

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

UÇUCU KÜLLERDE İNCELİĞİN PUZOLANİK AKTİVİTEYE ETKİSİ

DOKTORA TEZİ

Jeoloji Yük. Müh. Demet DEMİR ŞAHİN

**MAYIS 2019
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

UÇUCU KÜLLERDE İNCELİĞİN PUZOLANİK AKTİVİTEYE ETKİSİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (MADEN MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 / 04 / 2019

Tezin Savunma Tarihi : 02 / 05 / 2019

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi İbrahim ÇAVUŞOĞLU

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalında

Demet DEMİR ŞAHİN Tarafından Hazırlanan

UÇUCU KÜLLERDE İNCELİĞİN PUZOLANİK AKTİVİTEYE ETKİSİ

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 09 /04 /2019 gün ve 1799 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

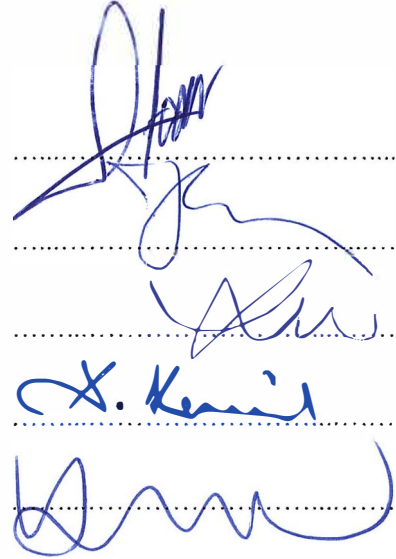
Başkan : Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN

Üye : Doç. Dr. Hakan CEYLAN

Üye : Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ

Üye : Prof. Dr. Ayhan KESİMAL

Üye : Doç. Dr. Hakan ERSOY



Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

'Uçucu Küllerde İnceliğin Puzolanik Aktiviteye Etkisi' başlıklı çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır. Bu tez içerisinde sunulan deneysel çalışmalar, KTÜ Maden Mühendisliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümlerinde, Söğütseren Seramik fabrikası ve Türkiye Hazır Beton Birliği Yapı Malzemeleri Ar-Ge Laboratuvarlarında, Trabzon ve Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası Laboratuvarlarında, Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın her aşamasında bilgilerini ve zamanını benden esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Ali Osman Yılmaz'a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim. Tez çalışmamın yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen ikinci danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi İbrahim ÇAVUŞOĞLU'na şükranlarımı sunarım. Tez çalışmam sırasında yol gösterici eleştirilerinden ötürü tez izleme komitesi üyelerinden Prof. Dr. Ayhan KESİMAL ve Doç. Dr. Hakan ERSOY hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Yine çalışmam boyunca öneri ve desteklerinden faydalandığımız tez jürü üyeleri Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN ve Doç. Dr. Hakan CEYLAN hocalarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim. Tez çalışmamın bir kısmını kapsayan deneylerin oluşturulması aşamasında laboratuvar imkânlarından ve tecrübelerinden yararlandığım Doç. Dr. Mustafa ÇULLU hocama şükranlarımı sunarım. Deneylerin yapım aşamasında emeği geçen lisans öğrencileri Mehmet İŞÇAN, Mustafa Caner ÇAVDAR, Ümit KOÇYİĞİT, Aynur ALPTEKİN ve Özgür Doğuş YİĞİTLİ'ye teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu çalışma, 11320 No'lu KTÜ BAP'01 Bilimsel araştırma projesi ve 13.F5118.02.1 No'lu GÜ BAP'02 Bilimsel Araştırma Projesince desteklenmiştir. Bilimsel Araştırma Projesi çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam boyunca tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve desteklerini esirgemeyen değerli eşim Hakan ŞAHİN ve oğluma, anneme, babama ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Demet DEMİR ŞAHİN

Trabzon, 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘Uçucu Küllerde İnceliğin Puzolanik Aktiviteye Etkisi’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.
02/05/ 2019.



Demet DEMİR ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	X
TABLolar LİSTESİ	XVI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Tezin Gerekçesi ve Amacı.....	2
1.3. Santral Atığı Uçucu Küller	3
1.3.1. Dünya’da ve Türkiye’de Uçucu Küller	6
1.3.1.1. Uçucu Küllerin Çimento Üretiminde Kullanımı	11
1.3.1.2. Uçucu Küllerin Beton Üretiminde Kullanımı.....	12
1.3.2. Uçucu Küllerin Çevresel Etkileri.....	14
1.3.2.1. Uçucu Küllerin Hava Kirliliği Üzerine Etkisi	16
1.3.2.2. Uçucu Küllerin Toprak Kirliliği Üzerine Etkisi	17
1.3.2.3. Uçucu Küllerin Su Kirliliği Üzerine Etkisi.....	17
1.3.3. Uçucu Küllerin Elde Edilişi	17
1.3.4. Uçucu Küllerin Özellikleri.....	19
1.3.4.1. Fiziksel Özellikleri.....	19
1.3.4.2. Kimyasal Özellikleri.....	23
1.3.4.3. Mineralojik Özellikleri	24
1.3.4.4. Morfolojik Özellikleri.....	26
1.3.4.5. Mekanik ve Puzolanik Özellikleri	29
1.4. Bir Puzolan Olarak Uçucu Kül	30
1.4.1. Puzolan Çeşitleri.....	31
1.4.1.1. Yapay Puzolanlar.....	33
1.4.2. Puzolanların Reaktivite Derecesi.....	34
1.4.3. Çimentoda Mineral Katkı Olarak Kullanılan Puzolanların Fiziksel ve Kimyasal Yapısı.....	34

1.4.4.	Puzolanların Farklı Özelliklerini ASTM C 618'e Göre Değerlendirme.....	35
1.4.5.	Puzolanların Çimento ve Beton İçerisinde Kullanımının Avantajları	36
1.4.6.	Uçucu Küllerin Puzolanik Aktivitesi.....	39
1.4.6.1.	Uçucu Küllerde Aktivite İndeksini Belirleme Metotları	41
1.4.6.2.	Puzolanik Aktiviteye Etki Eden Faktörler	43
1.5.	Çimento.....	47
1.6.	Uçucu Kül-Çimento Karışımları.....	48
1.6.1.	Uçucu Küllerin Çimento Pastası Özelliklerine Etkisi.....	48
1.6.1.1.	Öğütmenin Fiziksel Özellikler Üzerine Etkisi	50
1.6.1.2.	Özgül Yüzey Alan (Blain) Üzerinde Etkisi	54
1.6.1.3.	Öğütmenin Kimyasal ve Mineralojik Özellikler Üzerine Etkisi.....	55
1.6.1.4.	Öğütmenin Morfolojik Özellikler Üzerine Etkisi	56
1.6.1.5.	Öğütmenin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi	58
1.6.1.6.	Priz Süresi Üzerine Etkisi	64
1.6.1.7.	Kıvam Üzerine Etkisi.....	67
1.6.1.8.	Genleşme Miktarı Üzerine Etkisi	69
1.6.1.9.	Öğütmenin Mikro Yapı Üzerine Etkisi.....	71
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	90
2.1.	Giriş	90
2.2.	Kullanılan Malzemeler	92
2.2.1.	Uçucu Küller.....	92
2.2.2.	Çimento.....	92
2.2.3.	Su	93
2.3.	Malzeme Karakterizasyonu	93
2.3.1.	Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri.....	95
2.3.1.1.	Uçucu Küllerin Tane Boyutu Analizi	95
2.3.1.2.	Uçucu Küllerin Yoğunluk Analizi.....	95
2.3.1.3.	Uçucu Küllerin Özgül Yüzey Alan (Blaine) Deneyi	97
2.3.1.4.	Uçucu Küllerin Rutubet (Nem) Analizi.....	98
2.3.2.	Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri	99
2.3.2.1.	XRF (X-Işını Floresans Spektrometresi)	99
2.3.2.2.	Kızdırma Kaybı (Loss On Ignition-LOI) Tayini	101
2.3.2.3.	Serbest Kalsiyum Oksit (Serbest Kireç-SCaO) Tayini.....	101
2.3.3.	Uçucu Küllerin Mineralojik Özellikleri.....	103
2.3.3.1.	XRD (X-Işını Difraktometresi) Analizi.....	103

2.3.4.	Uçucu Küllerin Morfolojik Özellikleri	103
2.3.4.1.	SEM (Taramalı Elektron Mikroskop) Analizi	103
2.4.	Karışım Oranları	104
2.4.1.	Karışım İçin Malzeme Miktarı Hesabı	108
2.4.2.	Karışım Numunelerinin Hazırlanması	111
2.4.3.	Karışım Numunelerine Yapılan Deneyler	114
2.4.3.1.	Taze Haldeki Numuneler Üzerine Yapılan Deneyler	114
2.4.3.2.	Sertleşmiş Numuneler Üzerine Yapılan Deneyler	120
2.4.3.3.	Mikro Yapı.....	122
3.	BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	126
3.1.	Malzeme Karakterizasyonu	126
3.1.1.	Fiziksel Özellikler.....	126
3.1.1.1.	Uçucu Küllerin Tane Boyutu	126
3.1.1.2.	Uçucu Küllerin Yoğunluğu.....	128
3.1.1.3.	Uçucu Küllerin Özgül Yüzey Alanı (Blaine)	130
3.1.1.4.	Uçucu Küllerin Rutubet (Nem) Durumu	131
3.1.2.	Kimyasal Özellikler	132
3.1.2.1.	XRF (X-Işını Floresans Spektrometresi), Serbest Kireç ve Kızdırma Kaybı Analizleri.....	132
3.1.3.	Mineralojik Özellikler.....	137
3.1.4.	Morfolojik Özellikler.....	139
3.1.5.	Çimentonun Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri.....	145
3.2.	Karışım Numuneleri	147
3.2.1.	Taze Haldeki Karışım Numuneleri	147
3.2.1.1.	Kıvam Tayini	147
3.2.1.2.	Priz Süresi	154
3.2.1.3.	Hacim Genleşmesi	163
3.2.1.4.	Uçucu Kül İnceliğinin Basınç Dayanım Değeri Üzerine Etkisi	165
3.2.1.5.	Uçucu Kül İnceliğinin Puzolanik Aktivite İndeksi Üzerine Etkisi	184
3.2.1.6.	Karışım Numunelerinin Mikro Yapısı	187
4.	SONUÇLAR.....	208
5.	KAYNAKLAR	213
6.	EKLER	229
ÖZGEÇMİŞ.....		238

Doktora Tezi

ÖZET

UÇUCU KÜLLERDE İNCELİĞİN PUZOLANİK AKTİVİTEYE ETKİSİ

Demet DEMİR ŞAHİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ
2019, 228 sayfa, 9 sayfa Ek

Bu tez çalışmasında 2 farklı termik santralden (Afşin Elbistan (AE) ve Çayırhan (ÇYH)) elde edilen uçucu külleri (UK) öğütmeye bağlı olarak çimento bileşiminde mineral katkı olarak kullanımı amaçlanmıştır. Bu amaçla, uçucu külleri 5 farklı öğütme süresine (10, 20, 30, 45 ve 60 dk) tabi tutulmuştur. Orijinal ve öğütülmüş küller çimento yerine % 10, % 30 ve % 50 ikame oranlarında kullanılarak karışım numuneleri oluşturulmuştur. Ayrıca tamamen % 100 çimento bileşimli referans numunesi üretilmiştir. Farklı öğütme süresi ve ikame oranları ile hazırlanan karışımların taze ve sertleşmiş durumda priz süresi, mekanik özellikler, mikro yapıları ve termal özellikleri incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre uçucu küllerin öğütmeye bağlı olarak özgül yüzey alan (Blaine) değerleri artmıştır. Her iki uçucu kül ikamesinin karışımların priz süresini uzattığı belirlenmiştir. Her iki uçucu kül ile oluşturulan numunelerin tüm öğütme süresi ve ikame oranlarının artışına bağlı olarak basınç dayanım değerleri referans numunesine göre kısa dönemli kür süresine göre düşük, uzun dönemli kür süresine göre yüksek çıkmıştır. Kür ve öğütme sürelerinin artmasına bağlı olarak uçucu küllerin ikamesi numunelerin geçirimsizliğini ve porozitesini azaltmıştır. Ayrıca kül ikameli numunelerin inceliğine bağlı olarak termal analiz sonucunda kütle kaybı miktarlarını azaltarak hidrasyona katkı sağlamıştır. Sonuç olarak uçucu kül inceliğinin artması, puzolanik aktiviteyi arttırması ve çimentoda da mineral katkı olarak kullanılabilirliğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, incelik, atık malzeme, çimento, puzolan

PhD. Thesis

SUMMARY

EFFECTS OF FINENESS IN FLY ASHES ON POZZOLANIC ACTIVITY

Demet DEMİR ŞAHİN

Karadeniz Technical University
Institute of Science and Technology
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ
2019, 228 Pages, 9 Pages Appendix

In this thesis study, it was aimed to use fly ash from 2 different thermal power plants (Afşin Elbistan (AE) and Çayırhan (ÇYH)) as mineral additive in cement composition depending upon grinding. For this purpose fly ash was subjected to 5 different grinding times (10,20, 30, 45 and 60 min.). Mixture samples were prepared using 10%, 30% and 50% substitution ratios of original and ground ashes instead of cement. Furthermore, 100% cement composite reference sample was produced. Time of setting, mechanical properties, microstructure and thermal properties of the mixes prepared with different grinding time and substitution ratios were investigated. According to the findings, the specific surface area (Blaine) values of the fly ash were increased depending upon grinding. It was determined that both fly ash substitutes prolong the setting time of the mixtures. The compressive strength values of the samples formed with both fly ash were higher than the short term cure time according to the reference sample depending upon the increase in the grinding time and the substitution ratios. Depending upon increased curing and grinding times, the substitution of fly ash decreased the permeability and porosity of the samples. In addition, depending upon the fineness of the ash-substituted samples, the thermal analysis contributed to the hydration by reducing the amount of mass loss. As a result, the increase in fly ash fineness, increased pozzolanic activity and also showed that it can be used as a mineral additive in cement.

Keywords: Fly Ash, fineness, waste material, cement, pozzolan

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Türkiye’de elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı (ETKB, 2017).	4
Şekil 1.2.	Çin’de ve Hindistan’da uçucu küllerin kullanım alanları (Yao vd., 2015).	8
Şekil 1.3.	Çimento fabrikaları ve termik santraller (Köleli, 2015’den değiştirilmiştir).	10
Şekil 1.4.	Uçucu küllerin hava, toprak ve su kirliliği üzerine etkileri (URL 2).	16
Şekil 1.5.	Uçucu kül üretim modeli (URL 3).	18
Şekil 1.6.	Çimento ve uçucu küller; a) çimento, b) C tipi, c) F tipi (URL 4 ve URL 5).	20
Şekil 1.7.	Uçucu küllerin tane şekli, a) yüzeyinde sıvı damlalar olan küresel şekil, b) küresel şekilde camsı tanecik, c) düzensiz boşluklar içeren yüzey yapısına sahip tanecik, d) boşluklu yapıda küresel tanecik (Türker vd., 2009).	22
Şekil 1.8.	Uçucu küllerin tane yapısı; a) F tipi (yüksek silis içerikli), b ve c) C tipi (yüksek kireç içerikli) (Türker vd., 2009).	27
Şekil 1.9.	Uçucu külün SEM görüntüsü; a) oval ve küresel taneler, b) büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi (plerosphere), c) küresel olmayan düzensiz şekilli taneler, d) düzensiz bir küre (Georgakopoulos, 2003).	28
Şekil 1.10.	Puzolanların sınıflandırılması	32
Şekil 1.11.	Volkanik kökenli puzolanlar (URL 6, URL 7, URL 8, URL 9 ve URL 10).	33
Şekil 1.12.	Isıl işlem görmüş puzolanlar (URL 11 ve URL 12).	33
Şekil 1.13.	Yapay puzolan çeşitleri (URL 13, URL 14).	33
Şekil 1.14.	Uçucu kül tanelerinin öğütme ile içyapılarında meydana gelen değişiklikler (Felekoğlu vd., 2009).	51
Şekil 1.15.	Öğütme ile parçacık şeklindeki değişiklikler (iç kısım şekli düzensiz (yamuk) ve pürüzlü) (Felekoğlu vd., 2009).	51
Şekil 1.16.	Öğütme ile parçacık şeklinde olan değişiklikler (iç kısım şekli küresel ve pürüzsüz) (Felekoğlu vd., 2009).	52
Şekil 1.17.	Uçucu küllerde öğütmenin yoğunluk üzerine etkisi (Bouzoubal vd., 1997).	53
Şekil 1.18.	Öğütme ile özgül yüzey alan değerleri (Hela ve Orsakovà, 2013).	55
Şekil 1.19.	Orijinal ve farklı zamanlarda öğütülmüş uçucu küllerin SEM görüntüleri; a) 0 dk, b) 30 dk, c) 60 dk, d) 90 dk, e) 120 dk ve f) 150 dk. (Rajak vd., 2017).	57
Şekil 1.20.	Uçucu kül ikamesinin betonda kapilarite katsayısına etkisi (Karahana, 2006).	76

Şekil 1.21.	Çimento pastasının boşluk yapısı (Gao vd., 2015).	77
Şekil 1.22.	Değişik kömürlerden elde edilen uçucu küller; öğütülmüş kömür külü, a) iri, b) orta, c) ince taneli uçucu küller, akışkan yataklı kömürün külü, d) iri, e) orta, f) ince taneli uçucu küller (Sinsiri vd., 2010).	80
Şekil 1.23.	Termogravimetri analizine göre kütle-zaman grafikleri (URL 15).	82
Şekil 1.24.	Termogravimetre analizi ile sıcaklığa bağlı % ağırlık kayıpları (URL 15)	83
Şekil 1.25.	Diferansiyel termal analiz (Skoog ve West,1981; Skoog vd., 1998).	84
Şekil 1.26.	Diferansiyel termal analiz ile endotermik ve ekzotermik reaksiyona göre oluşan yapılar	84
Şekil 1.27.	Diferansiyel taramalı kalorimetri örnek grafiği	85
Şekil 2.1.	Uçucu küllerin temin edildiği termik santraller 1) Çayırhan Termik Santrali (Ankara), 2) Afşin Elbistan Termik Santrali (Kahramanmaraş)	92
Şekil 2.2.	Malzemelerin karakterizasyonunu belirlemek için yapılan deney ve analizler	94
Şekil 2.3.	Çalışmada kullanılan uçucu küller; a) Afşin Elbistan, b) Çayırhan	95
Şekil 2.4.	Uçucu küller için yoğunluk analizi; a) numunenin tartılması, b) değerlerin okunması	96
Şekil 2.5.	Uçucu küllerin özgül yüzey alanı; a) numune tartımı, b) numunenin hazneye yerleştirilmesi, c) haznenin cihaza yerleştirilmesi, d) özgül yüzey alan (blaine) değerinin okunması	98
Şekil 2.6.	Uçucu küllerin rutubet (nem) tayini; a) numunenin tartılması, b) nem değerinin okunması	99
Şekil 2.7.	Uçucu külleri için XRF analizi; a) numunelerin tartılması, b) lityum tetrabonatın numune ile karıştırılması, c) numuneleri yakma, d) ammonium iodide ilavesi, e) numunelerin XRF cihazında numune haznesine yerleştirilmesi, f) sonuçların okunması	100
Şekil 2.8.	Uçucu küllerde kızdırma kaybı tayini; a) numunenin tartılması, b) numunenin fırına yerleştirilmesi, c, d) fırında bekletilmesi	101
Şekil 2.9.	Serbest kalsiyum oksit tayini; a) numune tartımı, b) numunenin karıştırılması, c) süzülme için aparatların hazırlanması, d) numunenin süzülmesi, e) bron prosel yeşili dökülmesi, f) serbest kireç çözeltisi damlatılması	102
Şekil 2.10.	4 farklı karışım oranları ve malzeme miktarları	111
Şekil 2.11.	Karışım numunelerinin hazırlanması için karıştırma aşamaları	112
Şekil 2.12.	Karışım numunelerinin hazırlanması; a) numunelerin tartılması, b) el ile ön karıştırma, c) mikserle ön karıştırma, d) tüm malzemelerin bir arada karıştırılması	112
Şekil 2.13.	El ile vibrasyon işlemi (ASTM C 109/C 109M-07).	113

Şekil 2.14.	Numunelerin kalıplara yerleştirilmesi; a) numunenin yüzeyinin düzeltilmesi, b) cam ile yüzeyinin kapatılması, c) nemli bezle kalıpların sarılması, d) kür havuzunda numunelerin bekletilmesi.....	114
Şekil 2.15.	Taze numuneler üzerine yapılan deneyler	115
Şekil 2.16.	Standart kıvam tayini; a) malzemelerin karıştırılması, b) karışımın yağlanmış numune kabına yerleştirilmesi, c) kap içerisindeki numunenin yüzeyinin düzeltilmesi, d) numunenin vicat cihazına yerleştirilmesi, e) sondanın bırakılması, f) uygun batma değerinin okunması.....	116
Şekil 2.17.	Vicat cihazında iğne altına yerleştirilen kalıp.....	117
Şekil 2.18.	Hacim genleşme deneyi; a) numune kabının hazırlanması, b) karışımın kalıba doldurulması, c) kalıp üzerine ağırlık koyulması, d) kür dolabında bekletilmesi, e) kür süresi sonrası ilk ölçümün alınması, f) numunenin kazanda kaynatılması	119
Şekil 2.19.	Sertleşmiş numuneler üzerine yapılan deney ve analizler; a) kür süreleri, b) dayanım ve mikro yapı	120
Şekil 2.20.	Basınç dayanımı; a) numunenin kırılması, b) cihaz göstergesi	121
Şekil 2.21.	Kılcal su emme (kapilarite) deneyi düzeneyi.....	123
Şekil 2.22.	Kapilarite deneyi; a) Afşin Elbistan uçucu kül ikameli numuneler, b) Çayırhan uçucu kül ikameli numuneler	124
Şekil 2.23.	Termal analiz için gönderilmeye hazır numuneler	125
Şekil 2.24.	Boşluk tayini analizi; a) tek eksenli basma cihazında kırılan numunelerin tepsiye dizilmesi, b) etüvde 50 °C'de 2 gün kurutulması, c) kurutulmuş numunelerin rutubet almaması için poşetlenmesi	125
Şekil 3.1.	Afşin Elbistan uçucu külünün tüm öğütme sürelerine ait tane boyu analizi.....	126
Şekil 3.2.	Çayırhan uçucu külünün tüm öğütme sürelerine ait tane boyu analizi.....	127
Şekil 3.3.	Öğütme ile Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin yoğunluk değişimleri.....	129
Şekil 3.4.	Öğütme ile Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin özgül yüzey alan değerlerindeki değişimleri.....	130
Şekil 3.5.	Uçucu külleri ternary diyagramı ile sınıflandırma (Lothenbach vd., 2011).	133
Şekil 3.6.	Afşin Elbistan uçucu külünün mineralojik bileşimi.....	138
Şekil 3.7.	Çayırhan uçucu külünün mineralojik bileşimi.....	138
Şekil 3.8.	Afşin Elbistan uçucu külüne ait SEM görüntüsü, a) 500K büyütme orijinal kül, b) 3500K büyütme orijinal kül, c) 10 dk öğütülmüş 500K büyütme kül, d) 10 dk öğütülmüş 3500K büyütme kül, e) 20 dk öğütülmüş 500K büyütme kül, f) 20 dk öğütülmüş 3500K büyütme kül	140

