın artması ve uçucu kül eklenmesiyle, uçucu külün puzolanik etkisinin neden olduğu sapma artar. Uçucu kül ile elde edilen hamur karışımında çimentonun mukavemeti iki kısımdan meydana gelebilir: Mukavemetin ilk kısmı klinkerin çimentoda hidratasyonu ile oluşan hidratlardan, ikinci kısmı ise klinkerin hidratasyonundan elde edilen serbest kalsiyum hidroksit ile silis ve alüminyum oksitler arasındaki ikincil reaksiyondan elde edilen ilave hidratlardır. İkinci kısma ise çimento için puzolanik etkinin mukavemeti denir. Uçucu kül agregası ile hazırlanan hamur karışımında çimento miktarının artırılması ile dayanımda artış meydana gelmiştir. Fakat uçucu küllü agregası ile hazırlanan harç karışımlarında özgül dayanım, agrega oranının artışıyla daha sonraki yaşlarda genel olarak düşüş göstermiştir. Uçucu küllü agrega miktarı arttıkça özgül eğilme dayanım eğrisi azalırken, özgül basınç dayanımı diyagramında yükselme görülmektedir. Uçucu küllü agregası dozajı artmasıyla özgül dayanımının önemli ölçüde yüksek olmasını sağlayan faktör, dayanımın sadece bu yönüdür. Bu fark, puzolanik etkinin özgül dayanımı olarak adlandırılabilir ve uçucu kül agregasının belirli koşullarda basınç altında deformasyona karşı daha iyi direnç gösterir. Fakat yaşlanma süresinin dayanım üzerindeki etkisi daha sınırlıdır. Şekil 4.14-15, 7 ve 28 günlük uçucu kül agregası katkılı harç karışımlarının özgül basınç dayanımı ve özgül eğilme dayanımı diyagramlarını göstermektedir. Şekil 4.14-15'ten görüldüğü gibi, dozaj arttıkça, puzolanik etkinin basınç dayanımına katkı oranları artmaktadır. Sonuç olarak, puzolanik etkinin önemli olduğu söylenebilir.



Şekil 4.14. Karışımların özgül eğilme dayanımı



Şekil 4.15. Karışımların özgül basınç dayanımı

5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Seyitömer uçucu külün çevreye verdiği zararın önlenmesine katkı sağlamak amacıyla, harç karışımlarında agreganın kısmen yerini alabilecek çevre dostu malzemelerin oluşturulma ihtiyacı büyük ilgi görmüştür. Uçucu kül agregasının harç karışımları üzerindeki etkilerini değerlendirmek için çizelgeler, tablolar ve şekiller aktif olarak kullanılmıştır. Bu araçlar, uçucu kül agregası ile kırma kum agregasının yer değiştirmesiyle hazırlanan harç karışımlarının fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini açıkça göstermiştir.

Yapılan deney çalışmalarına göre atık olarak çevreye bırakılan uçucu küllerden soğuk bağlama yöntemiyle agrega üretimi ve bu uçucu kül agregaların hafif harç üretiminde kullanılması ile olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, uçucu kül agregalarının hafif harç üretiminde uygun olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlara dayanarak, aşağıdaki sonuçların altı çizilebilir:

F sınıfı uçucu külün soğuk bağlı hafif agrega üretiminde yeterli dayanıma sahip olmadığı öne sürülmüştür. Bağlayıcı olarak uçucu kül ile az miktarda kullanılan Portland çimentosu, üretilen agregaların dayanımında yetersiz kalmıştır. Ancak, bağlayıcı olarak kullanılan Portland çimentosu oranının artırılmasıyla dayanımda belirgin bir artış gözlemlenmiştir.

Uçucu kül agregası miktarının artmasıyla basınç dayanımında azalma gözlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan Seyitömer uçucu külü, içeriğinde bulunan CaO ve diğer oksit miktarlarına bağlı olarak F tipi olarak sınıflandırılmıştır. Dolayısıyla, Seyitömer uçucu külünün harç dayanımına etkisinin normal düzeyde olduğu söylenebilir.