Şekil 3.9.	g) 30 dk öğütülmüş 500K büyütmelik kül, h) 30.dk öğütülmüş 3500K büyütmelik kül, ı) 45dk öğütülmüş 500K büyütmelik kül, j) 45 dk öğütülmüş 3500K büyütmelik kül, k) 60 dk öğütülmüş 500K büyütmelik kül, l) 60 dk. öğütülmüş 3500K büyütmelik kül.....	141
Şekil 3.10.	Çayırhan uçucu külüne ait SEM görüntüsü, a) 500K büyütmelik orijinal kül, b) 3500K büyütmelik orijinal kül, c) 10 dk öğütülmüş 500K büyütmelik kül, d) 10 dk öğütülmüş 3500K büyütmelik kül, e) 20 dk öğütülmüş 500K büyütmelik kül, f) 20 dk. öğütülmüş 3500K büyütmelik kül	142
Şekil 3.11.	g) 30 dk öğütülmüş 500K büyütmelik kül, h) 30 dk öğütülmüş 3500K büyütmelik kül, ı) 45dk öğütülmüş 500K büyütmelik kül, j) 45 dk öğütülmüş 3500K büyütmelik kül, k) 60 dk. öğütülmüş 500K büyütmelik kül, l) 60 dk. öğütülmüş 3500K büyütmelik kül.....	143
Şekil 3.12.	Çimentonun tane boyu analizi	146
Şekil 3.13.	Uçucu küllerde inceliğin ve ikame oranının karışımın su ihtiyacı üzerine etkisi; a) orijinal AE uçucu kül katkıli karışımlar, b) 10 dk öğütme süreli AE uçucu kül katkıli karışımlar	148
Şekil 3.14.	Uçucu küllerde inceliğin ve ikame oranının karışımın su ihtiyacı üzerine etkisi; a) 20 dk öğütülmüş AE uçucu kül katkıli karışımlar, b) 30 dk öğütülmüş AE uçucu kül katkıli karışımlar	148
Şekil 3.15.	Uçucu küllerde inceliğin ve ikame oranının karışımın su ihtiyacı üzerine etkisi; a) 45 dk öğütülmüş AE uçucu kül katkıli karışımlar, b) 60 dk öğütülmüş AE uçucu kül katkıli karışımlar	149
Şekil 3.16.	Uçucu küllerde inceliğin ve ikame oranının karışımın su ihtiyacı üzerine etkisi; a) orijinal ÇYH uçucu kül katkıli karışımlar, b) 10 dk öğütülmüş ÇYH uçucu kül katkıli karışımlar	150
Şekil 3.17.	Uçucu küllerde inceliğin ve ikame oranının karışımın su ihtiyacı üzerine etkisi; a) 20 dk öğütülmüş ÇYH uçucu kül katkıli karışımlar, b) 30 dk öğütülmüş ÇYH uçucu kül katkıli karışımlar.....	151
Şekil 3.18.	Uçucu küllerde inceliğin ve ikame oranının karışımın su ihtiyacı üzerine etkisi; a) 45 dk öğütülmüş ÇYH uçucu kül katkıli karışımlar, b) 60 dk öğütülmüş ÇYH uçucu kül katkıli karışımlar.....	151
Şekil 3.19.	Öğütme süresine göre AE uçucu kül katkıli karışımların su ihtiyacı	153
Şekil 3.20.	Öğütme süresine göre ÇYH uçucu kül katkıli karışımların su ihtiyacı	153
Şekil 3.21.	AE ve ÇYH uçucu kül katkıli karışımların su ihtiyacının referans numuneye göre kıyaslanması.....	154
Şekil 3.22.	AE orijinal durumda uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri	156
Şekil 3.23.	AE 10 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri	156
Şekil 3.24.	AE 20 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri	157
Şekil 3.25.	AE 30 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri	157
Şekil 3.26.	AE 45 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri	158

Şekil 3.27.	AE 60 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri	158
Şekil 3.28.	ÇYH orijinal durumda uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri	160
Şekil 3.29.	ÇYH 10 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri	160
Şekil 3.30.	ÇYH 20 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri	161
Şekil 3.31.	ÇYH 30 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri	161
Şekil 3.32.	ÇYH 45 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri	162
Şekil 3.33.	ÇYH 60 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri	162
Şekil 3.34.	AE uçucu kül katkılı karışımların 2 günlük basınç dayanım değerleri.....	165
Şekil 3.35.	ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 2 günlük basınç dayanım değerleri...	166
Şekil 3.36.	AE uçucu kül katkılı karışımların 7 günlük basınç dayanım değerleri.....	167
Şekil 3.37.	ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 7 günlük basınç dayanım değerleri...	167
Şekil 3.38.	AE ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 2 günlük basınç dayanım değerlerinin kıyaslanması	169
Şekil 3.39.	AE ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 7 günlük basınç dayanım değerlerinin kıyaslanması	169
Şekil 3.40.	AE uçucu kül katkılı karışımların 28 günlük basınç dayanım değerleri....	171
Şekil 3.41.	ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 28 günlük basınç dayanım değerleri	172
Şekil 3.42.	AE ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 28 günlük basınç dayanım değerlerinin kıyaslanması	173
Şekil 3.43.	AE uçucu kül katkılı karışımların 56 günlük basınç dayanım değerleri....	174
Şekil 3.44.	ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 56 günlük basınç dayanım değerleri	174
Şekil 3.45.	AE ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 56 günlük basınç dayanım değerlerinin kıyaslanması	175
Şekil 3.46.	AE uçucu kül katkılı karışımların 90 günlük basınç dayanım değerleri...	176
Şekil 3.47.	ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 90 günlük basınç dayanım değerleri	176
Şekil 3.48.	AE ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 90 günlük basınç dayanım değerlerinin kıyaslanması	177
Şekil 3.49.	Uçucu küllerin basınç dayanımının zamana göre değişimi (Gürbüz, 2009).	179
Şekil 3.50.	Uçucu kül tipinin basınç dayanımının gelişmesi üzerine etkisi (Gürbüz, 2009).	181
Şekil 3.51.	AE ve ÇYH uçucu küllerinin 28 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri	184
Şekil 3.52.	AE ve ÇYH uçucu küllerinin 90 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri	185

Şekil 3.53.	AE ve ÇYH uçucu küllerinin orijinal durumlarının öğütme süresine göre 28 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri değişimleri.....	186
Şekil 3.54.	AE ve ÇYH uçucu küllerinin orijinal durumlarının öğütme süresine göre 90 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri değişimleri.....	186
Şekil 3.55.	Kılcal kanallar yolu ile numunelerin ilk ve sonraki zamanlarda su emme değerlerinin gösterilmesi (ASTM C 1585 -04, 2007).....	188
Şekil 3.56.	AE uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük kapilarite katsayı değerleri	189
Şekil 3.57.	AE uçucu kül katkılı numunelerin 56 günlük kapilarite katsayı değerleri	189
Şekil 3.58.	AE uçucu kül katkılı numunelerin 90 günlük kapilarite katsayı değerleri	190
Şekil 3.59.	ÇYH uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük kapilarite katsayı değerleri	192
Şekil 3.60.	ÇYH uçucu kül katkılı numunelerin 56 günlük kapilarite katsayı değerleri	192
Şekil 3.61.	ÇYH uçucu kül katkılı numunelerin 90 günlük kapilarite katsayı değerleri	193
Şekil 3.62.	AE uçucu kül ikameli 7 günlük çimento pastasının boşluk oranına göre basınç dayanım değişimi.....	197
Şekil 3.63.	AE uçucu kül ikameli 90 günlük çimento pastasının boşluk oranına göre basınç dayanım değişimi.....	198
Şekil 3.64.	ÇYH uçucu kül ikameli 7 günlük çimento pastasının boşluk oranına göre basınç dayanım değişimi.....	199
Şekil 3.65.	ÇYH uçucu kül ikameli 90 günlük çimento pastasının boşluk oranına göre basınç dayanım değişimi.....	199
Şekil 3.66.	Çimento, orijinal ve 60 dk öğütme inceliğinde % 30 AE uçucu kül ikameli pastaların 90 günlük kür süresi sonrası TGA/DTG analizi sonuçları.....	202
Şekil 3.67.	Çimento, orijinal ve 60 dk öğütme inceliğinde % 30 ÇYH uçucu kül ikameli pastaların 90 günlük kür süresi sonrası TGA/DTG analiz sonuçları.....	203

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1.	Türkiye’de kömürle çalışan termik santraller (URL 1).....	5
Tablo 1.2.	Ülkelere göre uçucu kül miktarı ve kullanım alanları (Alam ve Akhtar, 2011).	8
Tablo 1.3.	Uçucu küllerin beton üzerinde etkileri (Malhotra and Mehta, 2005).	13
Tablo 1.4.	Uçucu küllerin çevresel ve toplumsal zararları (Kaplan ve Gültekin, 2010).	15
Tablo 1.5.	Kömüre göre uçucu küllerinin kimyasal bileşimi (Ahmaruzzaman, 2010).	23
Tablo 1.6.	C ve F tipi uçucu küllerin kimyasal bileşimi (Öksüz, 2006).	24
Tablo 1.7.	Farklı kimyasal bileşime sahip uçucu küller (Yıldırım, 2007).	24
Tablo 1.8.	Yüksek kireçli uçucu küllerin mineralojik bileşimleri (Kölemen, 2012).	26
Tablo 1.9.	Uçucu külleri sınıflandırma (Günindi, 2005; Özdemir, 2007; Bremseth, 2010).	30
Tablo 1.10.	Puzolanik malzemeler ve reaktivite derecesi (Malhotra ve Mehta, 1996).	34
Tablo 1.11.	Puzolanların fiziksel ve kimyasal yapısı (Lohtia ve Joshi, 1995; Malhotra ve Mehta, 1996).	35
Tablo 1.12.	ASTM C 618’e göre puzolanların uygunluk değerleri	35
Tablo 1.13.	Taze haldeki beton özellikleri üzerine etkisi (Thomas and Wilson, 2002; Kosmatka vd., 2002; Taylor et al., 2006).	37
Tablo 1.14.	Sertleşmiş haldeki beton özellikleri üzerine etkisi (Thomas and Wilson, 2002; Kosmatka vd., 2002; Taylor et al. 2006).	38
Tablo 1.15.	Portland çimentosunun mineralojik bileşimi (Fathi, 2012).	47
Tablo 1.16.	Portland çimentosunun kimyasal bileşimi (Fathi, 2012).	47
Tablo 1.17.	Portland çimento hidratasyonu (Fathi, 2012).	48
Tablo 1.18.	Öğütme süresine göre tane çapı değişimi (Rajak vd., 2017).	58
Tablo 1.19.	Farklı ikame oranlarında orijinal ve öğütülmüş uçucu kül katkı harçların basınç dayanım değerleri (Aydın vd., 2010).	61
Tablo 1.20.	Uçucu kül katkı pastaların normal kıvam ve priz süreleri (Karim vd., 2011).	66
Tablo 1.21.	Hidrata olmuş çimento pastasının boşluk boyut dağılımı(Gao vd., 2015).	77

Tablo 1.22.	TG analizine göre farklı sıcaklıktaki kütle kayıpları (Dorum vd., 2009).	86
Tablo 1.23.	Uçucu kül ikameli pastaların TGA analizine göre % kütle kayıp miktarları.....	88
Tablo 1.24.	Uçucu kül ikameli pastaların 7, 28 ve 90 günlük TGA analizine göre % kütle kayıp miktarları.....	89
Tablo 2.1.	Uçucu küllerin bilyalı değirmende öğütülmesi ile ilgili veriler.....	93
Tablo 2.2.	Uçucu küllere ait yoğunluk tablosu	97
Tablo 2.3.	Özgül yüzey alanı için numune miktarlarının hesaplanması	97
Tablo 2.4.	Uçucu küllerin öğütme sürelerine göre hazırlanan karışım oranları.....	104
Tablo 2.5.	Karışım oranları ve numune sayısı	106
Tablo 2.6.	Karışım numunelerine yapılan kılcal su emme deneyi	108
Tablo 2.7.	Karışım için kullanılan malzemelerin miktar hesabı	110
Tablo 3.1.	Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin rutubet durumu	131
Tablo 3.2.	Uçucu küllerin kimyasal analizi ve standartlarla karşılaştırılması	134
Tablo 3.3.	Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin serbest kireç miktarları	136
Tablo 3.4.	AE ve ÇYH uçucu küllerinin SEM analizine göre orijinal durumdaki şekil ve yapısının öğütme süresine göre değişimleri.	144
Tablo 3.5.	Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri.....	147
Tablo 3.6.	AE uçucu kül ikameli karışımların genleşme miktarları	164
Tablo 3.7.	AE uçucu külünün farklı öğütme süresi ve ikame oranlarında 2, 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanım değerlerinin referans numunenin basınç dayanım değerine göre % değişim miktarları.....	182
Tablo 3.8.	ÇYH uçucu külünün farklı öğütme süresi ve ikame oranlarında 2, 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanım değerlerinin referans numunenin basınç dayanım değerine göre % değişim miktarları.....	183
Tablo 3.9.	AE uçucu külünün farklı öğütme süresi ve ikame oranlarında 28, 56 ve 90 kapilarite katsayı değerlerinin referans numunenin kapilarite katsayı değerlerine göre % değişim miktarları	194
Tablo 3.10.	ÇYH uçucu külünün farklı öğütme süresi ve ikame oranlarında 28, 56 ve 90 kapilarite katsayı değerlerinin referans numunenin kapilarite katsayı değerlerine göre % değişim miktarları	195
Tablo 3.11.	Çimento ve AE uçucu külünün orijinal durum ile 60 dk öğütme inceliğinde TG analiz sonuçlarına göre farklı sıcaklık aralığında oluşmuş kütle kayıpları	203
Tablo 3.12.	Çimento ve ÇYH uçucu külünün orijinal ve 60 dk öğütme inceliğinde TG analiz sonuçlarına göre farklı sıcaklık aralığında oluşmuş kütle kayıpları	204

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

AE	: Afşin Elbistan uçucu külü
ASR	: Alkali silika reaktivitesi
ASTM	: American society for testing and materials
C-S-H	: Kalsiyum-Silika-Hidrat
C-A-H	: Kalsiyum-Alimünat-Hidrat
C	: C sınıfı uçucu kül
C ₂ S	: Di kalsiyum silika
C ₃ S	: Tri kalsiyum silika
C ₃ A	: Tri kalsiyum alimüa
Ca(OH) ₂	: Portlandit
C ₄ AF	: Tetra kalsiyum alimüna ferrit
CEM I 42,5 R	: Erken yüksek dayanıma sahip normal portland çimentosu
cm ²	: Santimetre kare
cm ³	: Santimetre küp
cm	: Santimetre
cm ² /gr	: Santimetre kare/gram
°C	: Santigrat derece
ÇYH	: Çayırhan uçucu külü
Dk	: Dakika
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
EÜAŞ	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi,
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.
F	: F sınıfı uçucu kül
Gr	: Gram
gr/cm ³	: Gram/santimetre küp
Hz	: Hertz
J	: Joule
KWh	: Kilowat saat
Kcal/kg	: Kilokalori/kilogram
Kg	: Kilogram

kJ/mol	: Kilojoul/ mol
kW	: Kilowatt
kN	: Kilonewton
kN/sn	: Kilonewton/saniye
Kg/m ³	:Kilogram/metreküp
lt	: Litre
m ²	: Metre kare
m ² /gr	: Metrekare/gram
m ² /kg	: Metrekare/kilogram
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
Mt	: Milyon ton
MIP	: Mercury intrusion porosimetry
MW	: Megawat
nm	: Nanometre
S/B	: Su / Bağlayıcı oranı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscope)
TMMOB	: Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
THBB	: Türkiye Hazır Beton Birliği
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TGA	: Termogravimetri Analizi
TWh	: Terawatt saat
V	: Volt
XRD	: X- ışını kırınım yöntemi (Mineralojik tayin için)
XRF	: X-ray fluorescence (kimyasal tayin için)
µm	: Mikrometre
Θ	: Teta açısı
%	: Yüzde

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Türkiye’de elektrik enerjisinin yaklaşık % 3’i kömürle çalışan termik santrallerden üretilmekte olup bu santrallerde düşük kalorili ve kül oranı yüksek olan linyit kömürleri kullanılmaktadır. Bu kül baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımı ile yakalanarak atmosfere çıkışı önlenen, endüstriyel olarak oluşmuş bir atıktır. Bu atıkların çevreye atılması, rüzgarlanma ile tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgar erozyonu, topraktan süzülerek toksit madde taşınması ve radyasyon miktarının artması gibi çevresel etkilere neden olmaktadır. Çevresel anlamda oluşan bu sorunlardan dolayı tarım ürünleri, su ve havanın kalitesi, doğal hayat ve çevre güzelliği açısından istenmeyen sorunlarla yüzleşilmektedir. Bu sorunlarla ancak uçucu külleri çeşitli alanlarda kullanarak üstesinden gelinmektedir. Böylece atık malzemenin geri kazanımı ile ülke ekonomisine de katkı sağlanmaktadır (Açıkgöz, 2008; Aruntaş, 2006).

Yapı sektörü, ihtiyaçlara ve zamana bağlı olarak sürekli değişime ve yenilenmeye ihtiyaç duyan bir konumda bulunmaktadır. Sektörde sürekli olarak maliyetlerin artması ve doğal kaynakların tükenmesi sonucu yeni kaynaklar arayışına gidilmiştir. Bu durumlardan ötürü mevcut kaynakların korunması, düşük maliyetli ve nitelikli malzeme üretmek büyük önem taşımaktadır (Durmuş, 2008). Yapı sektöründe en çok kullanılan çimento, üretim aşaması boyunca farklı çevresel sorunlar (hava, toprak ve su kirliliği üzerine etkisi) oluşturmaktadır. Bu sorunları ortadan kaldırmak için çimento yerine çimento özelliğinde olan yeni kaynaklar bulmak ihtiyaç haline gelmiştir. Puzolanik özelliği olan uçucu küllerin çimento üretiminde kullanımını her geçen gün biraz daha artmaktadır. Uçucu küllerin çimento yerine alternatif bir malzeme olarak kullanımını, çimento üretim aşaması boyunca oluşan çevresel sorunları azaltmaya katkı sağlamaktadır. Çevresel sorunları azaltmada en büyük katkılarından biri, çimento üretimi sırasında çevreye yayılarak sera gazı etkisi yapan CO₂ gazı salınım miktarını düşürmektedir (1 ton çimento üretiminde yaklaşık olarak 1 ton CO₂ gazı açığa çıkmasına neden olmaktadır) (Bouzoubaâ vd., 1997; Akkaya ve Toroğlu, 2017). Bir diğer katkısı, çimento üretimi sırasında bir yandan doğal hammadde kaynaklarının korunması sağlanırken diğer yandan atık bir malzemenin çevrede depolanması önlenmektedir (1 ton çimento üretmek için 2,8 ton hammadde

tüketilmektedir) (Guovd., 2010). Çimento içerisinde uçucu küllerin daha yaygın bir şekilde kullanılabilmesi için puzolanik özelliklerini daha etkin hale getirmek gerekir. Bunun içinde uçucu küller fiziksel olarak bir takım değişimler geçirmek zorunda kalabilir. Örneğin tane boyutunun değiştirilmesi ile puzolanik özelliği geliştirilebilir. Çünkü termik santrallerden açığa çıkan uçucu küller her zaman çimento bileşiminde kullanıma uygun tane boyutuna sahip değildirler. Uçucu küllerin uygun tane boyutuna getirilebilmesi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri uçucu külleri 45 µm boyutuna sahip elekten elemek, bir diğer yöntem ise öğütme işlemine maruz bırakarak tane boyutunun değiştirmek (Çelik, 2003).

Beton üretimi sırasında betonun bileşimini oluşturan çimento, üretimi pahalı ve çevresel anlamda kirliliğe neden olan bir üründür. Bu yüzden çimento yerine daha ucuz, kolay elde edilen ve doğada atıl durumda bulunan kaynakların kullanımına yönelmiştir. Çimento yerine alternatif olarak kullanılan ve atık bir ürün olan uçucu küllerin hem temin edilmesi kolay hemde betonun özelliklerini iyileştirmesi bakımından birçok faydası bulunmaktadır. Betonun özelliklerini iyileştirmesi bakımından uçucu küllerin sağladığı faydalar, genel olarak ince tane yapısına sahip uçucu küller ile daha geçirimsiz betonlar üretmeye, büyük kütle beton dökümlerinde (baraj betonlarında) malzemenin iç ve dış ortamın sıcaklık farkı bağlı olarak oluşan çatlak sayısını azaltmaya, betonun erken ve nihai dayanım değerlerinin uçucu kül ilavesiz betonlara oranla arttırmaya katkı sağlamaktadır (Binici vd., 2009).

Farklı özelliklere sahip uçucu küllerin fiziksel, kimyasal, mineralojik, morfolojik, puzolanik ve mekanik özellikleri bakımından değerlendirilerek hangi alanda kullanıma uygunluğu tam anlamıyla tespit etmede kolaylık sağlamaktadır. Böylece uçucu küllerin farklı alanlarda değerlendirilmesi ile ürün maliyetini azaltmak, doğal hammadde kaynaklarını korumak ve ekolojik sorunların azaltılmasına katkı sağlanacaktır.

1.2. Tezin Gerekçesi ve Amacı

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde nüfusun artması ve ekonominin büyümesi gibi etmenlere bağlı olarak enerji ihtiyacı diğer gelişmiş ülkelere kıyasla daha fazladır. Enerji üretiminin artması ile tüketim miktarıda artmaktadır. Ülkemizde enerjinin bir kısmı kömürle çalışan termik santrallerden karşılanmaktadır.

Son yıllarda inşaat sektöründe meydana gelen büyüme çimento tüketimini arttırmıştır. Ayrıca sanayileşme talebi, ekonomik gelişmelerin ve nüfusun artması ile konut ihtiyacını da arttırmıştır. Artan konut ihtiyacı ile beraber inşaat sektöründe kullanılan ve beton bileşimlerinden biri olan çimento malzemesinin fazla oranda ihtiyacı duyulmuştur. Çimento tüketimine paralel olarak üretim miktarının artması ile beraber enerji tüketimi ve çevresel sorunlar ülke ekonomisini olumsuz yönde etkilemiştir.