SDKY ve kuru yığın yoğunluk değerleri uçucu kül agregası oranı ile ters orantılı olarak izlenim göstermiştir. En düşük yoğunluk değerleri en yüksek uçucu kül agregası içeren harç karışımlarında gözlemlenmiştir. Uçucu kül agregaları kullanılarak 1600 kg/m³ SDKY yoğunluğa sahip harç elde edilebilirken, normal harç karışımının SDKY yoğunluğu 2270 kg/m³'e kadar çıkmaktadır.

Uçucu kül agregasının özgül ağırlığının kırma kum agregasına göre düşük olması uçucu kül agregasının hafif bir agrega malzemesi olduğunu göstermiştir. Fakat agrega ikame malzemesi olarak kullanıldığında harç karışımında boşluklu bir yapı oluşturduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla bu durum da gözenekliliği artırmıştır.

Uçucu kül agregası miktarı arttıkça su emme oranında da artış görülmüştür. Bu artış harç karışımlarının görünür boşluk oranına da etki etmiştir.

Harç karışım numunelerin genel olarak kılcal su emme katsayısı sonuçları, uçucu kül agregası miktarı arttıkça artış göstermiştir. Bu durum Seyitömer uçucu külün daha yüksek gözenekli yapıya sahip olması ve boşluk oranının fazla olmasına bağlanabilir.

Hafif agregaların özellikle karışıma girmeden önce suya doyurulması, işlenebilirlik üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Agregaların ön su emdirme işlemine tabi tutularak 24 saat SDKY hali alması için bekletildikten sonra harç karışımına eklenmesi

harcın daha iyi işlenebilmesinin yanında basınç dayanımını arttırdığı ve üretim süresini azalttığı tespit edilmiştir.

Agregaların üretim yöntemi, sinterleme süresi veya sıcaklık gibi parametreler de dayanım üzerinde etkili olabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmadaki agregalar soğuk bağlama yöntemi uygulanarak üretildiği için literatür çalışmalarının da belirttiği üzere uçucu kül agregası miktarı arttıkça dayanımlarda daha düşük sonuçlar elde edilmiştir.

Seyitömer uçucu küllü numuneler soğuk bağlama yöntemiyle harç yapımında kullanıldığında, normal agregalara kıyasla daha düşük dayanım gösterdiği belirtilmiştir. Bu nedenle, fazla basınç dayanımı elde etmek için uçucu kül agregasının az miktarlarda kullanılması önerilmektedir. Buradaki temel amaç, hafif yapıya sahip olan uçucu kül agregasının dayanıklılığa etkisini değerlendirmenin yanında, yükün önemsiz olduğu veya taşıma kapasitesi dahilinde olduğu alanlarda da kullanılabilirliğini incelemek büyük bir önem taşımaktadır.

Uçucu kül agregaları, kırma kum agregası ile karşılaştırılabilir sonuçlar verdiğinden ve doğal kaynaklarımız tükenmek üzere olduğundan, uçucu kül agregaları kırma kum agregası ikame malzemesi olarak düşünülebilir. Ayrıca uçucu kül puzolanik bir malzeme olduğu için betonun özelliğini geliştirir. Elde edilen agregalar, duvar panelleri, duvar blokları, çatı yalıtım malzemeleri, yapısal taşıyıcı elemanlar vb. gibi çeşitli uygulamalar için değerlendirilebilir.

Bu çalışma, soğuk bağlı uçucu kül agregasıyla hazırlanan harçların karışım oranları ve bileşenleri üzerindeki etkileri anlamak ve harçların mekanik özelliklerini iyileştirmek için bir referans sağlamaktadır.

Bu araştırmanın devamında yapılan uçucu kül agregasının mineralojik özelliklerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesi oldukça önemlidir. Bu inceleme, agreganın mineral bileşiminin, kristal yapısının ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kolaylık sağlayacaktır. Ayrıca, örnek sayısının artırılmasıyla birlikte uçucu kül agregasının performansı daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilir.