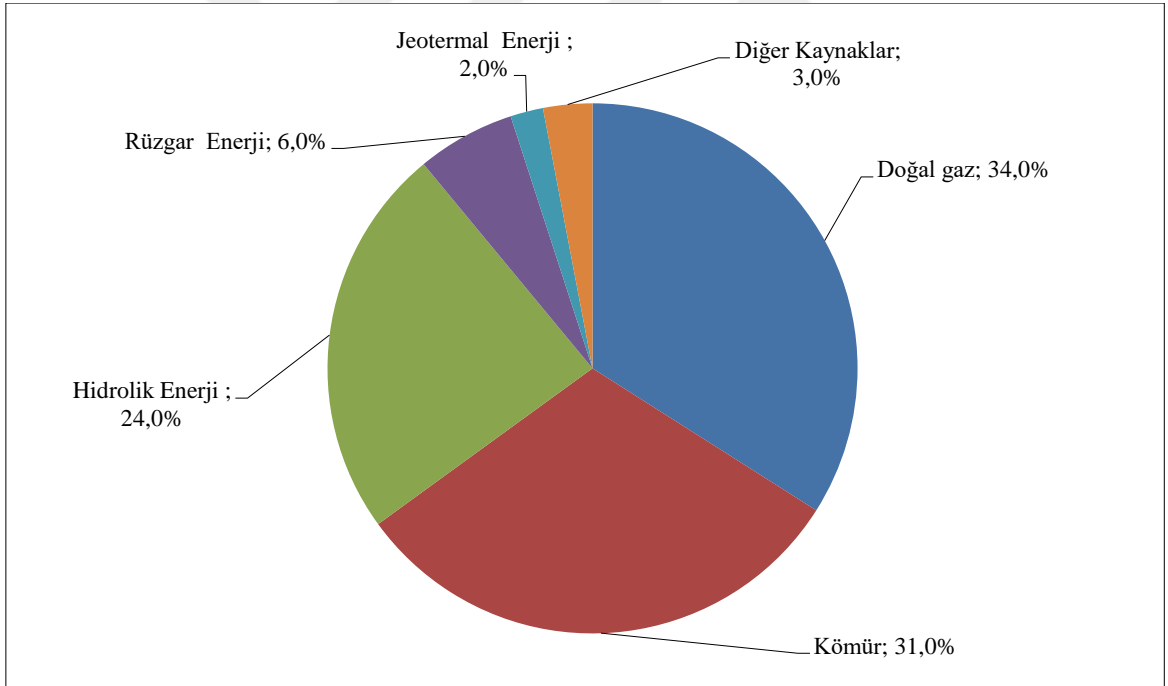
Ülke ekonomisine katkı sağlamak ve sürdürülebilir bir çevre bilincinde yaşamak için termik santral atığı olan uçucu küllerin ekonomiye kazandırılması gereklidir. Atık malzemelerin uygun biçimde değerlendirilmesi ve bertaraf edilmesi için birçok yönden ele alınıp değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu tez kapsamında çalışmanın özgünlüğü açısından Türkiye’de halen işletilen, Afşin-Elbistan ve Çayırhan termik santrallerinden elde edilen uçucu küller kullanılmıştır. İki farklı özelliğe sahip uçucu küllerin tamamen çimento malzemesi yerine ya da çimentoya hangi boyutta ve ikame oranlarda mineral katkı olarak kullanıma uygunluğu incelenmiştir. Uçucu küllerin çimento içerisinde kullanıldığında daha yüksek oranda puzolanik özellik göstermesi için öğütülmüş ve öğütmenin etkisi ile farklı özellikleri ele alınarak değerlendirilmiştir. Yapılan tez çalışmasının amacı ve bu bağlamda diğer çalışmalardan farkı, farklı öğütme sürelerinde ve ikame oranlarına sahip iki farklı özellikteki uçucu küllerin (puzolanik özellik bakımından F ve C tipi) çimento bileşiminde mineral katkı olarak en yüksek seviyelerde kullanımı amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda uçucu küllerin en uygun öğütme süresi ve ikame oranında çimento bileşiminde kullanılması ile en yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca uçucu kül katkısı ile hazırlanan karışımlar içerisinde en geçirimsiz malzeme için en uygun öğütme süresi, ikame oranı ve kür süresinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda uçucu küllerin çimento bileşiminde kullanılması ile daha ucuz, nitelikli, kolaylıkla doğada atık olarak bulunabilen uçucu küllerin yüksek oranlarda geri kazanımı sağlanacaktır. Ayrıca çimento üretimine kıyasla enerji ve hammadde tasarrufu sağlaması ve çevre kirliliğini azalması bakımından çimento malzemesi olarak alternatif olarak kullanılması amaçlanmıştır.

1.3. Santral Atığı Uçucu Küller

Uçucu küller elektrik enerjisi üretmek için termik santrallerde yakıt olarak kullanılan kömürün yanması sonucu açığa çıkan bir yan üründür. Elektrik üretimi için kömür, bilyalı

veya silindirik değirmenlerde öğütülerek ince taneli bir yapı alması sağlanmaktadır. Kömür içerisinde bulunan karbon 1037-1482 °C sıcaklıkta ve sürekli hava ile beslenen yanma odalarında hemen tutuşmaya başlamaktadır. Kömürün sürekli olarak yanması ile uçucu maddeler buharlaşmakta ve karbon kazandaki borularda ısınmaktadır. Kil, kuvars ve feldispat gibi inorganik maddeler erimekte ve yanma odalarında cüruf oluşmaktadır. Yanma odalarından baca gazı içerisinde sertleşmiş haldeki eriyikler ayrılmakta ve küresel tane yapısına sahip uçucu kül parçacıkları oluşmaktadır (Hoffman, 2006).

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için gelişmişlik seviyesinin ölçütü, enerjiye bağımlılık ve tüketim düzeyinin bir göstergesidir. Ekonomi, endüstri ve nüfusun artması Türkiye’de elektrik enerjisi tüketim seviyesinin de artmasına neden olmaktadır (Barış, 2011; Say, 2006). Ülkemizde, 2017 Temmuz ayı sonu itibarıyla kurulu güç 80.546 MW’a ulaşmış olup kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Türkiye’de elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı (ETKB, 2017).

Türkiyede Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB)’nın 2017 yılı Temmuz ayı verilerine göre kömür kullanılarak üretilen enerji ikinci sırada yer almakta olup, Tablo 1,1’de kömürle çalışan termik santraller verilmiştir.

Tablo 1.1. Türkiye’de kömürle çalışan termik santraller (URL 1).

Termik Santral Adı	İl	Firma Adı	Yakıt Tipi	Kurulu Güç, MW
Zonguldak Eren (ZETES)	Zonguldak	Eren Enerji	İthal Kömür	2.790
Afşin - Elbistan B Termik Santrali	Kahramanmaraş	EÜAŞ	Linyit	1.440
Afşin - Elbistan A Termik Santrali	Kahramanmaraş	EÜAŞ	Linyit	1.355
Cenal Karabiga Termik Santrali	Çanakkale	Alarko Enerji	İthal Kömür	1.320
İSKEN Sugözü Termik Santrali	Adana	Steag Enerji	İthal Kömür	1.320
İÇDAŞ Bekirli Termik Santrali	Çanakkale	İÇDAŞ Elektrik	İthal Kömür	1.200
İskenderun Atlas Termik Santrali	Hatay	Diler Holding Enerji Grubu	İthal Kömür	1.200
Soma B Termik Santrali	Manisa	Konya Şeker Enerji	Linyit	990
Kemerköy Termik Santrali	Muğla	Limak Enerji	Linyit	630
Yatağan Termik Santrali	Muğla	Bereket Enerji	Linyit	630
Çayırhan Termik Santrali	Ankara	Ciner Enerji	Linyit	620
Seyitömer Termik Santrali	Kütahya	Çelikler Elektrik	Linyit	600
Kangal Termik Santrali	Sivas	Konya Şeker Enerji	Linyit	457
Tufanbeyli Termik Santrali	Adana	Enerjisa Elektrik	Linyit	450
Yeniköy Termik Santrali	Muğla	IC İtaş Enerji	Linyit	420
İÇDAŞ Biga Termik Santrali	Çanakkale	İÇDAŞ Elektrik	İthal Kömür	405
Silopi Termik Santrali	Şırnak	Ciner Enerji	Asfaltit	405
Tunçbilek Termik Santrali	Kütahya	Çelikler Enerji	Linyit	365
İzdemir Enerji Aliğa Termik Santrali	İzmir	İzmir Demir Çelik	İthal Kömür	350
18 Mart Çan Termik Santrali	Çanakkale	EÜAŞ	Linyit	320
Çatalağzı Termik Santrali	Zonguldak	Bereket Enerji	Taş Kömürü	300
Aksa Bolu Göynük Termik Santrali	Bolu	Aksa Enerji	Linyit	270
İskenderun Demir Çelik Termik Santrali	Hatay	OYAK	İthal Kömür	220
Orhaneli Termik Santrali	Bursa	Çelikler Enerji	Linyit	210
Çolakoğlu Termik Santrali	Kocaeli	Çolakoğlu Metalurji	İthal Kömür	190
Yunus Emre Termik Santrali	Eskişehir	Naksan Enerji	Linyit	145
Kardemir Termik Santrali	Karabük	Kardemir A.Ş.	Kömür	78
Polat Termik Santrali	Kütahya	Polat Elektrik Üretim	Linyit	51
Soma A Termik Santrali	Manisa	EÜAŞ	Kömür	44
Amasya Şeker Fabrikası Termik Santrali	Amasya	Amasya Şeker A.Ş.	Linyit	7,76
Kıpaş Kağıt Fabrikası Kömür Santrali	Kahramanmaraş	Kıpaş Holding	İthal Kömür	7,60
Aynes Gıda Termik Santrali	Denizli	Aynes Gıda	Linyit	5,5
Küçüker Tekstil Termik Santrali	Denizli	Küçüker Tekstil	Linyit	5

Tablo 1.1.'in devamı

Termik Santral Adı	İl	Firma Adı	Yakıt Tipi	Kurulu Güç, MW
Kütahya Şeker Fabrikası Termik Santrali	Kütahya	Kütahya Şeker Fabrikası	Linyit	4,57
Çankırı Tuz Fabrikası Kojenerasyon Santrali	Çankırı	Med-Mar Sağlık Saltı Tuz	Linyit	1,64
Göknur Gıda Termik Santrali	Niğde	Göknur Gıda	Kömür	1,55
Eti Soda Kojenerasyon Santrali	Ankara	Ciner Enerji	Linyit	24
Kahramanmaraş Kağıt Termik Santrali	Kahramanmaraş	Kahramanmaraş Kağıt	İthal Kömür	16
Eti Alüminyum Termik Santrali	Konya	Cengiz Enerji	Linyit	13
Susurluk Şeker Fabrikası Termik Santrali	Balıkesir	Türkiye Şeker Fabrikaları	Linyit	9,6

Kömür, fosil kaynaklı yakıtlardan olup, yerli enerji kaynağı olarak elektrik üretiminde önemli bir role sahiptir. Türkiye’de Linyit/alt bitümlü kömür sahaları ülkemizde bütün bölgelere yayılmış olup, düşük kalorili, kül, nem ve sülfür içeriği bakımından ise yüksek oranlara sahiptir. Türkiye’de linyit rezervleri toplam 14,2 milyar ton (bu miktar yaklaşık % 91, 5 oranına karşılık gelmekte), taş kömürü rezervi 1,3 milyon ton’dur. Ülkemizdeki toplam linyit/alt bitümlü kömür rezervinin yaklaşık % 68’i düşük kalorili olup % 23,5’i, 2000-3000 kcal/kg arasında, % 5,1’i, 3000-4000 kcal/kg arasında, % 3,4’ü, 4000 kcal/kg üzerinde ısı değere sahiptir (ETKB, 2017; Başar vd, 2016).

Enerji üretiminde, kömürün hayati bir rolü olmasına rağmen, içerisinde farklı mineralleri bulundurma ve bu minerallerin farklı kimyasal bileşime sahip olmasından dolayı önemli problemlerin oluşmasına sebebiyet vermektedir. Düşük kaloriye sahip kömürlerin yakıt olarak tüketilmesi ile çevrede ve havada kül birikimine neden olmaktadır. Bu küller, hava ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Hava ve çevre kirliliğine bağlı olarak insan ve toplum yaşamını etkileyen, iklim değişiklikleri, kuraklıklar, orman yangınları, beklenmedik zamanlarda yüksek yağışlar ve su baskınları, çok sert geçen kışlar vb. olumsuz etkilerle karşı karşıya kalmaya neden olmaktadır (Akar vd., 2013; TMMOB, 2017).

1.3.1. Dünya’da ve Türkiye’de Uçucu Küller

Termik santrallerden açığa çıkan uçucu küller, Dünya’da yaklaşık yılda 780 milyon ton (Toniolo ve Boccaccini, 2017) Türkiye’de ise 18 milyon ton olarak belirlenmiştir (Bilir

vd, 2015). Ülkemizde termik santrallerde kullanılan linyit kömürlerinin genelde % 20-50 kül atığı olarak (ithal kömürde % 10-15) ve bu miktarın % 80-90'ı uçucu kül iken % 10-20'si taban küllerini oluşturduğu görülmüştür (Başar, 2016). Açığa çıkan bu ürün farklı ülkelerde farklı alanlarda kullanım olanağı bulmasına rağmen en yaygın olarak çimento ve beton sanayisinde kullanılmaktadır. Türkiye'de uçucu küllerin % 2-3 oranında diğer ülkelerde ise % 80 oranında çimento ve beton sanayisinde değerlendirilmektedir. Çimento ve betonun yanı sıra agrega, gazbeton, tuğla üretimi, yol ve zemin iyileştirmeleri gibi farklı yapı sektörlerinde de değerlendirilmesi uçucu küllerin, kimyasal bileşimi, uygun radyoaktivite değerleri ve fiziksel özellikleri açısından yapı sektöründe kullanıma daha uygun bir malzeme olmasından ileri gelmiştir. Uçucu külleri bu alanda değerlendirmeyip çevrede biriktirilmesine izin verilmesi ile uçucu küller insan sağlığı ve çevre kirliliği üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaya neden olmaktadır. Uçucu küllerin bu olumsuz etkilerini azaltmak için, Dünyada ve Türkiye'de kullanım alanlarının artırılması ve yeni kullanım alanlarının oluşturulmasını sağlayacaktır (Kaplan ve Gültekin, 2010).

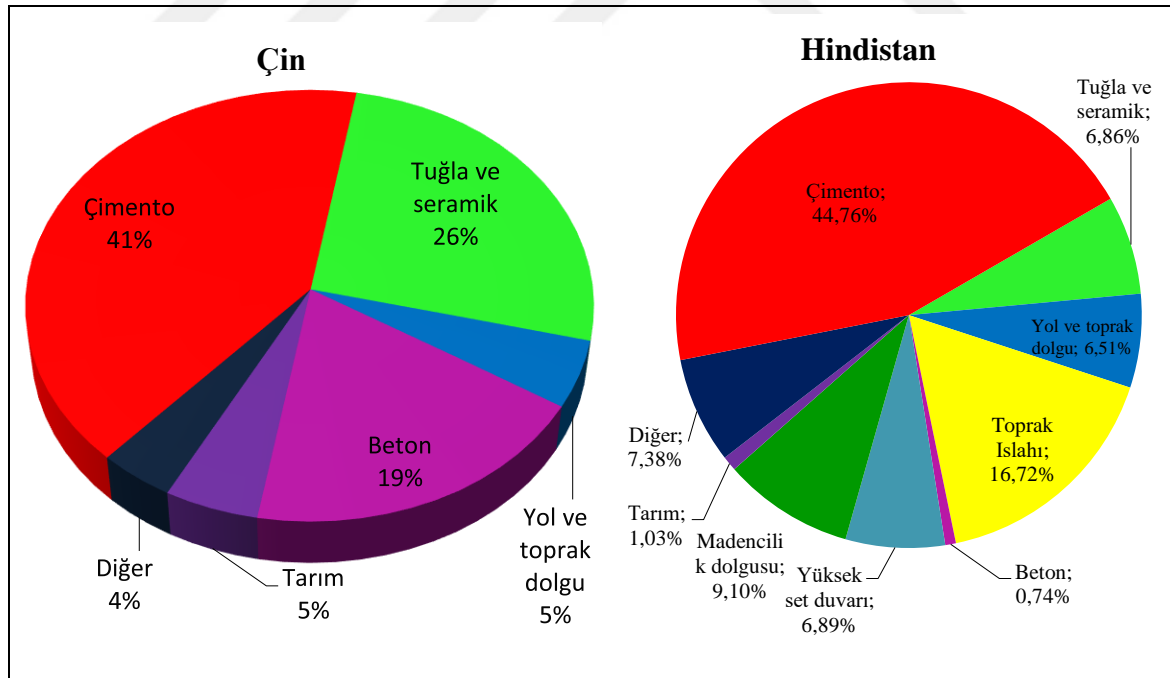
Çevresel açıdan sakıncalı olan uçucu küllerin, çeşitli sektörlerde kullanılması için son 30 yılda birçok araştırma yapılmıştır (Dwivedi and Jain, 2014). Bu araştırmalar sonucunda uçucu küllerin kullanım alanları olarak yüksek, orta ve düşük teknolojik uygulamalar olarak 3 sınıfa ayrılmıştır. Yüksek teknolojik uygulamalar için uçucu küller geri dönüşüm malzemesi, farklı bileşime sahip malzemelerde dolgu ve saf mineral olarak değerlendirilmiştir. Orta teknolojik uygulamalarda, hafif agrega, düşük ve yüksek dayanımlı beton, kaldırım betonu, hafif uçucu küllü beton, yüksek dayanıma sahip ön gerilmeli beton, tuğla, blok ve parke taşı, yüksek dayanıma sahip seramik üretiminde, asfalt karışımında dolgu ve atık su stabilizasyonunda kullanılmıştır. Düşük teknolojik uygulamalar ise, dolgu, temel ve alt temel, yüzey stabilizasyonu, yüzey örtüsü, toprak iyileştirme ve arazi ıslahı, akıcı kül çamuru ve su kirlilik kontrolü için kullanılmıştır (Naik, 1993).

Dünyada, termik santrallerde yakılan kömür sonucu açığa çıkan uçucu küllerin % 65'den fazlası yeryüzünde atık olarak depolanmaktadır. Açığa çıkan bu uçucu kül ve kullanım miktarı ülkelere göre değişmektedir (Tablo 1.2).

Tablo 1.2. Ülkelere göre uçucu kül miktarı ve kullanım alanları (Alam ve Akhtar, 2011).

Ülkeler	Yıllık Üretim Miktarı, Milyon ton	Kullanım Oranı, %
Hindistan	112	38
Çin	100	45
Amerika Bileşik Devletleri	75	65
Almanya	40	85
İngiltere	15	50
Avustralya	10	85
Kanada	6	75
Fransa	3	85
Danimarka	2	100
İtalya	2	100
Hollanda	2	100
Türkiye	18	3

Bu ülkeler arasında en çok iki ülkede açığa çıkan uçucu küllerin kullanım alanları Şekil 1.2’de verilmiştir.

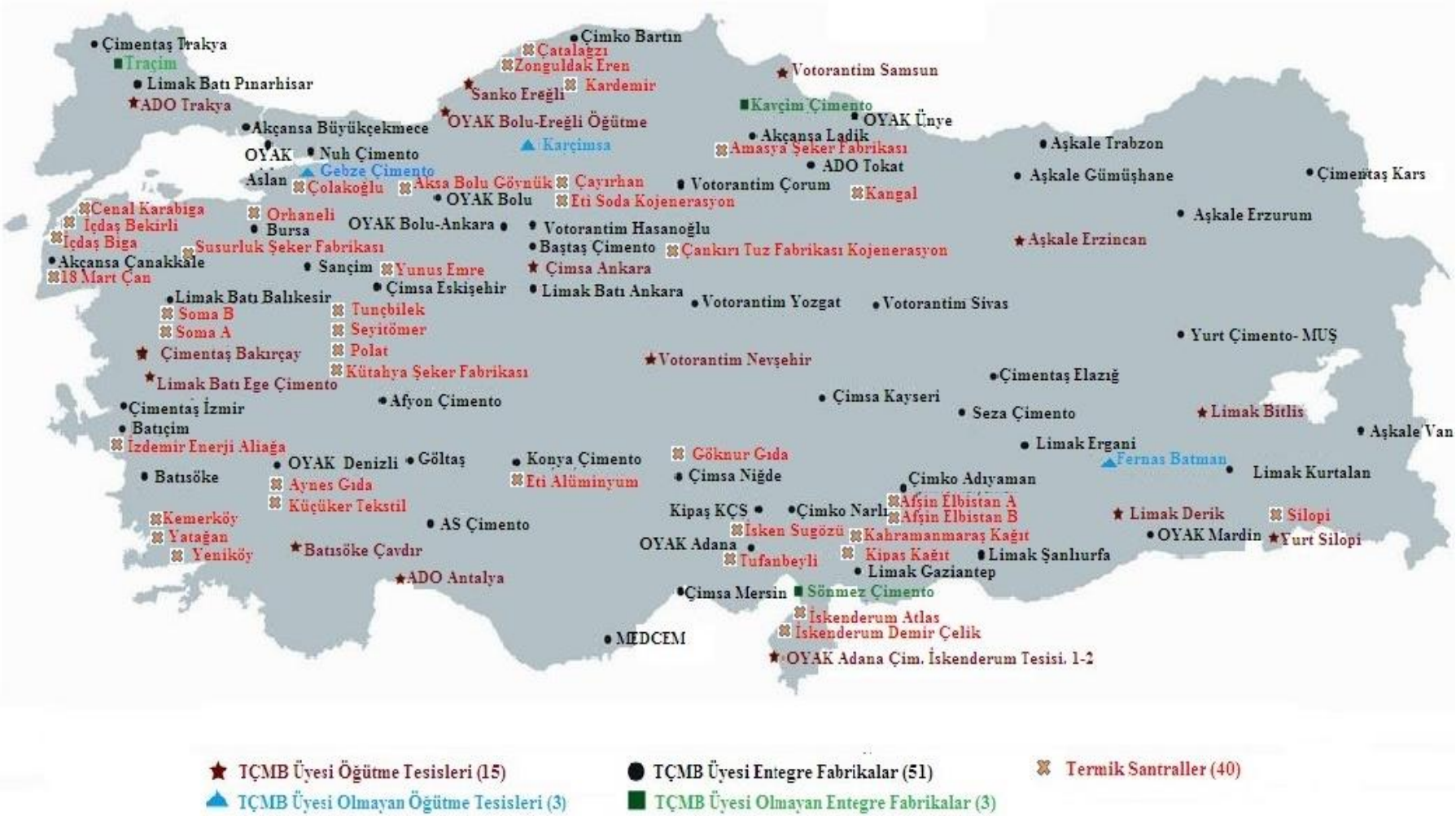


Şekil 1.2. Çin’de ve Hindistan’da uçucu küllerin kullanım alanları (Yao vd., 2015).

Uçucu küllerin farklı endüstri ve inşaat alanlarında hammadde olarak kullanılması sonucu sağladığı faydalar detaylı bir şekilde ele alınarak incelenmiştir. Sonuç olarak uçucu

külleri farklı alanlarda değerlendirilmesi bir yandan atık miktarı azalırken diğer yandan yararlı ürün miktarı artmaktadır.