Gelecekteki bir çalışma olarak, hafif yapay uçucu kül agregası ile doğal agreganın maliyet analizinin ayrıntılı bir karşılaştırmasına ihtiyaç vardır. Maliyet analizi sonuçları çevre dostu yapay agrega üretimi için çok faydalı bilgiler verebilir.

Son olarak, geleneksel betona alternatif olarak daha sürdürülebilir ve çevre dostu betonlar üretmek için uçucu kül, uçucu kül tozu veya uçucu kül agregası gibi hafif agregaların kullanılabileceği öngörülmektedir. Bu tür agregaların hafif agrega betonunda kullanılması, termik santrallerin çevresel zararlarını ve doğal kaynakların tüketimini azaltabilir. Uçucu kül agregası diğer agrega türlerinin yerine kullanılarak doğal agrega kaynaklarının korunmasına katkıda bulunabilir. Ayrıca, uçucu kül agregası üretimi için geliştirilen daha verimli ve ekonomik yöntemlerle birlikte, uçucu külün birçok altyapı projesinde mükemmel bir alternatif olarak kullanılması ve doğal agrega kaynaklarındaki azalmayı dengelemesi mümkün olabilir.

Çalışmanın özgün katkısı, üretilen malzemelerin hem pratik hem de deneysel açıdan farklı inşaat mühendisliği uygulamalarına kazandırılmasıdır. Bu çalışma, Türkiye'deki uçucu kül kullanım alanlarının genişletilmesine katkıda bulunmanın yanı sıra, malzeme

ve enerji üretiminde ekonomi sağlayarak çevre kirliliğini önleme ve ekolojik dengeyi koruma açısından ideal bir çözüm olduğunu göstermektedir. Uçucu külün atık olarak bırakılması yerine değerlendirilmesi, kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamakta ve çevresel etkileri azaltmaktadır. Bu nedenle, uçucu kül kullanımının yaygınlaştırılması, sürdürülebilir inşaat ve çevre koruma açısından önemli bir adımdır.



6 KAYNAKLAR

- Akgül, Ç., & Yoncacı, S. 2021. Türkiye Kömür Yakıtlı Termik Santral Uçucu Külleri.
- American Concrete Institute (ACI). 1998. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete, ACI 211.2-98. USA: American Concrete Institute.
- Aruntaş, H.Y. 2006. Uçuküllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(1): 193-203.
- ASTM C 136 2104 Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM Standards, United States.
- Attarde, S., Marathe, S., & Sil, A. 2014. Utilization of fly ash in construction industries for environment management. *International Journal of Environmental*, 3(2), 117-121.
- Ayub, Tehmina, Sadaqat Ullah Khan, and Fareed Ahmed Memon. 2014. “Mechanical Characteristics of Hardened Concrete with Different Mineral Admixtures: A Review.” *The Scientific World Journal*, 1–15. doi:10.1155/2014/875082.
- Baradan, B. 1996. Yapı Malzemesi II. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fak. Yayınları, No:207. 4. Baskı, s.42-195, İzmir.
- Bentli, İ., Uyanık, A.O., Demir, U., Şahbaz, O. 2005. Seyitömer Termik Santrali Uçucu Küllerinin Tuğla Katkı Hammaddesi Olarak Kullanımı. Türkiye 19. Ulusal Madencilik Kongresi ve Fuarı, 09-12 Haziran, İzmir.
- Bijen, J. M. J. M. 1986. Manufacturing processes of artificial lightweight aggregates from fly ash. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 8(3), 191-199.
- Binal, A. 2016. The Effects of High Alkaline Fly Ash on Strength Behaviour of a Cohesive Soil, *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-11.
- Bloem, D.L., Gaynor, R.D. 1963. Effects of Aggregate Properties on Strength of Concrete, *Journal of American Concrete Inst.*, Volume:60, pp.1429–1456, October.
- Chang, T.P. ve Shieh, M.M. 1996. “Fracture Properties of Lightweight Concrete” , *Cement and Concrete Research*, Cilt 26, No 2, 181-188.
- Clarke, J., L. 1993. *Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Chapman&Hall, Great Britain.
- Collivignarelli, C., Sorlini, S. 2001. “Optimisation of Industrial Wastes Reuse as Construction Materials”, *Waste Management & Research*, Cilt 19, No 6, 539-544.
- Çelik, Ö., 2004 “Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Değerlendirilmesi”, Doktora Tezi, Yıldık Teknik Üniversitesi, FBE Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Çinçin, Y. 2015. Linyit yakan termik santral uçucu küllerinden kireç katkısı ile hafif tuğla üretiminin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 88 s.