Birçok ülkede uçucu küllerin en yaygın kullanım bulduğu alanlar çimento ve beton sanayisinden oluşmuştur. Türkiye’de özellikle yılda yaklaşık 18 milyon ton uçucu kül açığa çıkmakta iken bu rakam 2020 yılında yıllık 50 milyon tonu geçmesi beklenmektedir (Görhan vd., 2008). Açığa çıkan bu atığın miktarı gün geçtikçe yüksek oranlara doğru artış göstermektedir. Çıkan atık birçok ülkede olduğu gibi Türkiye’de de büyük oranlarda çimento bileşiminde kullanılırsa ülke ekonomisine katkısı daha fazla olacaktır. Ülkemizde uçucu küllerin yaklaşık % 2-3’lük bir kısmı çimento ve beton bileşiminde kullanılmaktadır (Kaplan ve Gültekin, 2010). Bu oranı ülkelerin aldığı farklı çözümlerle arttırılması mümkün olmaktadır. Örneğin, Türkiye’de 2018 yılında üretilen çimento miktarı 72,5 milyon ton değerinde hesaplanmıştır (TCMB, 2018). Bu miktarın tamamı doğal kaynaklardan değilde uçucu kül gibi çimento bileşiminde kullanılabilen alternatif kaynaklardan karşılanması zorunluluk ya da teşvik edici hale getirilmesi uçucu küllerin kullanım miktarını arttıracaktır. Özellikle uçucu küllerin açığa çıktığı termik santrallere yakın olarak işletilen çimento fabrikalarında değerlendirilmesi her iki işletme açısından da karşılıklı birçok fayda sağlayacaktır. Şekil 1.3’de verildiği gibi ülkemizde bulunan çimento fabrikaları ve termik santraller uçucu külün çimento fabrikasına taşıma esnasında maliyetini düşürecek mesafelerde olduğunu göstermektedir. Bu haritada özellikle şeker ve tuz fabrikaları üretim boyunca kendi enerjilerini karşılarken kömür kullanmakta ve uçucu kül açığa çıkmaktadır. Bu fabrikalara yakın çimento fabrikalarında uçucu külleri değerlendirmekle hem atık depolama sorununu çözmeye hem de çimento üretimi boyunca ekonomik, ucuz, kolay ve nitelikli malzeme temini sağlayacaktır. Bu sayede 21. yüzyılın en büyük sorunlarından olan çevre kirliliği azaltılacak, atık miktarı düşürülecek ve daha ucuz çimento üretimi sağlanacaktır.



Şekil 1.3. Çimento fabrikaları ve termik santraller (Köleli, 2015'den değiştirilmiştir).

1.3.1.1. Uçucu Küllerin Çimento Üretiminde Kullanımı

Türkiye çimento üretimi açısından dünyadaki ilk 10 ülke arasında yer almakta olup üretime bağlı olarak tüketim miktarı da her geçen gün artmaktadır. Bu artış çevresel sorunlarında beraberinde getirmektedir. Oluşan bu sorunların başında klinker üretimi esnasında kalsinasyon ve yanma olayı sonucu büyük oranda çevreye CO₂ gazı yayılmaktadır. Dünyadaki CO₂ gazının % 5 çimento üretimi sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu gazın oluşturduğu çevresel sorunlarla baş etmek için çimento üretimi sırasında klinker miktarını azaltmak gereklidir. Klinker miktarıda çimento bileşimine yakın alternatif malzemelerin kullanımı ile mümkün olmaktadır. Avrupa’da çimento üretimin yaklaşık % 90’ı çimentonun bileşenlerini oluşturan (klinker+ alçı taşı+ mineral katkıları) malzemeler değirmende beraber öğütülerek ya da öğütülmeden direkt olarak katkılı çimento olarak kullanılırken, Türkiye’de ise üretilen çimentoların yarısından fazlası CEM I (katkısız) bileşimine sahip çimentolardan oluşmaktadır. Çimento üretiminde uçucu küllerin kullanımı aşağıdaki gibidir (Topçu ve Karakurt, 2007);

- Çimento bileşimini oluşturan malzemelerin yerine alternatif hammadde
- Ham maddelere ilaveten katkı malzemesi olarak
- Çimentoya belli oranlarda ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Çimento içerisinde uçucu küller hammadde olarak, çimentoyu oluşturan kil ve kalker gibi mineraller ile karıştırılarak değirmende beraber öğütülmektedir. Daha sonra bu malzemeler ile puzolanik portland çimentosu üretilmektedir. Ancak termik santrallerde yakılan kömür öğütülerek kullanıldığında açığa çıkan uçucu küllerin her zaman çimento bileşiminde kullanılması için öğütmeye gerek kalmamaktadır. Öğütme işlemine girmeden uçucu küllerin fırına verilerek kullanılması ile doğrudan öğütme enerjisinden tasarruf etmeye katkı sağlamaktadır. Uçucu küller çimento içerisinde farklı şekillerde kullanılması sonucu üretilen katkılı çimentolarda düşük miktarda enerji tüketilmektedir. Ayrıca uçucu kül katkısı ile daha düşük maliyette çimento üretilmektedir. Uçucu kül katkısı ile çimento üretilmesi sonucu enerji ve maliyet açısından tasarruf sağlamak ülke ekonomisinde büyük katkı sağlamaktadır (Berktaş, 2007; Öksüz, 2006; Tiwari, 2016).

Uçucu küllerin çimento üretiminde kullanılması ile çimento üretimine bağlı hammadde kaynaklarının korunması enerji tüketimi ve CO₂ miktarı azalacağı için küresel ısınma en aza indirilmektedir. Örneğin çimento üretiminde her % 1 oranında puzolanik katkının kullanılması ile çimento maliyetinde 0,5’lik bir düşüş sağlanmaktadır (Felekoğlu,

2014). Çimento sektöründe, ön ısıtıcı, ön kalsinasyonlu (oksit bileşenleri elde etmek amacıyla sıcaklığın etkisiyle karbonat ve hidratların parçalanmasıdır) fırın sistemlerinin yanı sıra en önemli gelişmeler öğütme sistemlerinde olmuştur. Teknolojik gelişmelerin hemen hemen tamamı enerjinin etkin kullanımına yönelik olmuştur. Bilindiği gibi, çimento üretiminde kullanılan toplam elektrik enerjisinin % 40'ından fazlası öğütme işlemlerinde harcanmaktadır. Bu nedenle, yeni öğütücüler ve separatörler tasarlanmış ve kullanılmaya başlanmıştır. Öte yandan tüm dünyada çimento içerisinde daha fazla mineral katkı kullanılması yönünde artan bir eğilim bulunmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, uçucu küllerin çimentoda kullanılması ile (Atakay, 2006);

- Öğütme enerjisinde tasarruf
- Klinkerizasyon enerjisinde tasarruf
- Kurutma enerjisinde tasarruf
- Ürün çeşitliliği sağlamak ve arttırmak
- Çevre dostu çabaları ve faaliyetleri arttırmak
- Elde edilecek yeni malzemelerin üstün özellikleri bakımından faydalı olması sağlanacaktır.

1.3.1.2. Uçucu Küllerin Beton Üretiminde Kullanımı

Çimento üretiminden sonra uçucu küllerin en yaygın kullanım alanlarından biri beton üretiminden oluşmaktadır. Beton üretiminde uçucu küller, normal, hafif ya da hazır beton üretiminde mineral katkı ve ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır. Beton üretiminde uçucu kül kullanılması birçok avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlarının başında dayanımı, dayanıklılığı ve işlenebilirliği arttırması gelmektedir. Bunların yanında betonun aşınma direncini, sülfat ve klor iyonuna karşı direnci, donatı korozyonuna karşı direnç, hidratasyon ısısını düşürdüğü için kütle baraj yapımlarında kullanılması ile betonun performansını ve ömrünün uzamasında büyük etkisi vardır (Yıldırım, 2007; Camões vd., 2002). Uçucu küllerin beton içerisinde kullanımı ile sağladığı genel faydalar aşağıda verilmiştir (Reddy vd., 2016);

- Terlemeyi azaltmakta
- Priz süresini geciktirmekte
- İşlenebilirliği arttırmakta
- Plastik özelliğe sahip betonlarda ayrışmayı azaltmakta

- Kuruma çatlakları ve permabiliteyi azaltmakta
- Hidratasyon ısısını düşürmekte

Malhotra and Mehta (2005) çalışmalarında uçucu küllerin betonda kullanılması ile betonun hangi özellikleri üzerine ne gibi etkileri olduğunu verilen Tablo 1.3’de ifade etmişlerdir.

Tablo 1.3. Uçucu küllerin beton üzerinde etkileri (Malhotra and Mehta, 2005).

Beton Özellikleri	Uçucu küllerin etkileri
Akıcılık/ Pompalanma	Daha kolay
İşlenebilirlik	Daha kolay
Terleme	Yok ya da çok az
Yüzey düzeltilbilirliği	Daha hızlı
Priz Süresi	2 saate kadar yavaş
Erken Dayanım (7 güne kadar)	Daha düşük ancak artabilir
Uzun dayanım (90 ve üzeri gün)	Daha yüksek
Çatlak Direnci <ul style="list-style-type: none"> • Plastik büzülme • Termal büzülme • Kuruma büzülmesi 	<ul style="list-style-type: none"> • Daha Yüksek • Daha düşük • Daha düşük
Klor iyonu geçişi dayanımı	Çok yüksek (90 gün sonra)
Elektrik direnci	Çok yüksek
Dayanıklılık <ul style="list-style-type: none"> • Sülfata karşı direnci • Alkali agrega direnci • Korozyona karşı direnç 	<ul style="list-style-type: none"> • Daha Yüksek • Yüksek • Yüksek
Aşınma Direnci Dayanıklılık sınırı	<ul style="list-style-type: none"> • Benzer • Benzer
Maliyet <ul style="list-style-type: none"> • Malzeme • İş gücü • Yaşam döngüsü 	<ul style="list-style-type: none"> • Daha düşük • Benzer • Çok Düşük
CO ₂ emisyonu ile ilgili çevre dostu	Çok yüksek

Uçucu küllerin birçok özelliği sayesinde, beton üretiminde kullanımı ile betonun özelliklerini iyileştirmeye katkı sağlamaktadır. İnce tane boyutuna sahip uçucu kül katkılı betonlarda yüzeyin düzgün, birim ağırlıklarının betona göre düşük olması ile betonun birim ağırlığını ve hidratasyon ısısını düşürdüğünden, termik rötre ve çatlak oluşumunu azalttığı görülmüştür. Küresel tanelerden oluşmuş uçucu kül katkılı betonlarda, su ihtiyacını arttırmadığından düşük su-çimento oranı ile betonda istenilen işlenebilirlik durumunu oluşturmaya katkı sağlamaktadır. Uçucu külün beton içerisinde kullanılması ile betonun bileşenleri ile uçucu kül arasında oluşan kimyasal reaksiyona bağlı olarak sulu ortamda kireci bağladıkları için betona zarar verebilecek dış etkilere karşı daha dayanıklı olmasına

katkı sağladığı gibi su geçirimsizliğinde azaltmaya etki etmektedir. Uçucu küllerin puzolanik özellik göstermesine bağlı olarak betonda kullanıldığında, betonun ileriki yaşlarda dayanım değerlerini arttırmaktadır. Betonun dayanım özelliğinin yanında dayanıklılık özelliğide çok önemlidir. Uçucu küllerin betonun dayanıklılık özelliği üzerine etkisi, betonda oluşabilecek mikro çatlak yapısını azalttığı, daha az çimento ile daha yüksek dayanımlı beton üretilmesine katkı sağlamaktadır (Topçu ve Canbaz, 2001).

1.3.2. Uçucu Küllerin Çevresel Etkileri

Gelişmekte olan ülkeler büyüye bilmeleri için enerji üretimine ve tüketimine ihtiyaçları vardır. Artan enerji tüketimi sanayileşme ile birlikte çeşitli atıkların oluşmasına yol açmıştır. 21. yüzyılda en büyük çevresel problem fosil kaynaklı yakıtların kullanılması ile üretilen enerji ve bunun sonucu atmosferde oluşan küresel ısınma olayıdır. Fosil kaynaklı enerjilerin etkilerinin azaltılması ancak yenilenebilir farklı enerji kaynaklarının kullanımı ile mümkün olmaktadır.

Türkiye’de sosyal ve ekonomik gelişmeler sonucunda enerjiye olan ihtiyaç hızlı bir şekilde artmaktadır. Türkiye petrol, doğal gaz gibi enerji kaynakları bakımından fakir bir ülke olup bu kaynaklar bakımından yabancı ülkelere bağımlıdır. Türkiye enerji ihtiyacını düşük kaliteli linyit kömürleri ve hidroelektrik kaynaklarından elde etmektedir. Ancak linyitin yakılması ile cüruf ve uçucu kül gibi atık maddeler oluşmaktadır. Oluşan bu atık ürünler hem çevresel hem de toplumsal sorunların oluşmasına yol açmaktadır (Sözen vd.,2010; Sahzabia vd. 2017).

Son yıllarda hızlı sanayileşme ve kentleşme çevresel anlamda da birçok problemin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Özellikle, atık malzemelerin üretimi ve yönetimi nedeniyle çevre kirliliği ciddi bir sorun haline geldiğinden acil olarak gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Atık olarak kabul edilen geniş bir malzeme yelpazesi, dünya çapında büyük miktarlarda deşarj edilmektedir. Bu tür atıkların bertarafı ve boşaltılması, hem toprak hem de yeraltı ve yüzey suyunun bozulmasına neden olmaktadır. Ayrıca atık bertarafı için kullanılabilir alan miktarı da sınırlıdır. Uçucu kül de atık bir ürün olup termik santrallerde kömür yakılması sonucu oluşmaktadır. Dünyada her gün birkaç milyon ton uçucu kül üretilmektedir. Açığa çıkan bu atık birçok ülkede farklı kullanım alanlarında değerlendirilmektedir. Ancak bunun bir kısmı hala atık bir ürün olarak çevrede depolanmaktadır (Sahu and Jayaram, 2000).

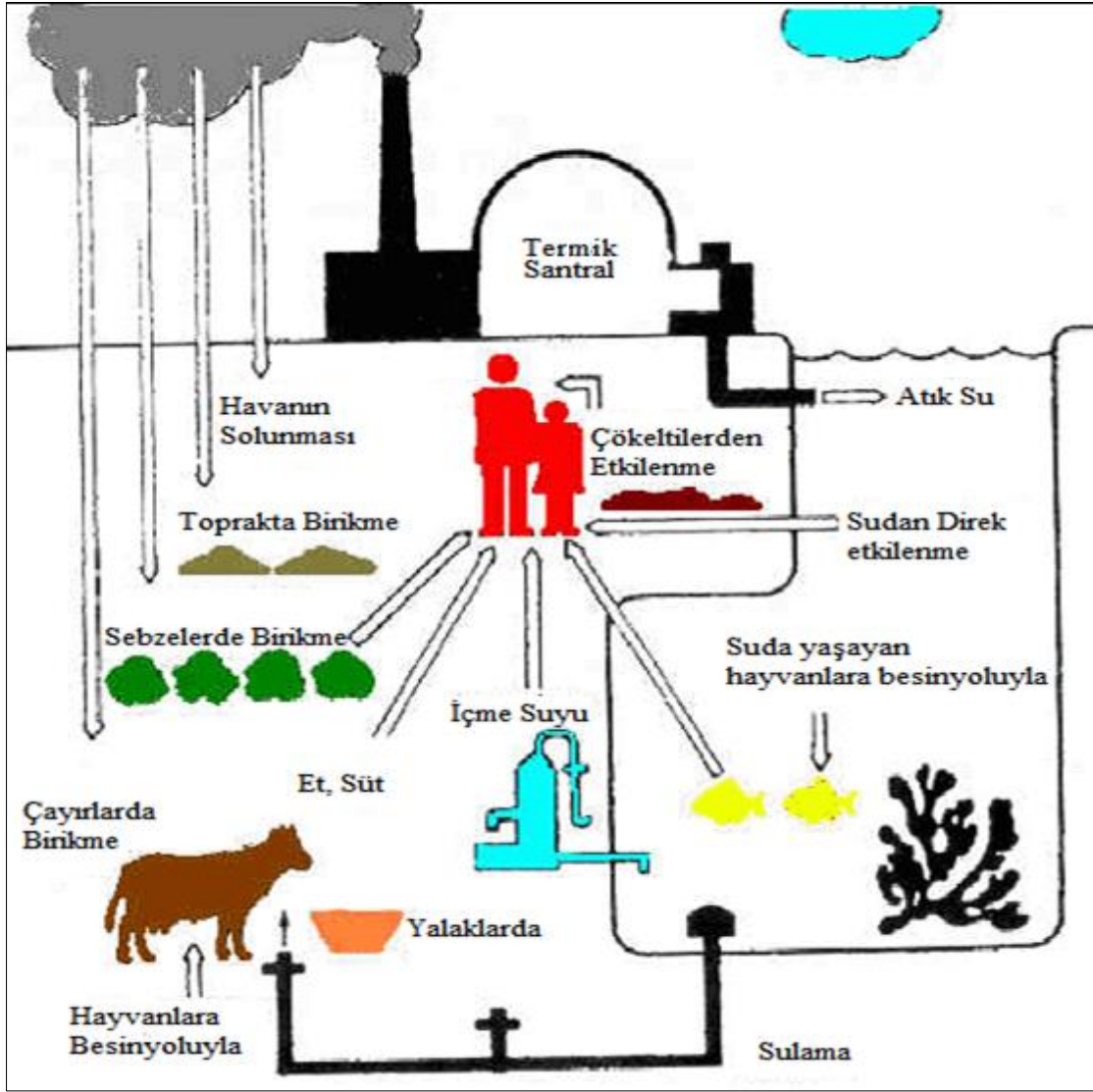
Uçucu küller, üretilen toplam atık miktarının yaklaşık yüzde 70 gibi büyük bir kısmını oluşturmaktadır. İçerisinde arsenik, civa, kurşun, krom vb. gibi ağır metaller içermektedir. Bunlar hava, su ve toprak yoluyla insanlara, bitkilere ve hayvanlara geçmektedir. Atmosfere salınan uçucu küller, siklonlar, torba filtre, elektrostatik çöktürücüler vb. gibi kül emisyon kontrol cihazları sayesinde toplanmaktadır. Her ne kadar farklı yöntemlerle uçucu küllerin toplanması sağlansa da çevreye yayılımında bir miktarda azalma göstermesine rağmen yinede hava kirliliğinin önüne tamamen geçilememektedir. Termik santralin siklonlardan veya elektrostatik çöktürücüsünden toplanan uçucu kül, normal olarak ıslak ve kuru yöntemlerle bertaraf edilmektedir. Islak yöntemlerde geçici havuzlama genellikle yerinde yapılmaktadır. Kurumuş külü daha sonra dolgu malzemesi olarak yerleştirilirken, kuru yöntemlerde düşük dolgu alanlarına doğrudan dolum uygulanmaktadır. Böylelikle, bu malzemenin büyük miktarları, su ve toprak çevresi ile giderek daha fazla temas geçmektedir (Fulekar, M.H. and Dave, J. M., 1986).

Kaplan ve Gültekin (2010) uçucu küllerin çevre ve toplum üzerinde oluşturduğu zararlı etkilerini değerlendirmişlerdir (Tablo 1.4).

Tablo 1.4. Uçucu küllerin çevresel ve toplumsal zararları (Kaplan ve Gültekin, 2010).

Uçucu Küllerin Zararlı Etkileri	Açıklama
Çevre üzerinde oluşturduğu etkiler	<ul style="list-style-type: none"> • Doğal çevrenin bozulması • Tarımsal alanların zarar görmesi • Su kaynaklarının zarar görmesi • Besin zincirine karışması • Radyoaktif kirlenme
Toplum üzerinde oluşturduğu etkiler	<ul style="list-style-type: none"> • Bedensel etkiler • Merkezi sinir sistemi bozuklukları • Solunum yolu hastalıkları • Astım ve kanser • Cilt hastalıkları • Kalp hastalıkları • Zihinsel Etkiler • Öğrenme yeteneğinde azalma

Bakan (2008) ve Türkmenoğlu (2010) çalışmalarında uçucu küllerin çevreye verdiği zararları, hava kirliliği, toprak kirliliği, su kirliliği ve canlılar üzerinde yaptığı etkiler şeklinde ele alarak detaylı bir şekilde incelemişlerdir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Uçucu küllerin hava, toprak ve su kirliliği üzerine etkileri (URL 2).

1.3.2.1. Uçucu Küllerin Hava Kirliliği Üzerine Etkisi

Uçucu küller çevrede biriken kül yağınlarından ve bacalardan radyoaktif madde yayması ile hava kirliliğine neden olmaktadır. Yayılan bu maddeleri soluyan canlılar (bitki, hayvan ve insan) üzerinde birçok olumsuz etki yaratmaktadır. Kullanılan yakıtla bağlı olarak değişen oranlarda çıkan gaz ve partikül maddeler uzun zaman boyunca havada asılı kalmaları nedeniyle bronşit, anfiyem, damar hastalıkları gibi hastalıkların yanında insan ölümlerine de sebebiyet vermektedir. Ayrıca tarım ve orman üzerinde de olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Bacalardan atılan kükürt ve azot oksitler, rüzgârla birlikte ortalama 2 ila 7 gün içerisinde atmosfere ulaşırlar. SO_2 ve NO_x gazları asit yağmurlarının oluşumunda

birinci derecede sorumludur. Termik santral küllerinin toplandığı alanda oluşan radon gazı havaya ulaşmaktadır. Küllerin üzeri toprakla örtülse bile oluşan radon gazı toprağın gözeneklerinden geçerek havaya karışması ile yaklaşık 4 gün içerisinde polonyuma ve aktif kurşuna dönüşebilmektedir (Bakan, 2008 ve Türkmenoğlu, 2010).

1.3.2.2. Uçucu Küllerin Toprak Kirliliği Üzerine Etkisi

Toprak üzerinde uçucu küller depolandığında toprağın çoraklaşmasına ve yeşil alanların azalmasına neden olmaktadır. Bitki örtüsünün bozulması ile ürün kalitesi ve verimliliğinde de düşüş olmasına sebep olmaktadır. Bunun yanında santralde kullanılan suların toprağa deşarjı, asit yağmurları, uçucu küllerin toprak üzerinde birikmesi gibi birçok kavram yine toprak kirliliğine ve dolaylı olarak verim düşmesi ve ürün kalitesinin bozulmasına sebep olmaktadır (Bakan, 2008 ve Türkmenoğlu, 2010).

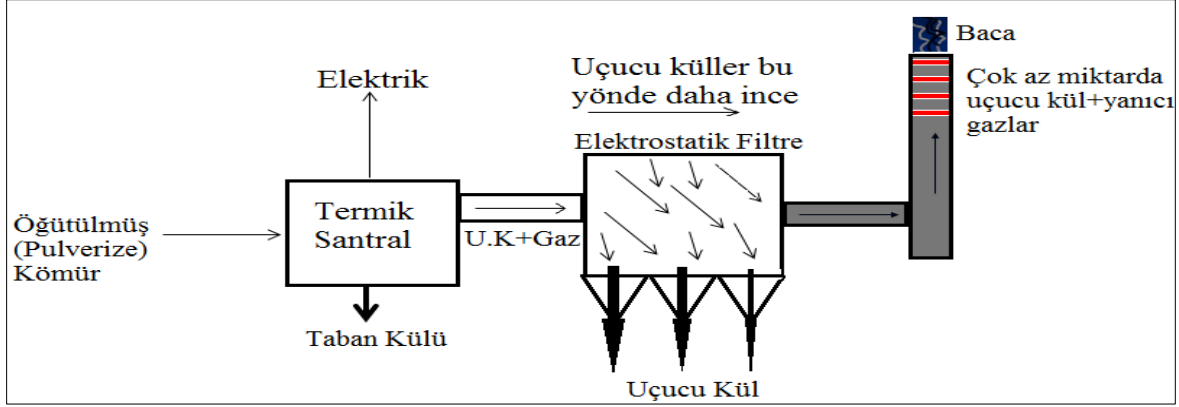
1.3.2.3. Uçucu Küllerin Su Kirliliği Üzerine Etkisi

Termik santrallerde su, soğutma ve temizleme işlerinde önemli ölçüde tüketilmektedir. Kullanılan bu suyun alıcı ortama deşarjı sonucu ortamdaki sıcaklık dengesinin bozulmasına neden olmaktadır. Sıcaklık farkındaki bu değişikliğe bağlı olarak canlı faaliyetleri üzerine kısıtlayıcı etki yapmaktadır. Bunun yanında kullanılan soğutma sularının alıcı ortama verilmeden önce arıtılması sırasında (geçici sertlik giderimi, çöktürme) kullanılan kimyasal maddelerde suyun verildiği ortamlarda kirliliğe neden olmaktadır. Baca gazından çıkan zararlı maddelerin yarattığı asit yağmurlarının, Fe, Zn, Cu, Pb vb. ağır metaller yağmur sularıyla yıkanma gibi durumlarla yer altı suyuna ve içme suyu kaynaklarına ulaşması ile ekolojik dengenin bozulmasına neden olmaktadır (Bakan, 2008 ve Türkmenoğlu, 2010).

1.3.3. Uçucu Küllerin Elde Edilişi

Son yıllarda kömürün yanması sonucu oluşan uçucu küller bünyelerinde bulundurduğu toksit elementlerden dolayı elektro filtreler yardımıyla bacalardan direkt çevreye bırakılmayıp toplanmaktadır (Çavuşoğlu, 2008). Uçucu küllerin bacalardan

toplanması için farklı yöntemler olmasına rağmen en yaygın olarak elektrostatik filtreler ve siklonlar kullanılmaktadır (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Uçucu kül üretim modeli (URL 3).

Bu yöntemlerden siklonlar, uçucu küllerin tane boyutunun büyük olduğu, elektrostatik filtreler ise küçük olduğu durumlarda kullanılmaktadırlar. Siklonlarla uçucu küller mekanik olarak toplanmaktadır. Bu toplayıcılar, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle uçucu kül tanelerini gazdan ayrılması prensibi ile çalışmaktadır. Siklona belli bir açı ile hava akımının girmesi sonucunda santrifüj hareketini ile parçacıklar siklonun çeperlerinde toplanarak alt çıkıştan çıkmaktadır. Elektrostatik filtreler, toz parçacıklarının elektrotlara yapışması ile elektrostatik yükü toplayarak baca gazı içerisindeki tozu çöktürme prensibi ile çalışmaktadır. Bunun yanında yüksek oranda uçucu kül toplama verimliliğine, daha az gereksinimi olmasından ekonomik ve uzun ömürlü çalışma performansına sahiptir (White, 1977). Diğer yöntemlerden olan nemlendirme yöntemi, su ile ıslatılarak çöktürülmeye dayanmaktadır. Ancak bu yöntemin dezavantajları çok su tüketmesi, toplanan küllerin değerlendirilememesi ve yüksek maliyete sahip olması ile uygun değildir. Filtreler, ultrasonik çöktürme ve kontrol prosesleri gibi yöntemlerde ise çok küçük tane boyutuna (1 μ m) sahip uçucu kül malzemelerinin toplanması sağlanmaktadır. Bu yöntemlerle bacalardan kaçan uçucu kül miktarının büyük bir kısmı tutulduğundan çevre kirliliğini en aza indirilmektedir. Ancak bu yöntemlerde yatırım ve işletme maliyetinin çok yüksek olması tercih edilmeme sebepleri arasında yer almaktadır (Erdemiş, 2001; Kölemen, 2012).

1.3.4. Uçucu Küllerin Özellikleri

Uçucu küllerin farklı özelliklere sahip olması termik santrallerde yakılan kömürün özelliklerine ve yakma yöntemine bağlı olarak değişmektedir (Anuk, 2004). Bunların yanında,

- Kömürün çeşidi (linyit, taşkömürü) ve değişkenliği,
- Kömürün incelik derecesi,
- Kömür yakılan kazanın cinsi,
- Yakma sıcaklığı,
- Diğer işletme parametreleri,
- Toplanma sistemlerinin işleyişine ve özellikleri
- İşletme yapılacak termik santral çevresinin korunması amacı ile kömüre ilave edilen katkı maddeleri ve bu maddelerin zamanla farklı etkileşimler içerisinde olması ile gösterdiği özellikler,

gibi faktörler uçucu küllerin farklı özellik göstermesinde etkin rol oynamaktadır (Güler vd., 2005).

Uçucu küllerin farklı alanlarda kullanılabilmesi için onların fiziksel, kimyasal, mineralojik, morfolojik, mekanik ve puzolanik (aktivite derecesi) özelliklerinin belirlenmesi gereklidir (Ahmaruzzaman, 2010).

1.3.4.1. Fiziksel Özellikleri

Uçucu küllerin fiziksel özellikleri, farklı renk tonları, tane boyutu ve şekli (morfolojisi), özgül yüzey alanı ya da inceliği ve yoğunluk gibi özelliklerden oluşmuştur.

1.3.4.1.1. Rengi

Uçucu küller genel olarak kahverengiden koyu griye kadar farklı renklere sahip olabilir. Uçucu küllerin kahverenkte olması içerisinde bulundurduğu demir bileşeninden ileri gelmektedir. Uçucu küller çimento ile kıyaslandığında ise koyu renkte, yumuşak ve çok ufak tane boyutuna sahiptir (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Çimento ve uçucu küller; a) çimento, b) C tipi, c) F tipi (URL 4 ve URL 5).

Uçucu küllerin farklı renlerde olmasının en büyük nedenleri; kömürün cinsine ve yanma özelliğine bağlıdır. Linyit kömüründen elde edilen uçucu küller taş kömürüne kıyasla daha koyu renktedir. Ayrıca yanma olayının iyi olduğu durumda uçucu kül yanmamış küllere nazaran daha açık renktedir. Bunun nedeni yanma olayı tam gerçekleşmediği durumlarda yanmamış karbon içeriğinin yüksek olmasından dolayı uçucu küle siyah renk vermektedir. Ayrıca yüksek kalsiyum içeriğine sahip uçucu küller daha açık renk tonlarına sahip olduğu, organik madde içeriği daha yüksek olan uçucu küller ise daha koyu renk tonlarında olduğu görülmüştür. (Gürbüz, 2009; Dhamsaniya, 2011).

1.3.4.1.2. Özgül Yüzey Alanı (Blaine) ve İnceliği

Uçucu küllerin özgül yüzey alanı ve inceliği TS EN 196-6 standardında ifade edilen deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmektedir. Bu standartta özgül yüzey alanı (blaine), hava geçirgenlik yöntemi (Blain) ile incelik değeri ise hava jetiyle eleme yöntemi sayesinde belirlenmektedir.

TS EN 196-6 standardında uçucu küllerin özgül yüzey alanı (blaine), bir gram malzemeyi oluşturan tüm taneciklerinin kapladığı yüzey alanı olarak ifade edilmekte olup cm^2/gr şeklinde gösterilmektedir. ASTM C 204 standardına göre ise özgül yüzey alanı (blaine), malzeme içerisinde bulunan parçacıkların hava akımı ile sıkıştırma esasına dayanmaktadır. Özgül yüzey alanı (blaine) sıkıştırılmış bir malzeme yatağından geçen sabit hava miktarının geçtiği sürenin gözlenmesi ile cihazda otomatik olarak hesap edilmek şartı ile belirlenmektedir. Bir malzemenin, örneğin çimentonun özgül yüzeyi ne kadar büyükse çimento o kadar ince öğütülmüş demektir. Bu deney metodu mutlak olmaktan

ziyade mukayese metodudur. Bu nedenle özgül yüzeyi bilinen bir numune ile cihazın kalibre edilmesi gerekir.

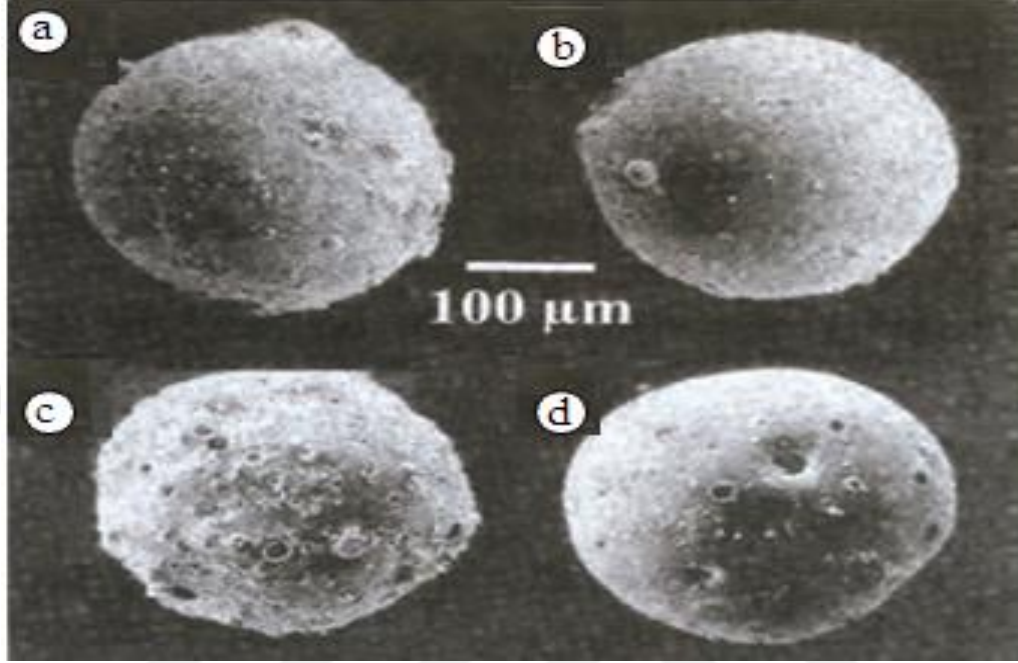
Uçucu küllerin inceliği elek analizi ile belirlenmektedir. Eleme işlemi kuru ve ıslak olarak yapılmaktadır. TS EN 196-6 standardına göre uçucu küllerin inceliği kuru durumda, hava jetiyle eleme yöntemine göre belirlenmektedir. Bu yöntem, taneciklerin elek üzerindeki kalıntısının ölçümü esasına dayanmakta ve 2,0 mm'lik elekten geçen tane boyutuna sahip uçucu küller için kullanıma uygundur. Ayrıca çok ince tanecik yığılmasında bulunan taneciklerin boyut dağılımının belirlenmesinde de kullanılmaktadır. Bu yöntemde değişik göz açıklıklı elekler mevcuttur. ASTM C 430 standardına göre uçucu küllerin incelik değeri, ıslak haldeki uçucu küllerin 45 µm boyutuna sahip elekten elenmesi sonucu elek üzerinde kalan malzeme miktarı incelik değerinin bir göstergesi olarak ifade edilmektedir. Bu iki yöntemle uçucu küllerin incelik değeri sayısal olarak ortaya konulmaktadır. İncelik değeri uçucu küller için puzolanik aktiviteyi gösteren önemli bir ölçüttür. Çünkü puzolanik aktivite uçucu kül tanesinin yüzeyinde başlar. İncelik arttırılırsa buna bağlı olarak puzolanik aktivite de artmaktadır. Uçucu küllerin özgül yüzey alanı (blaine) değeri 1800-5000 cm²/gr arasında değişmekle birlikte, ortalama 2800-3800 cm²/gr dolayındadır. Uçucu külün özgül yüzey alanı malzemenin kalsiyum hidroksit ile tepkime vermeye hazır olduğu anlamına gelir. Ayrıca uçucu kül inceliğinin sayesinde betonda agrega-çimento hamuru ara yüzeyinin özelliklerinin iyileştirilmesi için de önemlidir. Uçucu küllerin kimyasal bileşimi incelik değerini etkilemektedir. Yüksek kalsiyumlu uçucu küller düşük kalsiyumlu uçucu küllere göre daha incedir (Dhamsaniya, 2011).

1.3.4.1.3. Tane Boyutu ve Şekli (Morfolojisi)

Uçucu küllerin tane boyutu, termik santrallerde yakılan kömürün cinsine, öğütme miktarına ve bacalardan toplanma derecesine ve mekanizmasına bağlıdır. Taş kömürüne ait uçucu küllerin tane boyutu linyit kömürü göre daha incedir. Ayrıca elektro filtrelerle toplanan uçucu küller siklonlarla toplananlara göre daha incedir. Boyutlarının en geniş aralığı 0,5 ile 200 mikron arasında değişmektedir. Ancak portland çimentosunun parçacık boyutuna göre bazen daha iri ya da ince tane boyutuna sahip olabilirler (Şekil 1.7).

Tane şekli ve özellikleri, kömürün çeşidine ve öğütülme derecesine, üniform olmasına, yanma ortamındaki sıcaklık ve oksijen seviyesine, kül toplama sisteminin

çeşidine bağlı olarak değişmektedir. Uçucu küller çoğunlukla camsı ve gözenekli, içi dolu ya da süngerimsi küresel ve düzensiz şekilli parçacıklardan oluşmaktadır. (Ulubaş, 2000).



Şekil 1.7. Uçucu küllerin tane şekli, a) yüzeyinde sıvı damlalar olan küresel şekil, b) küresel şekilde camsı tanecik, c) düzensiz boşluklar içeren yüzey yapısına sahip tanecik, d) boşluklu yapıda küresel tanecik (Türker vd., 2009).

1.3.4.1.4. Yoğunluğu

Uçucu küllerin yoğunluk değeri mineralojik bileşimine, tane şekline ve incelik değerine göre değişmektedir. Mineralojik bileşen olarak kuvars, alimüna, demir ve karbon miktarı yoğunluk değeri üzerinde büyük etkisi vardır. Uçucu kül içerisinde demir elementi miktarı arttıkça yoğunluk değeri artarken, kuvars, alümina ve karbon içeriğinin artması ile yoğunluk değeri düşmektedir. Tane şekli olarak, içi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin yoğunluğu süngerimsi tane yapısına sahip uçucu küllere göre daha yüksektir. İncelik değerinin yoğunluk üzerinde etkisi ise uçucu küllerde öğütmeye ya da farklı fiziksel etkilere göre incelik değerinin arttırılması sonucu yoğunluk değerinde artmasına neden olmaktadır. Genel olarak uçucu küllerin yoğunluğu $2,2-2,7 \text{ gr/cm}^3$ arasında değişen değerler almaktadır (Özdemir, 2001).

1.3.4.2. Kimyasal Özellikleri

Uçucu külün kimyasal bileşimi yakılan kömürün jeolojik orijinine, kömürün yapısına, hazırlanmasına ve toz toplama gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Uçucu külün kimyasal bileşimi genel olarak alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyumdioksit (SiO_2), demir oksit (Fe_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO)’den oluşmuştur. Minör bileşen olarak MgO , SO_3 , alkali oksitler (Na_2O , K_2O) de bulunmaktadır. Eser bileşenler olarak titanyum, fosfor, mangan, molibden ve yanmamış karbon olup, uçucu küllerin kimyasal bileşiminde bulunan oksit bileşenlerin miktarı uçucu külün çeşidine göre değişmektedir (Tablo 1.5).

Tablo 1.5. Kömüre göre uçucu küllerinin kimyasal bileşimi (Ahmaruzzaman, 2010).

Bileşimi, %	Bitümlü kömür uçucu külü	Yarı bitümlü kömür uçucu külü	Linyit kömür uçucu külü
SiO_2	20-60	40-60	15-45
Al_2O_3	5-35	20-30	10-25
Fe_2O_3	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
Na_2O	0-4	0-2	0-6
K_2O	0-3	0-4	0-4
SO_3	0-4	0-2	0-10
K.K	0-15	0-3	0-5

Uçucu küller ASTM C 618-05 standardında SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO bileşenleri bakımından F ve C olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Bu iki sınıflandırmada uçucu küller farklı bağlayıcı ve puzolanik özelliğe sahiptir. C sınıfı uçucu küller linyitin yanmasından elde edilmiş olup, kalsiyum içeriği yüksek, F sınıfı uçucu küller antrasit ve bitümlü kömürün yanmasından elde edilmiş olup, kalsiyum içeriği daha düşüktür. C sınıfı uçucu küller F sınıfı uçucu küllere göre puzolanik özelliklerinin yanı sıra bir miktar bağlayıcı özelliğine de sahiptir. F sınıfı uçucu küllerde SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 miktarlarının toplamı % 70 ve üzerinde, CaO ise % 10’ nun altında iken, C sınıfı uçucu küllerde SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 % 50 ve üzerindedir, CaO ise % 10 ve üzerindedir. C sınıfı uçucu küllerde aktif bileşik, kalsiyum alumino silikat camı, F sınıfı uçucu küllerde ise aktif bileşik silisli camından oluşmuştur (Türker vd., 2009; Görhan vd., 2009).

ASTM C 618-05 standardına göre F ve C sınıfına ait uçucu küllerin yaklaşık olarak kimyasal bileşimleri Tablo 1.6'da verilmiştir.

Tablo 1.6. C ve F tipi uçucu küllerin kimyasal bileşimi (Öksüz, 2006).

Oksitler, %	C Sınıfı	F Sınıfı
SiO ₂	23,1 – 50,5	43,6 – 64,4
Al ₂ O ₃	13,3 – 21,8	19,6 – 30,1
Fe ₂ O ₃	3,7 – 22,5	3,8 – 30,1
CaO	11,5 – 29,0	0,7 – 6,7
MgO	1,5 – 7,5	0,9 – 1,7
Na ₂ O	0,4 – 1,9	0 – 2,8
Kızdırma Kaybı	0,3 – 1,9	0,4 – 7,2

Türkiye’de farklı termik santrallerden alınan uçucu küllerin kimyasal bileşimi Tablo 1.7’de verilmiştir.

Tablo 1.7. Farklı kimyasal bileşime sahip uçucu küller (Yıldırım, 2007).

Oksitler, %	Afşin Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan
SiO ₂	27,4	56,80	58,59	49,13
Al ₂ O ₃	12,8	24,10	21,89	15,04
Fe ₂ O ₃	5,5	6,80	9,31	8,25
S+A+F	45,7	87,70	89,79	72,42
CaO	47,0	1,40	4,43	13,2
MgO	2,5	2,40	1,41	4,76
Na ₂ O	(N+K) 0,3	(N+K) 3,0	0,24	2,20
K ₂ O	-	-	1,81	1,76
SO ₃	6,2	2,90	0,41	3,84

1.3.4.3. Mineralojik Özellikleri

Uçucu küller, amorf (kristalsız) ve kristalli olmak üzere iki farklı mineralojik yapıya sahiptirler. Mineralojik yapısındaki farklar, elde edildiği kömürün içerisinde bulunan minerallerin bileşiminden, kömürün yanmasına ve hazırlanma şekline göre değişmektedir.

Uçucu küllerin kimyasal bileşimi değiştikçe mineralojik bileşimi de değişmektedir. Uçucu küllerin mineralojik bileşimi X-Ray Diffraction (XRD) yönteminin kullanılması sonucu belirlenmektedir (Awang vd., 2012). Örneğin kimyasal bileşenleri bakımından farklı olan C ve F sınıfı uçucu küllerin içerisinde bulundukları mineraller bakımından

bir birinden çok farklıdır. C tipi (yüksek CaO) uçucu küller; kuvars, hematit (Fe_2O_3), anhidrit (CaSO_4), serbest kireç, C_3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), CS ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), C_2S ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), mellilit ($\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Al})(\text{AlSi})_2\text{O}_7$), merwinit ($\text{Ca}_3(\text{Mg})(\text{SiO}_4)_2$), kalsit, portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), trisülfoalümiat ($4\text{CaO} \cdot 3 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) ve mullit gibi mineraller ve camsı faz içermekte iken (Tablo 1.8), F tipi (düşük CaO) küller başta camsı faz ve minör olarak da kuvars (SiO_2), mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), manyetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3) içermektedir. Her iki külde de ortak olarak alkali feldispat grubu mineraller bulunmaktadır.

Farklı kimyasal ve mineralojik bileşime sahip düşük ve yüksek kireçli uçucu küllerin X-ışınları difraksiyon piklerinin camsı fazı karakterize eden durumları farklı bölgeler tarafından temsil edilmektedir. Bu bölgeler, düşük kireçli uçucu külde $22-27^\circ 2\theta$ ($\text{CuK}\alpha$) iken, yüksek kireçli külde ise $30-34^\circ 2\theta$ ($\text{CuK}\alpha$) ifade etmektedir. Silisli camsı fazın $22-34^\circ 2\theta$ arasında değişmesi, silisyum dioksit kristal örgü ağının (siliko tetrahedral), Al, Ca, Na gibi çeşitli kanyonlar ile modifiye edilmesinden kaynaklanmaktadır. Yüksek kireçli külde ise, saf silika camı, Ca ve Al iyonları bir araya gelmesi ile modifiye olmuştur. Aktif bileşenin içinde silisyumlu kalsiyum alüminat camsı fazının yanı sıra aktif kristalize fazlar (serbest kireç, anhidrit, kalsiyum alüminat gibi) yer almaktadır. Yüksek kireçli küldeki kalsiyum alüminosilikat camsı fazı su ile reaksiyona girerek bağlayıcı özellik kazanmaktadır. Düşük kireçli uçucu külde ise yüksek silisli camsı faz genellikle kalsiyum, alkali ve hidroksit ilavesi halinde, yavaş olarak reaksiyona girmektedir. Bu nedenle yüksek kireçli uçucu kül düşük kireçli uçucu küle göre daha az camsı faza sahip ancak daha reaktif olma özelliğine sahiptir. Yüksek kireçli külün camsı ve kristalize fazları, külün puzolanik özelliğinin yanı sıra, kısmen kendiliğinden bağlayıcı özellikte olmasında sağlamaktadır. Yüksek kireçli küllerdeki kristalize fazlar (anhidrit, serbest kireç gibi), külün kendiliğinden bağlayıcı olmasına katkıda bulunmakla birlikte, standarttaki sınırlar (SO_3 en fazla % 3 ve % 5, sırasıyla ASTM C 618, TS 639, ve TS EN 450), serbest kireç TS EN 450'de % 1) aştığı takdirde SO_3 fazlalığı ileri yaşlarda betonda sülfat genişmesi (aktif alümina ve SO_3 'den etrenjit oluşumu), serbest kireç ise hidrasyon sırasında kalsiyum hidroksit (portlandit) oluşturarak betonda genişleme ve çatlak oluşumuna sebep olmaktadır. Yine yüksek kireçli uçucu külde bulunan alüminat bileşimindeki gehlenit de, külde yüksek SO_3 olduğunda reaksiyona girmekte, buna karşılık düşük kireçli küldeki kristalize faz olan mullit, alüminat bileşiminde olduğu halde inert bileşen olarak kalmakta, dolayısıyla sülfat genişmesine yol açmamaktadır.