- Dağcı, F. 2018. Farklı bileşen oranlarının ve üretim sıcaklıklarının üretilen tuğla özelliklerine etkileri.
- Davies, D.R., Kitchener, J.N. 1996. “Massive Use of Pulverised Fuel Ash in Concrete for the Construction of a UK Power Station”, Waste Management, Cilt 16, No 1-3, 169-180.
- Davraz, M., & Başpınar, E. 2011. Agrega Porozitesinin Hafif Betonların Fiziko-Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 3(3), 35-51.
- Demir İ., Başpınar M.S., Orhan M. 2005. Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production. *Building and Environment*, 40(1): 1533–1537.
- Ekmekyapar, T. ve Örüng, İ. 1997. İnşaat Malzeme Bilgisi (3. Baskı). Atatürk Üniversitesi Yayınları, No:145, 278s, Erzurum.
- Elsharief, A., Cohen, M., D. ve Olek, J. 2005. Influence of Lightweight Aggregate on the Microstructure and Durability of Mortar. *Cement and Concrete Research*, 35:1368-1376.
- Ersoy, U. 1985. “Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı” , Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Profesörlerinden, Cilt 1, İstanbul.
- Garg, S. K., Khalid, M., Verma, C. L. 1995. Production of sintered fly ash lightweight aggregates for concrete building blocks and RCC roofs, *Proceedings of the Eleventh National Convention of Chemical Engineers, Departments of Chemical Engineering, University of Roorkee, IV*, pp 40-44.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Öz, H.Ö. 2012. Properties of lightweight aggregates produced with cold-bonding pelletization of fly ash and ground granulated blast furnace slag, *Materials and Structures*, 45, 1535-1546.
- Gesoğlu, M., Özturan, T. ve Güneyisi, E. 2004. “Shrinkage Cracking of Lightweight Concrete Made with Cold-Bonded Fly Ash Aggregates” , *Cement and Concrete Research*, Cilt 34, No 7, 1121-1130.
- Ghazali, Md., Kaushal, O.P. 2015. Characteristics of Fly Ash from Thermal Power Plants and its Management along with Settling Pond Design, *International Journal of Engineering Research & Science (IJOER)*, 1, 24-32.
- Gomathi, P., & Sivakumar, A. (2015). Accelerated curing effects on the mechanical performance of cold bonded and sintered fly ash aggregate concrete. *Construction and building Materials*, 77, 276-287.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S., & Demir, İ. 2009. Uçucu Kül bölüm II: Kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikler. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(2), 33-42.
- Green, S. M., Brooke, N. J., McSaveney, L. G., & Ingham, J. M. 2011. Mixture design development and performance verification of structural lightweight pumice aggregate concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(8), 1211-1219.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., & Mordoğan, H. 2005. Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları. *Türkiye*, 19, 419-423.

- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Pürsünlü, Ö., Mermerdaş, K. 2013. Durability aspect of concretes composed of cold bonded and sintered fly ash lightweight aggregates, *Composites Part B Engineering*, 53, 258-266.
- Gürbüz, E. 2009. C tipi uçucu küllerin etkinliği. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 117 s
- Hansen, W.C. 1967. Basic Chemistry of Reactions of Aggregates in Portland Cement Concrete, *J. of Materials*, Vol. 2, No. 2, June.
- Hossain, K. M. A. 2004. "Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweight Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 283–291.
- Jo, B. W., Park, S. K., & Park, J. B. 2007. Properties of concrete made with alkali-activated fly ash lightweight aggregate (AFLA). *Cement and Concrete composites*, 29(2), 128-135.
- Joel, S. 2020. Compressive strength of concrete using fly ash and rice husk ash: A review. *Civ Eng J*, 6(7), 1400-10.
- Joseph, G., Ramamurthy, K. (2009). Workability and strength behaviour of concrete with cold-bonded fly ash aggregate, *Materials and Structures*, 42, 151-160.
- Juan Rodríguez. 2019. "Uses, Benefits and Drawbacks of Fly Ash in Construction". Available online: <https://www.thebalancesmb.com/fly-ash-applications-844761>
- Kaplan, G., & Gültekin, A. B. 2010. Yapı Sektöründe Uçucu Kül Kullanımının Çevresel ve Toplumsal Etkiler Açısından İncelenmesi The Investigation of Fly Ash Usage in Terms of Environmental and Social Effects in Construction Sector.
- Katrancı, A. 1999. Şanlıurfa Yöresindeki Beton Agregası Kaynaklarının İncelenmesi ve Beton Beton Yapımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi ABD, 60 s.
- Kayall, O., Haque, M.N. 1999. Zhu, B., "Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash", *Cement and Concrete Research*, Cilt 29, No 11, 1835-1840.
- Kayall, O., Haque, M.N. 2003. Zhu, B., "Some Characteristics of High Strength Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete", *Cement&Concrete Composites*, Cilt 25, No 2, 207-213.
- Kevin Copeland. 2011. "Fly Ash Properties and Uses." Blogs: Construction. Available online: <https://www.monolithic.org/blogs/construction/fly-ash-properties-and-uses>.
- Kockal, N. U., & Ozturan, T. 2010. Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes. *Journal of hazardous materials*, 179(1-3), 954-965.
- Kockal, N. U., & Ozturan, T. 2011. Optimization of properties of fly ash aggregates for high-strength lightweight concrete production. *Materials & Design*, 32(6), 3586-3593.
- Kockal, N.U. ve Ozturan, T. b: 2011. Characteristics of lightweight fly ash aggregates produced with different binders and heat treatments. *Cement and Concrete Composites*, 33: 61-67.

- Koçkal, N. U., & Özturan, T. 2007. Farklı Hafif Uçucu Kül Agregaları ile Üretilen Taşıyıcı Hafif Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.
- Köker, T. Ş. 2019. Hafif agregata katkı geopolimer harçların mekanik ve durabilite özellikler (Master's thesis, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Lkhagva, T. 2006. Uçucu küllerin agregata olarak beton üretiminde kullanılması.
- Manikandan, R., & Ramamurthy, K. 2007. Influence of fineness of fly ash on the aggregate pelletization process. *Cement and concrete composites*, 29(6), 456-464.
- Mardani, A., & Ramyar, K. 2011. Uçucu Külün Silindir ile Sıkıştırılmış Betonun Basınç Dayanımına Etkisi.
- Mindness, S. ve VeYoun, J.F. 1981. *Concrete*, Prentice-Hall, Inc, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Neville AM, Brooks JJ. 1987. *Concrete Technology*. Longman Scientific and Technical, p.285.
- Neville, A.M. 1981. *Properties Of Concrete*, Third Edition, Longman Scientific and Technical.
- Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M., Uyan, M. 1999. Meslek Liseleri için Her Yönüyle Beton, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını, İstanbul.
- Papadakis, V.G. 2000. "Effect of Fly Ash on Portland Cement Systems Part II. High-Calcium Fly Ash", *Cement and Concrete Research*, Cilt 30, No 10, 1647-1654.
- Postacıoğlu, B. 1975. Yapı Malzemesi Dersleri (bağlayıcı maddeler, agregalar, beton). İTÜ. Kütüphanesi, 1011, s., 36-37. İstanbul.
- Postacıoğlu, B. 1987. Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton, Cilt 2, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- Ramamurthy, K., & Harikrishnan, K. I. 2006. Influence of binders on properties of sintered fly ash aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 28(1), 33-38.
- Ravina, D. 1997. "Properties of Fresh Concrete Incorporating a High Volume of Fly Ash as Partial Fine Sand Replacement", *Materials and Structures*, Cilt 30, No 202, 473-479.
- Rosenberg, Arnie. 2010. "What to Look for When Using Fly Ash in Precast Products." *Using Fly Ash in Concrete*.
- Rossow, M. 2003. Fly ash facts for highway engineers. New York NY Continuing Education and Development.
- Selçuk, U. 2012. Agregata granülometrisinin beton bileşimindeki teorik malzeme miktarları ile betonun kompozite ve porozite değerleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1), 1-15.
- Shanmugasundaram, S., Jayanthi, S., Sundararajan, R., Umarani, C., & Jagadeesan, K. 2010. Study on utilization of fly ash aggregates in concrete. *Modern Applied Science*, 4(5), 44.