Camsı fazın durumu ve kristal yapısı gibi uçucu küllerin mineralojik durumunu gösteren yapılar puzolanik özellikle doğrudan ilişkilidir. Uçucu küllerin camsı faz yapısındaki puzolanik aktivitesi sayesinde betona dayanımını ve durabilitesini geliştirmeye katkı sağlamaktadır (Bumrongjaroen vd., 2007). Ayrıca uçucu külün reaktivitesinde camsı fazın etkin rolü bulunmaktadır. Bu yüzden uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal bileşiminden ziyade mineralojik yapısı ile bağlantılıdır. Düşük kireçli uçucu küldeki camsı fazın yapısı, SiO₂ açısından zengin olup silisli veya alümino silikat camsı fazı külün reaktif bileşeni olup, su ve kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek puzolanik özellik kazanmaktadır. Düşük kireçli uçucu küllerde hematit, kuvars ve mullit mineralleri bulunmaktadır (Görhan vd., 2009; Kölemen, 2012; Türker vd., 2009).

Tablo 1.8. Yüksek kireçli uçucu küllerin mineralojik bileşimleri (Kölemen, 2012).

Mineraller	Kimyasal bileşimi	Yüksek kireçli uçucu kül, Ctipi
Anhidrit	CaSO ₄	+
C ₂ S (Dikalsiyum Silikat)	Ca ₂ SiO ₄	+
C ₃ A (Trikalsiyum Alimünat)	Ca ₃ Al ₂ O ₆	+
Hematit	Fe ₂ O ₃	+
Serbest Kireç	CaO	+
Melilit	(Ca ₂ (Mg, Al) (Al, Si) ₂ O ₇)	+
Merwinit	Ca ₃ Mg (SiO ₄) ₂	+
Periklast	MgO	+
Kuvars	SiO ₂	+
Mullit	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	+

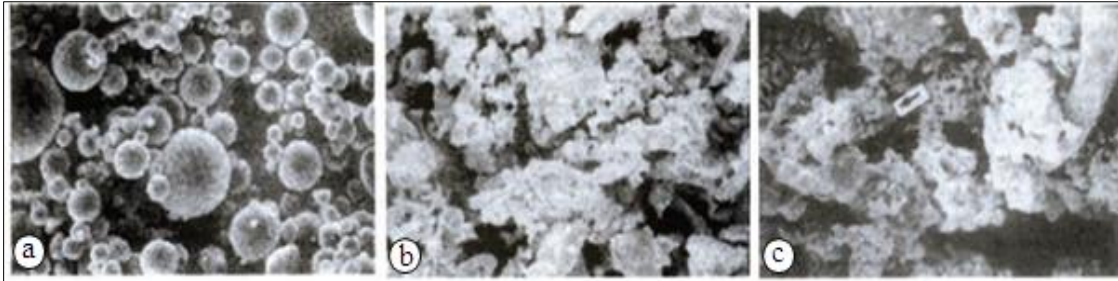
1.3.4.4. Morfolojik Özellikleri

Uçucu küllerin morfolojik özellikleri, uçucu külün tane yapısı ve yüzey durumunu belirten en önemli özelliklerinden bazılarıdır. Uçucu küllerin morfolojik özellikleri farklı faktörler tarafından etkilenmektedir. Bu faktörler, uçucu küllerin elde edildiği kömür cinsine, kömürün öğütme derecesine ve yanma olayındaki sıcaklık ve oksijen gazı miktarına, bacalarda yanmanın üniform olmasına ve uçucu kül toplama mekanizmasına bağlı olarak değişmektedir. Bu değişkenlere bağlı olarak uçucu küllerin farklı morfolojik yapıları aşağıda verilmektedir (Kölemen, 2012);

- Şekilsiz, saydam taneler

- Şekilsiz, opak taneler
- Şekilsiz, opak ve saydam karışık taneler
- Yuvarlak, kabarcıklı, saydam taneler
- Yuvarlak, kabarcıklı, opak ve saydam karışık taneler
- Köşeli, delikli, opak taneler
- İçi gaz dolu küresel taneciklerle dolu küresel taneler
- İçi küresel taneciklerle dolu küresel taneler
- Saydam, katı küresel taneler
- Opak, küresel taneler
- Yüzeyinde veya içinde kristal oluşumlu küresel tanelerden oluşmuştur.

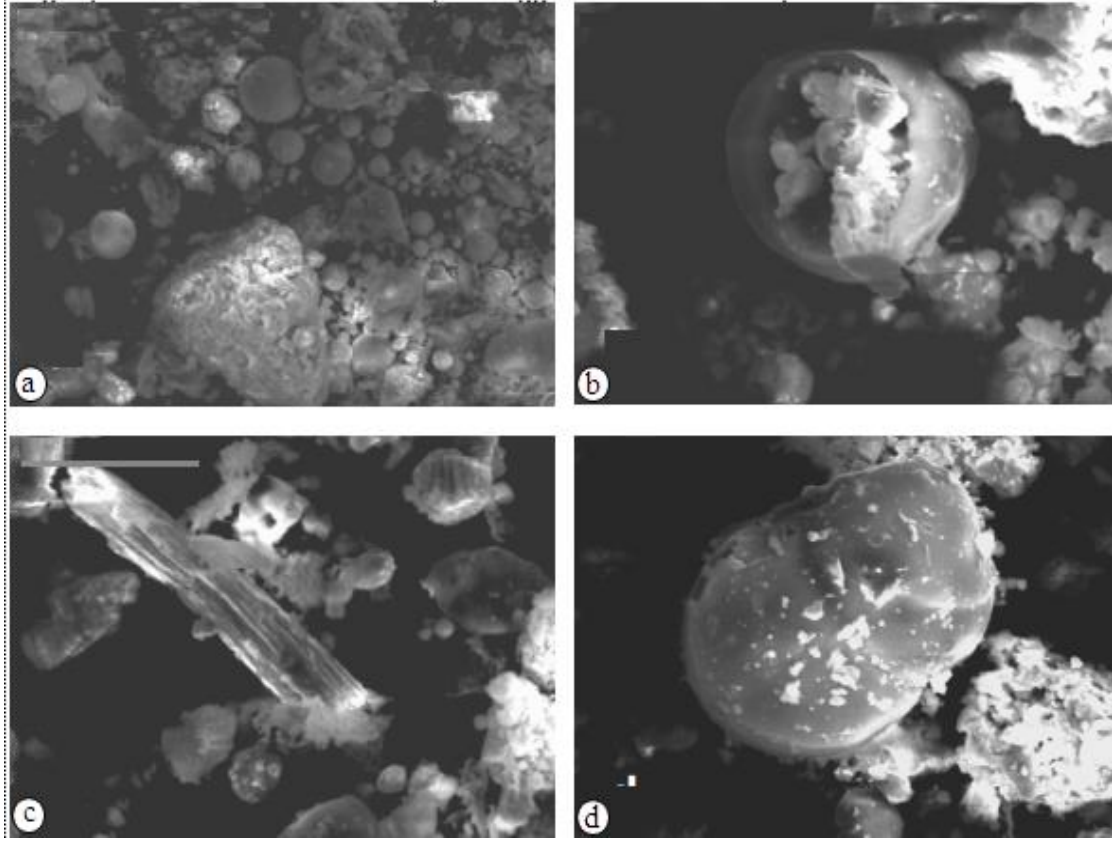
Uçucu külleri oluşturan taneler şekilsel olarak küresel ve düzensiz yapılardan oluşmakla beraber boyutsal olarak dağılımı $0,5\mu\text{m}$ - $200\mu\text{m}$ arasında değişmektedir. Kimyasal olarak farklı bileşime sahip uçucu küller (yüksek ve düşük kireçli olması) kendi aralarında farklı şekil yapısına ve tane boyutuna sahip olmasına neden olmaktadır (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Uçucu küllerin tane yapısı; a) F tipi (yüksek silis içerikli), b ve c) C tipi (yüksek kireç içerikli) (Türker vd., 2009).

Uçucu küllerin morfolojik yapısı, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Yayımlı X-Işını Analizi (EDXA) ile kullanılarak tayin edilmektedir. Bu yöntemler sayesinde, farklı uçucu küllerin partikül şekillerini ve yüzey karakteristiklerinin belirlenmesi sağlanmaktadır. Uçucu kül taneleri, camsı küresel, içi boşluksuz küresel yapılar (solid glassy sphere), boşluklu küreler (cenosphere, hollow spheres), büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar (plerosphere), yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile

kaplanmış (dermasphere) deforme yapılar, yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar gibi çeşitli tane yapısında oldukları belirlenmiştir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Uçucu külün SEM görüntüsü; a) oval ve küresel taneler, b) büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi (plerosphere), c) küresel olmayan düzensiz şekilli taneler, d) düzensiz bir küre (Georgakopoulos, 2003).

Kömürün içerisinde bulunan ve kazanda yanma olayına katılmamış kuvars ve feldispat mineralleri, küresel olmayan, düzensiz tane yapısında ve boşluklu (kil artıkları ve yanmamış karbon) kül taneciklerinin oluşmasına neden olmaktadır. Kireç oranı düşük olan küllerde camsı faz, içi boşluksuz tam küresel taneler ile cenosphere ve plerosphere gibi homojen mikro yapısına sahip tanelerden oluşmaktadır. Kireç oranı yüksek olan küllerde ise küresel, köşeli ve düzensiz tanelerin bir arada olmasından dolayı homojen olmayan bir mikro yapıya sahiptirler. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de, düşük kireçli küller kadar düzgün değildir (Türker vd.,2009).

1.3.4.5. Mekanik ve Puzolanik Özellikleri

Uçucu kül gibi yapay yada doğal puzolanlar tek başlarına çok az yada hiçbir bağlayıcı özelliğe sahip değildir. Puzolanların bağlayıcı özellik göstermesi onların puzolanik özelliklerinden ileri gelmektedir. Yüksek puzolanik özelliğe sahip uçucu küller ile hazırlanan karışımların basınç dayanımları uçucu kül katkısız karışımlara oranla daha yüksek değerler almaktadır. Bir uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri puzolanik bir malzeme olup olmadığının göstergesidir. Çünkü puzolanik etki külün bileşimine ve inceliğine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, kimyasal bileşimi açısından yüksek oranda CaO bulduran küllerin daha iyi puzolanik özelliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Silisyum oksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) miktarının fazlalığı ile amorf tane yapısı puzolanik özelliği arttırırken, yanmamış karbon miktarının fazlalığı ise puzolanik özelliğin azalmasına neden olmaktadır. Bunların yanı sıra kömürün yakıldığı kazanın çalışma sistemine, kömürün yakılmadan önceki öğütülme inceliğine, hava kirliliğini kontrol altına almak için kömüre katılan katkı malzemeleri de uçucu küllerin puzolanik özellikleri üzerinde etkisi bulunmaktadır (Aytekin, 2009).

Uçucu küller çimento ve beton endüstrisinde kullanılması ile onların mekanik özelliklerini iyileştirmeye katkı sağlamaktadır. Bu katkı onların puzolanik özelliği ve incelik değerinin artışından ileri gelmektedir (Hefni vd., 2018; Aytekin, 2009). Ayrıca puzolanik özelliği, betonun uzun dönemde dayanımına büyük katkı sağladığı, betonu sıkı bir özellik kazandırdığından geçirimsizliğini azalttığı ve betonun maruz kalabileceği birçok iç ve dış kaynaklı yıpratıcı etkilere karşı dayanıklılığını arttırdığı belirlenmiştir (Yazıcı, 2004). Uçucu küller yaygın olarak portland çimentosuna ikame olarak katılmasıyla normal ve yüksek dayanıma sahip betonlar elde etmeyi sağlamaktadır. Ancak bu süreç belli bir zamandan sonra gerçekleşmektedir. Sürecin hızlanmasında uçucu külün inceliğine ve sıcaklık faktörlerine bağlı olarak değişmektedir. Uçucu kül katkılı betonlarda çimento, su ve uçucu kül bir araya geldiği zaman kimyasal olarak CH (kalsiyum hidroksit) ile reaksiyona girdiğinde ekstradan C-S-H (Kalsiyum-Silika-Hidrat) ürünün oluşmasını neden olmaktadır. Bu da ileriki yaşlarda sadece çimento ile yapılan betonlara nazaran daha yüksek mukavemetlere sahip betonlar elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Hu, 2014; Aytekin, 2009).

1.4. Bir Puzolan Olarak Uçucu Kül

Puzolanlar, silisyumlu ve alimünyumlu malzemeler olup, kendi kendine çok az ya da hiç bağlayıcılık özelliği göstermeyen, ince tane boyutunda, nemli ve normal sıcaklık koşullarında, kimyasal olarak kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği kazanan malzemelere denilmektedir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007; Bediako, 2018).

Puzolanik malzeme aşağıdaki koşulları sağlaması ile yeterli bağlayıcılık özelliği kazanabilir (Şengül vd., 2007).

- İçerisinde bulunan silika ve alümina bileşenleri bakımından yüksek miktarlarda olmalıdır. Bu bileşenlerin ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) çimento ve beton endüstrisinde kullanılabilir miktarı en az % 70 ve üzeri olması istenmektedir,
- Amorf (herhangi bir şekle sahip olmayan) yapıda olmalıdır,
- Tane boyutu bakımından, doğal halde ya ince taneli durumda veya öğütme ile en az çimento inceliği kadar ince taneli duruma getirilmiş olmalıdır.

Uçucu küller ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartlarına göre Tablo 1.9'da verildiği gibi sınıflandırılmıştır.

Tablo 1.9. Uçucu külleri sınıflandırma (Günindi, 2005; Özdemir, 2007; Bremseth, 2010).

	Tipi	Bileşimi	Kömür Tipi
ASTM C 618	F (Düşük kireçli)	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70$ ve $\text{CaO} < 10$ Nem miktarı, max, % 3,0 LOI (K.K), % max: 6,0 SO_3 , max: % 5,0 Islak olarak elendiğinde 45 μm elek üstü, Max. %34	Bitümlü Kömürü
	C (Yüksek kireçli)	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50$ ve $\text{CaO} > 10$ Nem miktarı, max, % 3,0 LOI (K.K), % max: 6,0 Islak olarak elendiğinde 45 μm elek üstü, Max. %34	Linyit ve Yarı bitümlü
TS EN 197-1	V (Silisli Uçucu Küller)	\leq % 10 Reaktif CaO \geq % 25 Reaktif SiO_2 $<$ % 5 Kızdırma kaybı $<$ % 1 Serbest kireç	-
	W (Kalkerli Uçucu Küller)	\geq % 10 Reaktif CaO \geq % 25 Reaktif SiO_2 ancak CaO %10-15 olduğu durumda Eğer CaO $>$ % 15 basınç dayanımı \geq 28 günde 10 MPa'dan büyüktür (TS-EN 196- 1) $<$ % 5 LOI	-

Uçucu küllerin, kimyasal bileşimi bakımından SiO_2 ve Al_2O_3 bileşiklerini bulundurması, amorf tane yapısına sahip olması ve oda sıcaklığında Ca(OH)_2 ile

reaksiyona girmesi ile bağlayıcı özellik gösterdiğinden puzolanik malzeme olarak kabul edilmektedir (Wesche, 2005). Kimyasal bileşimi bakımından uçucu küller iki sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflar (Günindi, 2005; Özdemir, 2007; Bremseth, 2010),

- F sınıfı, antrasit ve bitümlü kömürün yanması sonucu oluşmuş ve puzolanik özelliğe sahip,
- C sınıfı, linyit ve yarı bitümlü kömürün yanması sonucu oluşmuş olup, puzolanik ve azda olsa çimentolanma özelliğine sahiptir.

1.4.1. Puzolan Çeşitleri

Puzolanlar, çok eskilerden beri çimento, harç ve betonda katkı maddesi olarak kullanımının yanında basit bağlayıcılar (toprak, kerpiç, kireç, alçı) ile birlikte yapı malzemesi üretiminde kullanılmaktadır (Şekil 1.10). TS 25, (2015) standardına göre doğal puzolanlar tanımlanırken, çimentoya kimyasal mukavemet kazandıran, genellikle volkanik kökenli kayaçlardır. Kireç ve su ile birleşmesi sonucu oluşan reaksiyon yavaş fakat sürekli olarak devam etmektedir. Puzolanlar kimyasal olarak silis, alüminyum ve demiroksit bileşiminden oluşmuştur. Bunların çoğu kalsiyum hidroksit ve alkaliler (sodyum ve potasyum) ile reaksiyona girerek kompleks bileşikler oluşturmaktadır (Akgül, 2006).

Doğal puzolanlarda puzolanik aktivite sadece bileşiminde bulunan silisyum, demir ve alimünyum oksitlerin varlığı yeterli olmayıp, genelde amorf malzeme miktarına göre değişmektedir. Ancak amorf malzeme miktarı standart tekniklerle belirlenemediğinden, bir malzemenin puzolanik aktivite derecesinin belirlenmesi önemlidir. Bir malzemenin silisyum içeriğinden dolayı her zaman puzolanik özelliğe sahip olduğundan bahsetmek doğru değildir. Çünkü silisyumlu malzemeler kendi içlerinde bir birinden ayırt edilecek çok fazla özelliğe sahip değildir. Örneğin, iki farklı silis içeriğine sahip malzemenin puzolanik aktivitesi kıyaslandığında, amorf silis yapısındaki bileşikler kalsiyum hidroksit ve alkalilerle reaksiyona girdiklerinde daha reaktif iken kristal yapıdaki kuvars ise daha az reaktif özelliğe sahiptir. Bu yüzden bir puzolanda koloidal silis veya aktif silis ne kadar fazla ise o puzolan o oranda yüksek bağlayıcı özelliğine sahiptir. Sonuçta bir puzolanın kimyasal bileşimi onun kalsiyum hidroksit ve alkalilerle tepkimeye girebilme yeteneğini belirlemek için yeterli değildir. İyi bir puzolan az miktarda, genel olarak % 4 den daha az kireç ihtiva etmelidir. Puzolanik maddelerde puzolanik aktivitesi, puzolanların fiziksel nitelikler; yoğunluk, tane şekli, porozite ve incelik gibi parametrelerle doğrudan ilişkilidir.

Bu maddeler, sivri köşeli, ince tanecik yapısında, oldukça yoğun gözenek yapıda olup bünyesinde fazla miktarda su tutma yeteneğine sahiptir. Bir puzolanın kaynağı ne olursa olsun kimyasal olarak silis içerikli olup, özellikle bu içerikte % 40 ile % 90 arasında bir değer alması puzolan olarak nitelendirmek için uygundur. (Tikalisky ve Huffman, 2001).

Doğal puzolanlar ASTM C 618- 05 standardına göre volkanik kökenli ve ısıtılmış olarak iki kategoride değerlendirilmiştir. Bu standartta göre doğal puzolanlar N sınıfı olarak tanımlanmıştır. Volkanik kökenli doğal olarak oluşmuş belli başlı yaygın puzolanlar; volkanik camlar, volkanik tüfler, volkanik küller, tras, pomza ve zeolitten oluşmuştur (Şekil 1.11).



Şekil 1.10. Puzolanların sınıflandırılması



Şekil 1.11. Volkanik kökenli puzolanlar (URL 6, URL 7, URL 8, URL 9 ve URL 10).

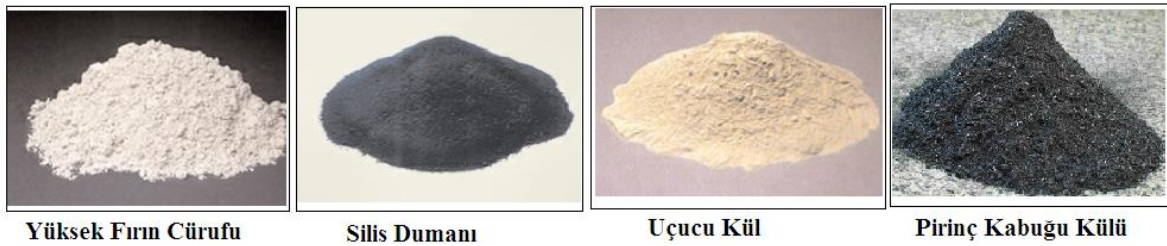
Isıl işlem görmüş puzolanların belli başlı en belirgin olanları, killer ve şeyller ile diatomitli topraklar yer almaktadırlar (Şekil 1.12)



Şekil 1.12. Isıl işlem görmüş puzolanlar (URL 11 ve URL 12).

1.4.1.1. Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar, puzolanik özellik gösterebilecek kimyasal bileşime sahip olan endüstriyel üretim sonucu oluşmuş ve doğada atık bir ürün olarak bulunan malzemeye denir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007). Silis dumanı, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü ve uçucu kül çimento ve beton içerisinde kullanılan en yaygın yapay puzolanlardır (Şekil 1.13).



Şekil 1.13. Yapay puzolan çeşitleri (URL 13, URL 14).

1.4.2. Puzolanların Reaktivite Derecesi

Doğal ya da yapay olarak kullanılan puzolanik malzemelerin reaktivite derecesi öğütme ve kalsinasyon işlemleri ile arttırılabilmektedir. Bunun yanında puzolan içinde amorf malzeme miktarının yüzdesi de reaktiviteyi belirleyen unsurlardan biridir. Tablo 1.10'da puzolanlar ve reaktivite derecesine göre sınıflandırılması verilmiştir.

Tablo 1.10. Puzolanik malzemeler ve reaktivite derecesi (Malhotra ve Mehta, 1996).

Reaktivite Derecesi	Malzemeler
Çimentolanma ve puzolanik özellik	Granülü yüksek fırın cürufu (Çimentolanma özelliğinde)
	Yüksek kalsiyumlu uçucu küller (çimentolanma ve puzolanik özellikte)
Yüksek aktiviteli puzolanlar	Silis dumanı
	Pirinç kabuğu külü
Normal aktiviteli puzolanlar	Düşük kalsiyumlu uçucu küller
	Doğal puzolanlar (kil, şeyl, diatomitli topraklar, opalin çört)
Zayıf ve çok zayıf puzolanlar	Yavaş soğumuş yüksek fırın cürufu
	Taban külü
	Kazan cürufu
	Tarlada yanmış pirinç kabuğu külü

1.4.3. Çimentoda Mineral Katkı Olarak Kullanılan Puzolanların Fiziksel ve Kimyasal Yapısı

Çimentoda mineral katkı olarak kullanılan puzolanların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenme ile çimentolanma ve puzolanik özelliklerin ortaya çıkmasına büyük katkı sağlamaktadır (Tablo 1.11).

Tablo 1.11. Puzolanların fiziksel ve kimyasal yapısı (Lohtia ve Joshi, 1995; Malhotra ve Mehta, 1996).