- Shannag, M. J. 2011. Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 25(2), 658-662.
- Shondeep, L. 1992. Sarkart and others. Interdependence of microstructure and strength of structural lightweight aggregate concrete. *Cement & Concrete Composites*, 14, 239-248.
- Şengül, Ö. 2000. Agregat Türünün Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 97 s., İstanbul
- Şimşek, O. 2003. Yapı Malzemesi II, Beta Basım A.Ş., İstanbul.
- Şimşek, O. 2016. Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık A.Ş., Ankara.
- T.S.E. 2009. Beton Agregaları, TS 706 EN 12620+A1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tokay, M. 1993. "Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi)", End. Atıkların İnşaat Sektöründe Kul. Semp., Ankara, 29-36, 18-19.
- TS 1114 1986. "Hafif Agregalar-Beton İçin"
- TS EN 1097-3 1999. "Agregaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri için Deneyler Bölüm 3- Gevşek Yığın Yoğunluğunun ve Boşluk Hacminin Tayini", T.S.E., Nisan 1999, Ankara.
- TS EN 933-1 2012 "Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- Eleme metodu", TSE Yayını, Ankara.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğinobalı, A. 2009. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. Ankara, TÇMB.
- Usanova, K., & Barabanshchikov, Y. 2020. Cold-bonded fly ash aggregate concrete. *Magazine of Civil Engineering*, (3 (95)), 104-118.
- Uygunoğlu, T. 2008. Hafif agregalı kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Ünal, O., & Uygunoğlu, T. 2004. Soma Termik Santral Atığı Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Değerlendirilmesi. *Türkiye*, 14, 02-04.
- Verma C. L., Handa, S. K., Jain S. K., Yadav R. K. 1998. Techno-commercial perspective study for sintered fly ash light-weight aggregates in India, *Construction and Building Materials*, 12(6-7), pp 341-346.
- Wasserman, R., Bentur, A. 1997. "Effect of Lightweight Fly Ash Aggregate Microstructure on the strength of Concretes", *Cement and Concrete Research*, Cilt 27, No 4, 525-537.
- Yalçın, H., Gürü, M. 2006. Çimento ve Beton, Palme Yayıncılık A.Ş., Ankara.
- Yamashita, T., et al. 1992. "Fly Ash Lightweight Aggregate Sintered in a Circular Grate Kiln", *Proc. of 4th Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, İstanbul, SP, 895-915.
- Yılmaz Y (2013). Beton Endüstrisinde Sürdürülebilir Üretim. Beton 2013 Kongresi Bildirileri, Cilt 1: 145-155, İstanbul.

Zakaria, M., Cabrera, J.G. 1996. "Performance and Durability of Concrete Made with Demolition Waste and Artificial Fly Ash-Clay Aggregates", Waste Management, Cilt 16, No 1-3, 151-158.



ÖZGEÇMİŞ

NAZMİYE KELEŞ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2020-2023	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Antalya Bilim Üniversitesi
2014-2019	Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Kalite Mühendisi	IMECAR Elektronik San.ve Tic. Ltd. Şti.
2021-Devam Ediyor	
Kalite Kontrol Mühendisi	Çetin Madencilik San. ve Tic. Ltd. Sti.
2020-2021	

ESERLER

Projeler

Antalya Bilim Üniversitesi 2209/A Tübitak Projesi “Antalya Lara Atık Su Arıtma Tesisinden Elde Edilen Su ile Beton Yapılması”