Puzolanlar	Kimyasal İçeriği	Fiziksel Yapısı
Silis dumanı	Amorf silis yapısında	Çok ince, 0,1 μm boyutunda küreler, yüksek yüzey alanına sahip, dolgu maddesi olarak davranır.
Yüksek fırın cürufu	Silis camı ve yüksek kalsiyumda	Köşeli tane yapısına sahip, öğütüldüğünde tane boyutu < 45 μm küçüktür.
Pirinç kabuğu külü	Saf silika, amorf yapıda	Büyük oranda gözenekli ve yüksek yüzey alanına sahip, tane boyutu > 45 μm 'dan büyüktür.
Uçucu kül (F ve C)	Alüminyum silikat	İnce taneli, küresel ve tane boyutu < 45 μm küçüktür
Kalsine olmuş Kil ve şeyl	Alüminyum silikat camı, kuvars, feldispat ve mika	Öğütüldüğünden < 45 μm 'dan küçük tane boyutunda ve pürüzlü dokuya sahiptir
Diatomitli topraklar	Amorf silika	1 μm boyutunda çok ince tane ve tek hücreli bitkilerin kalıntısından oluşmuş gözenekli iskelet yapısına sahiptir

1.4.4. Puzolanların Farklı Özelliklerini ASTM C 618'e Göre Değerlendirme

ASTM C 618 standardına göre puzolanların F ve C tipi uçucu küllerin çimento ve betonda kullanılabilmesi için gerekli olan uygunluk değerleri Tablo 1.12'de verilmiştir.

Tablo 1.12. ASTM C 618'e göre puzolanların uygunluk değerleri

Puzolanların Farklı Gereklilikleri	N Sınıfı	F Sınıfı	C Sınıfı
Kimyasal Sınır, %			
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 70	≥ 70
SO_3	≤ 4	≤ 5	≤ 5
Rutubet Durumu	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Kızdırma kaybı	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Na_2O	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$
Fiziksel Sınır, %			
İncelik: ıslak olarak elendiğinde 45 μm (325) elek üzerinde kalan	≤ 34	≤ 34	≤ 34
Su ihtiyacı	115	105	105
Esneklik: genişleme ve büzülme	$\leq 0,8$	$\leq 0,8$	$\leq 0,8$
Ortalama yoğunluk	≤ 5	≤ 5	≤ 5
45 μm (325) elek üzerinde kalan ortalama yüzde	≤ 5	≤ 5	≤ 5
Puzolanik Aktivite Değerleri, %			
7 günlük puzolanik aktivite değeri	≥ 75	≥ 75	≥ 75
28 günlük puzolanik aktivite değeri	≥ 77	≥ 75	≥ 75

1.4.5. Puzolanların Çimento ve Beton İçerisinde Kullanımının Avantajları

Puzolanların farklı alanlarda kullanılması ile sağladığı faydalar, mühendislik, ekonomik ve ekolojik olarak üç kısımda ele alınmış ve incelenmiştir. Bu alanlarda sağladığı faydalar aşağıda verimiştir (Malhotra ve Mehta, 1996; Hoffman, 2006);

- Mühendislik anlamında 3 farklı fayda sağlamaktadır. İlk olarak, ince boyutlu puzolanların beton içerisinde kullanımı ile betonun işlenebilirliği artmakta, su ihtiyacını ise azalmaktadır. Ancak bu durum silis dumanı için aynı olmayıp yüksek yüzey alanından dolayı betonun su ihtiyacını arttırmaktadır. İkinci olarak, betonun kimyasal saldırılara karşı, durabilitesini, geçirimsizliğini ve nihai dayanımını arttırmaktadır. Üçüncü olarak çimentonun hidrasyon ısısını düşürdüğünden dolayı betonda termal olarak oluşabilecek çatlaklara karşı dayanım kazanmasını ve çekme gerilme kapasitesini arttırmaktadır.

- Ekonomik faydaları, çimento beton içerisinde kullanılan en pahalı bileşenlerden biridir. Çimento üretimi sırasında çok fazla enerji tüketilmektedir. Yüksek enerji tüketimi enerji maliyetinde artmasına neden olmaktadır. Enerji maliyetindeki artışta çimento maliyetine yansımaktadır. Puzolanların çimento hammaddesi olarak kullanılması ile çimento üretimi sırasında çok az ya da hiç enerjiye ihtiyaç duyulmamaktadır. Genel olarak puzolanları % 20-% 60 oranlarında çimentoda mineral katkı olarak kullanmak önemli oranda enerji ve maliyetten tasarruf etmeye katkı sağlamaktadır.

- Ekolojik faydaları, termik santrallerde ve metalürjik fırınlarda endüstriyel atık olarak oluşmuş yapay puzolanlar yüksek oranda toksit madde içermektedir. Bu ürünler uygun alanlarda değerlendirilmez ya da depolanmazsa çevre ve insan sağlığı için önemli sorunlar oluşturmaktadır. Bu gibi ürünlerin çimento ve beton bileşiminde kullanılması sonucu yararlı ürünler haline getirilmektedir. Ayrıca çimentonun üretim aşamasında çevreye büyük oranda CO₂ gazı verilmektedir. Çevrede oluşan bu gaz sera gazı etkisi yaratmaktadır.

Doğal ve yapay puzolanların yapı malzemesi olarak kullanılması ile birçok faydası bulunmaktadır. Yapı malzemesi olarak çimento ve beton üretiminde kullanılması ile bu malzemelerin özelliklerini iyileştirmede büyük oranda katkı sağlamaktadır (NRMCA, 2000). Çimentoya ikame edilmeleri ile elde edilen katkılı çimentolar ile üretilen betonların taze ve sertleşmiş haldeki performansı üzerine pozitif yönde birçok etkisi vardır (Tablo 1.13 ve Tablo 1.14).

Tablo 1.13. Taze haldeki beton özellikleri üzerine etkisi (Thomas and Wilson, 2002; Kosmatka vd., 2002; Taylor et al., 2006).

Beton Özellikleri	Yapay Puzolanlar				Doğal Puzolanlar		
	Uçucu Küller		Ö. Yüksek Fırın Cürufu	Silis Dumanı	Kalsine Edilmiş Kil	Kalsine Edilmiş Şeyl	Metekaolen
	F	C					
Su İhtiyacı	Önemli oranda azalmakta		Artmakta	Önemli oranda artmakta	Önemli bir değişiklik yok		Artmakta
İşlenebilirlik	Artmakta			Önemli oranda artmakta	Artmakta		Azalmakta
Terleme ve Ayrışma	Azalmakta		Artabilirde azalabilirde	Önemli oranda azalmakta	Önemli bir değişiklik yok		Azalmakta
Hava Miktarı	*Önemli oranda azalmakta	*Azalmakta	*Azalmakta	Önemli oranda azalmakta	Önemli bir değişiklik yok		Azalmakta
Hidratasyon Isısı	Azalmakta	Artabilirde azalabilirde	Azalmakta	Önemli bir değişiklik yok	Azalmakta		Azalmakta
Priz Süresi	Artmakta	Artabilirde azalabilirde	Artmakta	Önemli bir değişiklik yok	Artmakta		Önemli bir değişiklik yok
Yüzey Düzeltilebilirliği	Artmakta			Artabilirde azalabilirde	Artmakta		
Pompalanabilirlik	Artmakta						
Plastik Büzülme ve Çatlama	Önemli bir değişiklik yok			Artmakta	Önemli bir değişiklik yok		

* Uçucu küldeki karbon, alkali içeriği, incelik ve diğer kimyasal özelliklerine bağlıdır.

Tablo 1.14. Sertleşmiş haldeki beton özellikleri üzerine etkisi (Thomas and Wilson, 2002; Kosmatka vd., 2002; Taylor et al. 2006).

Beton Özellikleri	Yapay Puzolanlar				Doğal Puzolanlar		
	Uçucu Küller		Ö. Yüksek Fırın Cürufu	Silis Dumanı	Kalsine Edilmiş Kil	Kalsine Edilmiş Şeyl	Metekaolen
	F	C					
Erken Dayanım	Azalmakta	Önemli bir değişiklik yok	Azalmakta	Önemli oranda azalmakta	Azalmakta		Önemli oranda azalmakta
İleriki Yaşlardaki Dayanım	Artmakta			Önemli oranda artmakta	Artmakta		Önemli oranda artmakta
Permabilite	Azalmakta			Önemli oranda azalmakta	Azalmakta		Önemli oranda azalmakta
Klor Geçirirliği	Azalmakta			Önemli oranda azalmakta	Azalmakta		Önemli oranda azalmakta
ASR	Önemli oranda azalmakta	Artabilirde azalabilirde	Önemli oranda azalmakta	Azalmakta			
Sülfata Karşı Direnç	Önemli oranda artmakta	Artabilirde azalabilirde	Önemli oranda artmakta	Artmakta			
Donma ve Çözünme	Önemli bir değişiklik yok						
Aşınmaya Karşı Direnç							
Kuruma Rötresi (Büzülme)							

1.4.6. Uçucu Küllerin Puzolanik Aktivitesi

Puzolanik aktivite, uçucu külün içerisinde bulunan SiO_2 ve Al_2O_3 bileşiklerinin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girebilme kabiliyetine denir. Bu reaksiyon $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve suyun bir araya gelmesi sonucu oluşur. Oluşan reaksiyon ile reaksiyona giren portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) miktarında azalma olurken açığa çıkan kalsiyum silika hidrat (CSH) bileşiminde artış olup çimentolanma özelliği kazanır (Kılınçkale, 1996). Reaksiyona giren ürünün çeşiti değişikçe açığa çıkan üründe değişmektedir. Örneğin, aşağıda verilen reaksiyonlarda giren ve oluşan ürünler birbirinden farklı olduğu görülmüştür.

Kalsiyum hidroksit+Puzolanlar (doğal ve yapay)+su ile kalsiyum silika hidrat ya da

Kalsiyum hidroksit+Puzolanlar (doğal ve yapay)+su ile kalsiyum alimüna hidrat oluşur.

Bir malzemenin puzolanik reaktivite derecesi, çimento hidrasyonu sonucu benzer morfolojik yapıda ve farklı kimyasal bileşimine sahip ürünlerin oluşumuna bağlıdır (Weng, 1992). Uçucu küllerin çimento harcı ve beton içerisindeki kimyasal etki oluşturmaları puzolanik aktivite özelliğinden ileri gelmektedir. Çimento içerisinde uçucu küllerin çimentoya benzer özellik göstermesi, alkalilerle reaksiyona girmesi sonucu oluşur ve bu süreç çimento hidrasyonundan daha yavaş gelişmektedir. Uçucu küllerde puzolanik aktivitenin ilk adımını, içerisinde bulunan camı yapısının kırılması ve çözünmesi ile başlar. Uçucu külün camı fazı, betonun boşluk çözültüsü içerisinde alkalinin OH^- iyonu tarafından ayrıştırılmaktadır. Ayrıştırılan camı faz, sonrasında alimünyum ve silika yapısında moleküler birimlere ayrılmakta ve boşluk çözültüsünde çözünmektedir. Kalsiyum iyonu ise boşluk içerisinde su ile bir araya gelmesi sonucu kalsiyum-silika-hidrat ve kalsiyum-alimüna-hidrat yapısını oluşturmaktadır. Bu reaksiyon uçucu külün yüzeyinde ya da yüzeyine yakın yerlerde oluşmakta ve reaksiyon sonucu oluşmuş CSH yapısının çözünürlüğünün düşük olmasına neden olmaktadır. CSH yapısı, boşluk çözültüsünün pH ve ana iyonların yayılma mesafesine bağlıdır. Bu yapı uçucu külün yüzeyinde yoğun bir tabaka oluşturmaya neden olmaktadır. Uçucu kül yüzeyinde oluşan bu tabaka daha sonra gelen puzolanik reaksiyonu engellemeye ve sonrasında bu sürece katılan bileşiklerin bu tabakadan içeri ve dışarı girmesini engelleyici etki yapması ile puzolanik reaksiyonun daha yavaş olmasına neden olmaktadır. Uçucu küllerin puzolanik aktivitesi ise, uçucu küllerin karakteristik özelliklerine, camı şeklin reaktivitesine, camı yapısının miktarına, uçucu kül inceliğine, boşluk çözültüsünün pH ya da OH^- ve Ca^{+2} iyon içeriğine bağlıdır. Bu

parametrelerin puzolanik aktiviteyi geliştirmede oluşturduğu katkıları aşağıda detaylı olarak ele alınmıştır (Bumrongjaroen, 1999);

- Puzolanik aktivite üzerine OH⁻ iyonunun etkisi, bu iyon sayesinde uçucu külün yüzeyinde camsı faz yapısı znmeye başlar. znen camsı faz, içerisinde oksijen bağlarının kırılmasına ve zltide silisyum iyonlarını oluşturan silisyum atomlarının ağığa ęıkmasına neden olur.
- Uçucu küllerin farklı faz yapılarında olmasının puzolanik aktivite üzerine etkisi, örneğin, uçucu külün kristal yapıdan ziyade amorf ya da camsı yapıda olması daha kolay znmesine ve daha reaktif olmasına neden olmaktadır. Uçucu külde camsı yapının znmesi, silisyum yüzeyinde bulunan her bir OH⁻ iyonu konsantrasyonu bağlı olup daha fazla znmesini sağlar. Ayrıca camsı yapının znlebilirliği boşluk suyunun alkalitesine de bağlıdır.
- Boşluk suyunun pH değeri puzolanik aktivite üzerine etkisi, ęimento hidratasyonu boşluk suyunun pH yaklaşık 12 olduğunda başlamakta daha sonra yaklaşık 1 hafta sonra pH uçucu kl içerisinde Si⁺² iyonlarının znmesi ile artmaktadır. Puzolanik aktivite başlamadan öncesi puzolanik aktivite için duraklama periyodu olup, bu periyotta ise boşluk zltisinin alkali seviyesinin düşük olması ve reaksiyon ürününün çökmesi sonucu engellenmektedir. Ayrıca boşluk suyunun pH değeri puzolanik aktivite üzerinde dolaylı etkisi, boşluk zltisinin pH değeri su/ęimento oranının artmasıyla seyreltici etkiden dolayı azalmasına neden olmaktadır.
- Puzolanik aktiviteyi etkileyen parametrelerden bir diğeri ise kalsiyum hidroksit (CH) iyonu olup, puzolanik reaksiyonu oluşturan başlıca bileşenlerden birisidir. ęimento içerisine yüksek oranda F tipi uçucu kül ikame etmek pasta içerisinde kalsiyum hidroksit iyonlarını daha da düşmesine neden olmaktadır. Aslında CH iğeriği zamanla azalmaktadır. ęnk boşluk zltisi içerisinde yüksek alkalilerin olmasından dolayı CH zltisinin azalmasına neden olmaktadır. Karışım içerisinde uçucu kül miktarının azalması ile CH miktarı artabilir. Erken süreçlerde CH, hidratasyonu üzerinde etkisi olup puzolanik aktivite üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. ęnk uçucu kl henüz znmeye başlamamıştır. Erken zamanda CH eklemek ęimento hidratasyonunu arttırmaktadır.
- Uçucu küllerde puzolanik aktiviteyi etkileyen parametrelerden sonuncusu, uçucu külün inceliğine bağlı olup, külü oluşturan tanenin boyutuna ve parçacık boyutunun inceliğine göre değişmektedir.

1.4.6.1. Uçucu Küllerde Aktivite İndeksini Belirleme Metotları

Uçucu küllerin puzolanik aktivitesinin belirlenmesi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, yapılan çalışmada istenilen parametrelerin belirlenmesine ve amacına göre değişiklik göstermektedir. Puzolanik aktiviteyi değerlendirmek için verilen yöntemler kimyasal, fiziksel, mekanik ve mikro yapısal olmak üzere dört alt başlıkta ele alınmaktadır.

1.4.6.1.1. Kimyasal Yöntemler

Bu yöntem doğrudan puzolanik aktiviteyi belirleme yöntemlerinden biridir. Yöntemde malzemenin kimyasal içeriğinin belirlenmesi için kullanılır. Kimyasal içeriğinin belirlenmesi için klasik kimyasal titrasyon tekniklerini kullanarak, puzolan ve bağlayıcı (kireç ya da çimento) karışımından hazırlanmış bir çözeltide reaksiyonun devam ederken, puzolandaki aktif minerallerle etkileşimi sonucunda kalsiyum hidroksit miktarında meydana gelen değişmelerin tespit edilmesine dayanır. Kimyasal bileşimini belirlemeye yönelik teknikler, "Fratini, Doygun kireç ve Chapelle aktivite indisi" olmak üzere üç kısımdan oluşmuştur. Bu testler arasındaki en belirgin fark Fratini testinde çimento/puzolan, doygun kireç ile Chapelle yönteminde ise puzolan/kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (CH) karışımları ile çözelti oluşturulmuştur. Bu testlerde puzolan malzemenin özellikleri değilde puzolan olduğu kabul edilen bir maddenin alkali ortamdaki reaksiyon derecesi hakkında bilgi edinmeyi sağlar (Kurugöl, 2017).

1.4.6.1.2. Fiziksel Yöntemler

Bu yöntemle puzolanın farklı fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişiklikler sayesinde puzolanik özelliklerin belirlenmesi sağlanmıştır. Fiziksel yöntemlerle puzolanik aktivitenin belirlenmesinde, elektriksel iletkenlikte meydana gelen değişimler, puzolan ve kireç karışımından oluşan bir çözeltinin çeşitli sürelerle kondüktometri ile ölçümü sayesinde belirlenmektedir. Fiziksel yöntemlerden bir diğeri ise, kimyasal olarak oluşturulmuş nitrik-floridrik karışım içinde puzolanın çözülmesi sırasında ve 1 saatlik aşındırma sonunda çözünmeyen kalıntının erimesi ile açığa çıkan ısıyı kalorimetrik yöntemle bakılarak puzolanın aktivitesi değerlendirilmektedir. Puzolanik maddeleri fiziksel yöntemlerle değerlendirmenin bir başka ölçütü, puzolanlarla oluşturulan çimento karışımlarında karışım

içerisinde bulunan çimento tanelerinin özgül yüzeyindeki artış hızını ölçme esasına dayanır. Yöntemin esası, benzer özgül yüzey artış miktarı değişik kalsiyum hidroksit-emme hızlarına karşılık gelmesine dayanmaktadır (Bulut, 2007).

1.4.6.1.3. Mekanik Yöntemler

Bu yöntemde uçucu kül-kireç ya da uçucu kül-çimento ile oluşturulan harçların basınç dayanımlarının belirlenmesi esasına dayanır. Bu iki karışımda, uçucu kül-kireç yerine yaygın olarak kullanılan ve klinkerin bileşimini doğrudan etkileyen uçucu kül-çimento karışımı kullanılmaktadır. Bu yöntemde uçucu kül bileşiminde bulunan kalsiyum hidroksit ile mekanik dayanım arasında doğrudan bir ilişki olmamasından dolayı puzolanik aktiviteyi belirlemede dolaylı yöntemlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Chen, 1984).

1.4.6.1.4. Mikro Yapısal Yöntemler

Malzemenin puzolanik aktivitesini belirlemek için, petrografik analiz, elektron mikroskonu, diferansiyel termal analiz (differential thermal analysis-DTA), termogravimetrik analiz (thermogravimetric analysis-TG), X ışını difraktometresi (X ray powder diffraction-XRD), X ışını floresan spektrometresi (XRF) gibi mikro yapı yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler ile puzolanik aktivite farklı şekillerde belirlenmiştir. Petrografik analiz sayesinde uzun süre kireç-uçucu kül harç örneklerinin reaksiyon sonucu açığa çıkmış ürünlerin morfolojisini belirlemek için kullanılmaktadır. Bu analizle uçucu külü oluşturan tanenin morfolojisi, tane boyu dağılımı ve özgül yüzey alanı belirlenerek puzolanik aktivite arasında bağlantı kurmasına yardımcı olmaktadır. Elektron mikroskobu ile çimento hidrasyon ürünlerinin detaylı bir şekilde çalışılmasına imkân sunmaktadır. Ayrıca uçucu külün doğal amorfolojik yapısını, karmaşık kimyasal ve fiziksel özellikleri hakkında bilgi edinmeye katkı sağlamaktadır. Diferansiyel termal analiz (DTA) ile bir maddenin fiziksel ve kimyasal değişimlere uğradığı zaman bu madde tarafından verilen (ekzotermik) ya da alınan (endotermik) ısının karşılaştırılması esasına dayanmaktadır (Joshi, 1970). DTA grafiğinde görülen endotermik reaksiyon pikleri su kaybı ya da dekompozisyon göstergesi iken, ekzotermik reaksiyon pikleri yeni bir kompozisyon oluşumunu ifade etmektedir. Termogravimetrik analiz (TG) ise, maddenin sıcaklık etkisiyle ağırlık kaybını göstermektedir. Böylece, DTA/TG, üretilen numune

içinde, hidrasyon sonunda oluşan silikatları ve bağlanan Ca(OH)_2 miktarının belirlenmesini sağlamaktadır. X ışını difraktometresi (XRD), faz analizi olup puzolandaki ve bitmiş ürünlerdeki mineral kristallerini saptayarak verileri grafik olarak göstermektedir. Böylece, harç içindeki kuvars, kristobalit, feldispat cinsi SiO_2 ve amorf yapı içeren bileşiklerin varlığı ile puzolan harcının içinde kireçle tepkimeden artan portlandit [Ca(OH)_2] belirlenmektedir. X ışını floresan spektrometresi (XRF), puzolan içindeki oksitleri % olarak tayin ederek, puzolanik aktiviteyi belirleyen SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 oranlarının belirlenmesini sağlamaktadır (Kurugöl, 2017).

1.4.6.2. Puzolanik Aktiviteye Etki Eden Faktörler

Puzolanik aktivite uçucu küllerin farklı özellikleri tarafından etkilenmektedir. Uçucu küllerin inceliği, uçucu küllerin tanecik morfolojisi, farklı faz yapıları (minerolojik olarak kristal, amorf ya da camsı faz), kimyasal bileşimi, nem, zaman ve sıcaklık faktörleri puzolanik aktiviteyi etkileyen önemli faktörlerdir. Aşağıda bu faktörlerin etkisi detaylı olarak anlatılmıştır.

1.4.6.2.1. İnceliği

Uçucu küllerin inceliğinin puzolanik aktivite üzerindeki rolü önemlidir. İncelik faktörü, termik santralde yanan kömürün tipine, kömürün öğütülme derecesine, termik santralde kömürün yakma tipine, sıcaklığına ve uçucu külün bacalardan toplama yöntemine göre değişmektedir. Uçucu küllerin puzolanik özelliği parçacık boyutu ile doğrudan ilişkili olup, betonun özelliklerini doğrudan etkilemektedir. İncelik, çimento-uçucu kül karışımlarında çimento taneleri arasında boşlukları doldurması (filler etki) ile karışımın erken yaşlarda dayanımı iyileştirmeye, gözeneksiz ve sıkı mikro yapı oluşturmaya katkı sağlamaktadır. Ayrıca daha ince tane yapısına sahip uçucu küller ile hazırlanan karışımlar hidrasyonu ve puzolanik aktiviteye geliştirmeye neden olmaktadır. Küçük parçacıklar büyük yüzey alanına sahip olduğundan dolayı puzolanik aktiviteyi geliştirmesinin yanı sıra ayrıca karışımın su ihtiyacını ve alkali-agrega reaktivitesini azaltmaya, karışımın işlenebilirliğini geliştirmeye katkı sağlamaktadır (Bumrongjaroen, 1999).

1.4.6.2.2. Morfolojisi

Uçucu küller tanecik morfolojisi bakımından heterojenik bir yapıya sahiptirler. Morfolojik olarak, yuvarlak, köşeli, senosfer (içi boş küreler), plerosfer (büyük küre içinde küçük küreler kümesi), iri taneli kırılmış ya da erimiş parçacıklardan oluşmuştur. Kazanın sıcaklığı 1600-1700 °C olduğu zaman uçucu küller küresel tane yapısına sahipken sıcaklık düştüğünde düzensiz ve köşeli tanelerin oluşmasına neden olmaktadır. Uçucu kül tipine göre morfolojik tane yapısı değişmekte olup, düşük kireçli uçucu küllerde küresel taneler daha düzgün yüzeylere sahipken, yüksek kireçli uçucu küller içerisinde kürelerin yüzeylerinde yüksek oranda SO₃ bulunmaktadır. Bu iki farklı kül yapısı içerisinde sadece plerosfer (büyük küre içinde küçük küreler kümesi) yapıya sahip düşük kireçli uçucu küller olup, bu küllerin öğütme sonucu birçok küresel tanenin oluşmasına ve daha reaktif bir yapıda olmasını sağlamaktadır. Ayrıca yüksek miktarda boşluklu yüzey yapısına sahip bir uçucu kül tanesi, öğütme işlemi ile boşluk yapısının azalmasına neden olmaktadır. Boşluk yapısının azalması ile yüzey alanının azalmasına neden olur (Chen, 1984).

1.4.6.2.3. Farklı Faz Yapıları

Uçucu küller farklı faz oranlarından oluşmuştur. Bu faz oranlarındaki dağılıma göre, % 11-48 arasında kristal yapıda geri kalanı ise amorf malzeme ve karbon parçacıklarından oluşmuştur. Uçucu küllerin kristal yapısı büyük oranda kuvars, mullit, hematit, magnetit az miktarda ise kalsiyum karbonat, kalsiyum hidroksit ve anhidrit minerallerinden oluşmuştur. Diğer faz yapısı ise amorf silis, alimünyum ve demir camlarından oluşmuştur. Uçucu küllerin kristal yapısında bulunan atomlar düzgün ve sık bir şekilde birbirine bağlı olması ile çözünmesi daha zor olduğundan, puzolanik aktiviteyi geliştirmede önemli bir rolü yoktur. Ancak amorf silis, alimünyum ve demir camlarından oluşan faz yapılarını oluşturan atomların dizilişleri daha aralıklı ve bozuk olmasıyla çözenmesi daha kolay olduğundan puzolanik aktivite üzerinde etkisinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu etkinin yüksek olması, puzolanik aktivitenin camsı ve silisyum parçacıkları arasında oluşmasından ileri gelmektedir (Joshi, 1970).

1.4.6.2.4. Kimyasal Bileşimi

Uçucu küller farklı kimyasal bileşenlerden meydana gelmiştir. Bu bileşenler silisyum, alimünyum, demir oksit ve bir miktarda karbon tanelerinden oluşmuştur. Puzolanik aktivite üzerinde uçucu külün kimyasal bileşimini oluşturan her bir bileşenin farklı bir etkisi vardır. Örneğin karbon içeriği düşük olan uçucu küller yüksek içerikli küllere nazaran daha aktif özelliğe sahiptir. Alkali ve sülfat bileşikleri bulduran uçucu küllerde ise puzolanik aktiviteyi geliştirmeye katkı sağlamaktadır. Çünkü uçucu kül içerisinde alkali bulundurması kireç-puzolan arasında oluşan çözeltinin pH değerini arttırmaya neden olmaktadır. Uçucu kül içerisinde sülfat bulundurmasının ise farklı bir etkisi vardır. Uçucu külde bulunan sülfat kalsiyum sülfat şeklinde olup, uçucu kül katkılı karışımların dayanımlarını gelişmesine ve sertleşme oranını arttırmaya katkı sağlamaktadır. Uçucu kül içerisinde karbondioksit bileşiği ise kalsiyum karbonat yapısında bulunmaktadır. Bu yapı puzolanik reaksiyon sonucu oluşan silisyum ve alimünyum bileşenlerini bozarak alkaliler ile silisyum jeli oluşturmaya katkı sağlamaktadır (Leonard, 1958).

Uçucu küllerin kimyasal bileşiminde bulunan kireç çeşiti ve kireç-puzolan oranı puzolanik aktiviteyi geliştirmede önemli bir rolü vardır. Kireç faktörü, uçucu külün içerisinde bulunan kirecin tipine ve tane yapısına göre puzolanik aktiviteyi değiştirmektedir. Saf kireç kalsiyum hidroksitten oluşmuştur. Ancak kireç taşının içerisinde bazen magnezyum oksit bulunması dolomit mineralinin varlığından ileri gelmektedir. Farklı kireç içerikli (kalsiyum, magnezyum) malzeme ve uçucu küller ile hazırlanan harçların puzolanik dayanımı üzerine kireç çeşitinin etkileri mevcuttur. Örneğin, dolomitik kireçler ile üretilen harçların iç basıncı daha yüksek iken sadece kalsiyumlu kireçler ile üretilen harçlarda daha yüksek nihai basınç dayanım değerleri vermektedir. Uçucu kül ilaveli harçların basınç dayanımı üzerinde dolomitik kireçlerin etkisi sadece kalsiyum ilaveli kireçlere göre daha etkili olduğu belirlenmiştir. Kimyasal bileşimi bakımından kireç/puzolan oranının puzolanik aktivite üzerinde etkisi ise farklı kireç/uçucu kül oranlarının belirlenmesinde rol oynamaktadır. Örneğin, kısa kür zamanı için maksimum dayanım elde etmede kireç/puzolan oranı 1:4, uzun kür zamanı için 1:2 olarak kabul edilmiştir. Kireç/puzolan kül değeri en uygun olarak 1:2 oranında kabul edilmektedir. Çünkü bu oran sayesinde puzolanik reaksiyon devam ederken kirecin erken sürede bitmeden reaksiyonun devam etmesine katkı sağlamaktadır (Joshi, 1970).

1.4.6.2.5. Nem

Puzolanik reaksiyonda nem önemli bir faktördür. Çünkü kuru durumda puzolanik reaksiyon gerçekleşmez yada dayanım gelişiminin olması mümkün değildir. Uçucu kül içeren bir harcın kısmi su ihtiyacı uçucu külün puzolanik dayanımını tahmin etmede kullanılabilir. Kireç-uçucu kül karışımlarında optimum su maksimum yoğunluk için gereklidir. Maksimum puzolanik dayanım için optimumu su içeriği kireç-uçucu kül harçlarının plastik limitini göstermektedir. (Joshi, 1970; Leonard, 1958).

1.4.6.2.6. Zaman

Puzolanik reaksiyon gelişimi yavaş ve uzun bir süreçten meydana gelmektedir. Kireç-uçucu küllü harçlarda puzolanik reaksiyon kısa süre 45 gün olarak kabul edilmiştir. Puzolanik reaksiyonla zaman arasındaki ilişki, 100 güne kadar neredeyse lineer, 100 günden sonra dayanım kazanması daha uzun bir süreci, 200 gün sonra dayanım kazanma minimum olarak ifade edilmektedir (Joshi, 1970).

1.4.6.2.7. Sıcaklık

Sıcaklık faktörünün puzolanik aktivite üzerinde etkisini kil minerallerinin puzolan olarak kullanıldığında daha net görmek mümkündür. Çünkü kil mineralleri, 650-870 °C sıcaklık arasında kalsinasyon (nemini ve karbondioksit gibi uçucu maddelerini uzaklaştırmak için o maddeyi erime noktasının altında ısıtma) işlemine bırakıldığında, kristal yapısının bozunmasına ve puzolanik özellik kazanmasına neden olmaktadır. Uçucu küler ise zaten yüksek sıcaklıklarda olduğundan tekrar kalsinasyon işlemi geçirmesine gerek yoktur. Sıcaklık artışına bağlı olarak puzolan içerisinde bulunan silisyumun su içerisinde çözünmesi artarken, kalsiyum hidroksitin çözünmesi ise azalmaktadır. Farklı sıcaklıklarda kireç-uçucu kül arasındaki reaksiyonu etkilediği ancak dayanım değeri üzerine bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Düşük sıcaklıklara göre yüksek sıcaklıklarda puzolanlar test edildiği zaman inert malzemelerin puzolanik aktivite gösterebileceği dikkat edilmektedir (Leonard, 1958).

1.5. Çimento

Çimento, killi ve kireçli malzemelerin öğütülmesi ve karıştırılmasıyla üretilen metalik olmayan, inorganik malzemeden yapılmış bir hidrolik bağlayıcıdır. Su ile karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonu ve işlemleri ile priz alabilen ve su altında dayanımını ve kararlılığını koruyan bir hamur (pasta) yapısındadır (TS EN 197-1, 2012; Fathi, 2012).

Portland çimentosu üretilirken kullanılan başlıca hammaddeler, kireç, silika, alümina ve demiroksit bileşiklerinden oluşmaktadır. Bu bileşikler belli oranlarda bir araya getirilerek döner fırında 1400 °C sıcaklıkta pişirilmesi ile çimentonun ana bileşimi olan klinker oluşmaktadır. Klinkeri ise belli miktarda alçı taşı (ve bazen mineral katkıları) ile öğütülmesi sonucu portland çimentosu üretilmektedir. Genel olarak bir portland çimentosu üretilirken olması gereken mineraller ve kimyasal bileşimi Tablo 1.15 ve Tablo 1.16'da verilmiştir.

Tablo 1.15. Portland çimentosunun mineralojik bileşimi (Fathi, 2012).

Kimyasal İsmi	Mineralojik İsmi	Kimyasal Formülü	Sembolü	Kütle İçeriği,%
Trikalsiyum silikat	Alit	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	38-60
Dikalsiyum silikat	Belit	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	15-38
Trikalsiyum alüminat	Belit	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	7-15
Tetrakalsiyum alüminoferrit	Ferrit	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	10-18
Pentakalsiyum trialüminat	Ferrit	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	1-2
Kalsiyum sülfat dihidrat	Alçı taşı (Jips)	CaSO ₄ .2H ₂ O	CSH ₂	2-5

Tablo 1.16. Portland çimentosunun kimyasal bileşimi (Fathi, 2012).

Kimyasal İsmi	Genel İsmi	Kimyasal Formülü	Sembolü	Kütle İçeriği, %
Kalsiyum oksit	Kireç	CaO	C	58-66
Silisyum dioksit	Silika	SiO ₂	S	18-26
Alimünyum Oksit	Alimün	Al ₂ O ₃	A	4-12
Demir Oksit	Demir	Fe ₂ O ₃ +FeO	F	1-6
Magnezyum Oksit	Magnezyum	MgO	M	1-3
Kükürt dioksit	Sülfirik anhidrit	SO ₃	S	0,5-2,5
Alkali Oksit	Alkali	K ₂ O ve Na ₂ O	K+N	< 1

Portland çimentosunun su ile kimyasal reaksiyona girmesi sonucu hidrasyon oluşmaktadır. Bu reaksiyon çimentonun fiziksel özelliklerine ve kimyasal bileşimine bağlıdır. Hızlı gelişmekte olup reaksiyon sonucunda ısı açığa çıkmaktadır. Çimentonun bileşimine göre reaksiyona verilen tepkiler farklı olup Tablo 1.17’de verilmiştir.

Tablo 1.17. Portland çimento hidrasyonu (Fathi, 2012).

Hidrasyon Özellikleri	C₃S (Alit)	C₂S (Belit)	C₃A	C₄AF (Celit)
Reaksiyon hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Yavaş
Isının Açığa Çıkması	Yüksek	Düşük	Çok Yüksek	Orta
İlk günlerdeki dayanım	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük
Uzun günlerdeki dayanım	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

1.6. Uçucu Kül-Çimento Karışımları

Uçucu küller çimento içerisinde ikame malzemesi olarak değerlendirilmektedir. İkame malzeme olarak uçucu küller, belirlenen oran kadar karışımda kullanılan çimento miktarının azaltılıp yerine uçucu kül ilavesi ile oluşturulan karışımları ifade etmektedir. Uçucu külün çimento pastasının performansı üzerine etkilerini değerlendirmek için uçucu kül-çimento karışımı pastalar üretilmiş ve bu pastaların mekanik dayanımlarını arttırmak amaçlanmıştır. Bu amaç için uçucu küller farklı zaman aralıklarında öğütülmüş ve farklı inceliğe sahip malzemeler üretilmiştir. Üretilen farklı inceliğe sahip uçucu küller ile çimentoya belli oranlarda ikame edilmiş ve karışımlar hazırlanmıştır.

1.6.1. Uçucu Küllerin Çimento Pastası Özelliklerine Etkisi

Uçucu küllerin çimento içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılması ile çevresel anlamda ve ekonomik açıdan birçok faydası bulunmaktadır. Özellikle çimentolar içerisinde mineral katkı kullanımıyla, çimento üretimi sırasında harcanan enerji miktarından yüksek oranda tasarruf sağlanmaktadır. Bu tasarruf değeri, 24 gün boyunca bir hane başına düşen enerji miktarına karşılık gelmektedir. Enerji tasarrufunun yanında toprak kirliliğini azaltmada büyük oranda katkı sağlamaktadır. Toprak kirliliğini azaltma oranı ise yaklaşık 450 gün boyunca kişi başına üretilen atık hacmine karşılık gelmektedir. Çimento üretimi sırasında havaya salınan CO₂ gazı miktarı ise yine çimento üretimi sırasında uçucu

külün kullanımı ile azaltılmaktadır. Bu gaz miktarındaki azaltma değeri ise yaklaşık olarak 1 arabanın 2 ay boyunca saldığı CO₂ gazı miktarına karşılık gelmektedir (Rajamma, 2011). Bu yüzden uçucu kül gibi atık malzemelerin geri dönüşüm olarak çevreye kazandırılması ve adapte edilmesi ile hem sosyal anlamda hem de ekonomik anlamda birçok kazanımlar sağlamaktadır (Karthikeyan and Dhinakaran, 2014; Casarez vd., 2018).

Uçucu küller ile üretilen katkılı çimentoların birçok açıdan sağladığı faydalarının yanı sıra çimentonun ve bu çimentolarla üretilen betonların kendi özelliğini iyileştirmesi açısından da farkı yararlar sağlamaktadır. Ancak çimento içerisinde yüksek hacimde uçucu kül kullanmak, çimentonun hidrasyon olayını, priz almasını ve sıkıştırma süresini uzatması ve erken dayanımı düşürmesi ile ilk etapta kullanıma uygun bir malzeme olarak durmamaktadır. Ancak bu durum uçucu külleri öğütme ile puzolanik aktivitesinin geliştirilmesine bağlı olarak değiştirilebilmektedir. Çünkü uçucu külleri öğütme ile artan inceliğe bağlı olarak erken dayanım sürecinde çimento taneleri arasında boşlukları doldurmasına katkı sağlamaktadır. 28 gün ve ilerleyen zamanlarda ise uçucu külün tipine göre puzolanik reaktivitesinin oluşmasına bağlı olarak basınç dayanımında artmasına neden olmaktadır. Bunun yanında öğütmenin etkisi ile iri tane boyutuna (>45 µm) ve boşluklu yapıya sahip tanelerin azalması ile karışımın su ihtiyacını azaltmaktadır. Uçucu küllerin çimento ile reaksiyona girmesi sonucu kalsiyum silika hidratın oluşması, çimento pastası içerisinde bulunan kapiler boşlukları doldurması ile permabilitenin azalmasına katkı sağlamaktadır. İnce tane yapısına sahip uçucu küller, öğütme sonucu camsı yapısının artmasına bağlı olarak puzolanik reaksiyonunun da gelişmesine katkı sağlamaktadır. İnce parçacık boyutuna sahip uçucu kül katkılı betonlarda, betonun gözenekliliği ve geçirimsizliğini azalttığından, kimyasal saldırılara karşı daha yüksek basınç dayanımına sahip betonlar üretmeyi kolaylaştırmaktadır. Örneğin, uçucu kül katkılı çimentolar korozyonlu sıvılara maruz kaldığında, çimentonun kalsiyum hidroksit reaksiyonu boyunca beraber reaksiyona girmesi ile kalsiyum silika hidrat bileşiklerini oluşturmaya ve betonun korozyon direncini arttırmaya katkı sağlamaktadır. Çimento içerisinde uçucu kül kullanımı ile üretilen betonların normal çimentolu betonlara göre korozyonlu sıvılarla reaksiyona girme kabiliyeti daha yüksektir. Küresel ve daha pürüzsüz yapıdaki ince kül taneleri aynı zamanda harcın su ihtiyacını azalttığından işlenebilirlik özelliğini de arttırmaktadır. Çimentonun hidrasyon hızını ve ısını düşürerek özellikle baraj gibi büyük kütle betonlarda oluşabilecek çatlakları azaltıcı etki oluşturmaktadır (Szabo vd., 2017; Rajak vd., 2017).

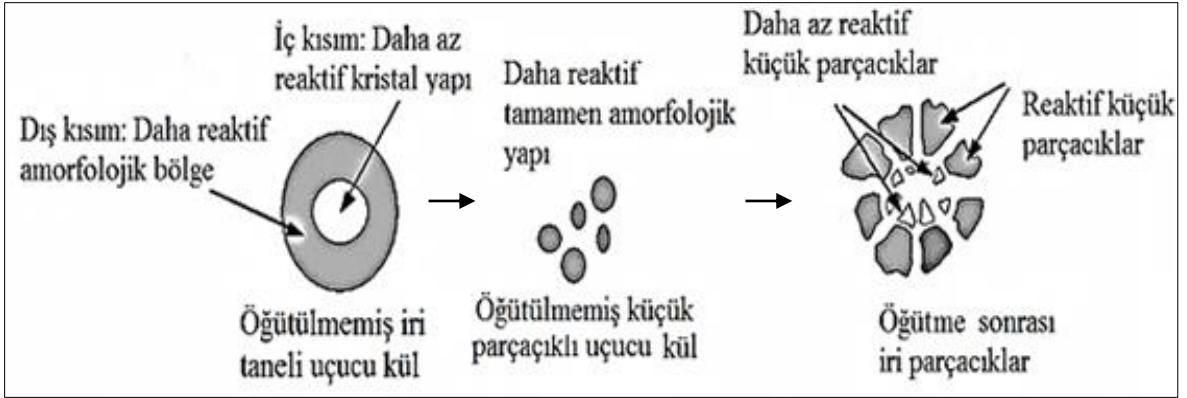
1.6.1.1. Öğütmenin Fiziksel Özellikler Üzerine Etkisi

Uçucu küllerin fiziksel özellikleri, uçucu külü oluşturan tanenin şekli ve yapısı, yoğunluğu ve özgül yüzey alanı (Blaine) olup öğütme ile bir takım değişikliklere uğramaktadır. Öğütme ile uçucu küllerin tane şekli ve yapısı uçucu külün tipine göre farklı şekillerde değişmekteyken, uçucu kül tipine bakılmaksızın yoğunluk ve özgül yüzey alan değerleri ise öğütmenin etkisiyle artmaktadır (Bouzoubal vd., 1997).

1.6.1.1.1. Tane Şekli ve Boyutu Üzerinde Etkisi

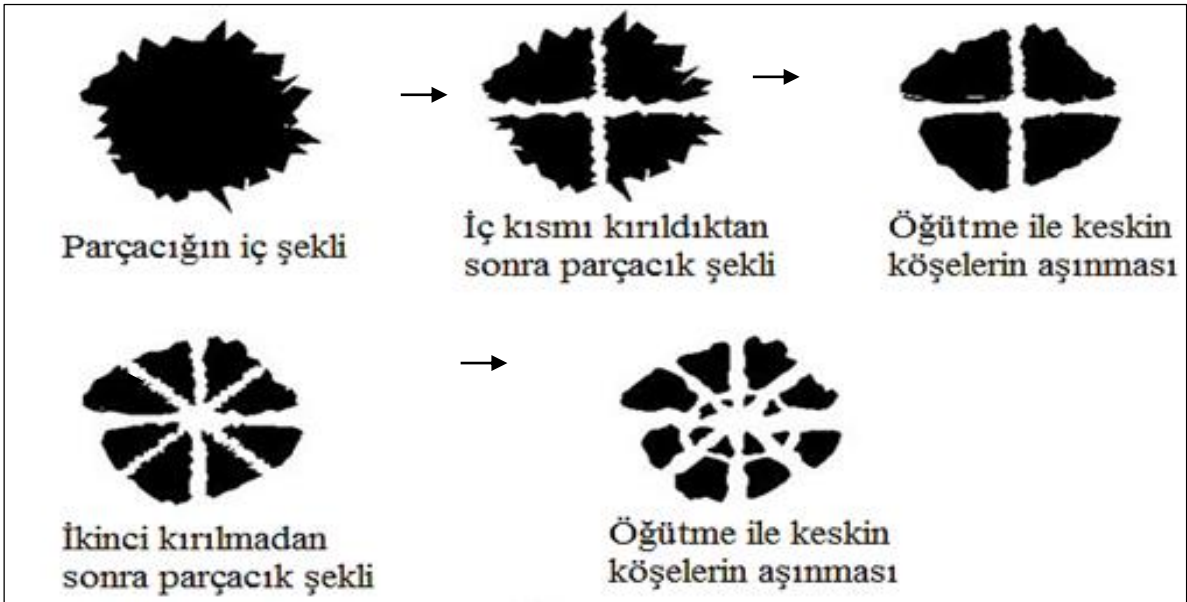
Uçucu küller değişik tane şekli ve yapısına sahiptir. Onlar, camsı küresel şekilli taneciklerden, içi boşluksuz küresel yapılar (katı camsı küre), boşluklu küreler (senosfer, içi boş küreler), büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren (plerosfer) yapılardan oluşmaktadır. Ayrıca yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplanmış (dermasphere) deforme yapılar, yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar gibi çeşitli şekiller halinde de bulunabilirler. Küresel olmayan tanecikler, kömürden gelen ve yanma reaksiyonlarına katılmamış mineraller (kuvars, feldispatlar gibi), düzensiz şekilli ve gözenekli yapılardan (kil kalıntıları, yanmamış karbon gibi) oluşmaktadır (Türker vd., 2009).

Uçucu küllerin tane şekli ve boyutu öğütme ile değiştirilmektedir. Felekoğlu vd., (2009) çalışmalarında uçucu küllerin öğütme ile tane yapısında oluşan değişimleri belirlemişlerdir. Çalışmalarında optimum uçucu kül inceliğinden maksimum dayanım eldesini incelemişlerdir. Araştırmacılar öğütülmüş uçucu kül katkılı çimento karışımları hazırlamışlardır. Çalışmalarında, orijinal ve öğütülmüş uçucu küllerin tane yapısında meydana gelen değişimleri, öğütülmüş yüksek kalsiyumlu uçucu külün dayanım değeri üzerine inceliğin etkisini, iri taneli uçucu küllerin dayanımı öğütme ile geliştirilebilirliğini, öğütülmüş uçucu küller ile hazırlanan harçların su isteği ve dayanım gibi değerlerin uçucu kül inceliğinin değişimi ile olan etkileşimini araştırmışlardır. Orijinal ve öğütülmemiş uçucu külleri karşılaştırdıklarında, öğütülmemiş küçük parçacıklardan oluşan uçucu küller büyük parçacıklardan daha reaktif olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 1.14). Öğütme sonrasında iri taneli uçucu küller küresel şekillerini kaybettiğini, orijinal küçük tanelerden oluşmuş uçucu küller öğütülmüş küçük tanelerden daha reaktif, küresel şekle ve pürüzsüz tane yüzeyine sahip olduğunu tespit etmişlerdir.



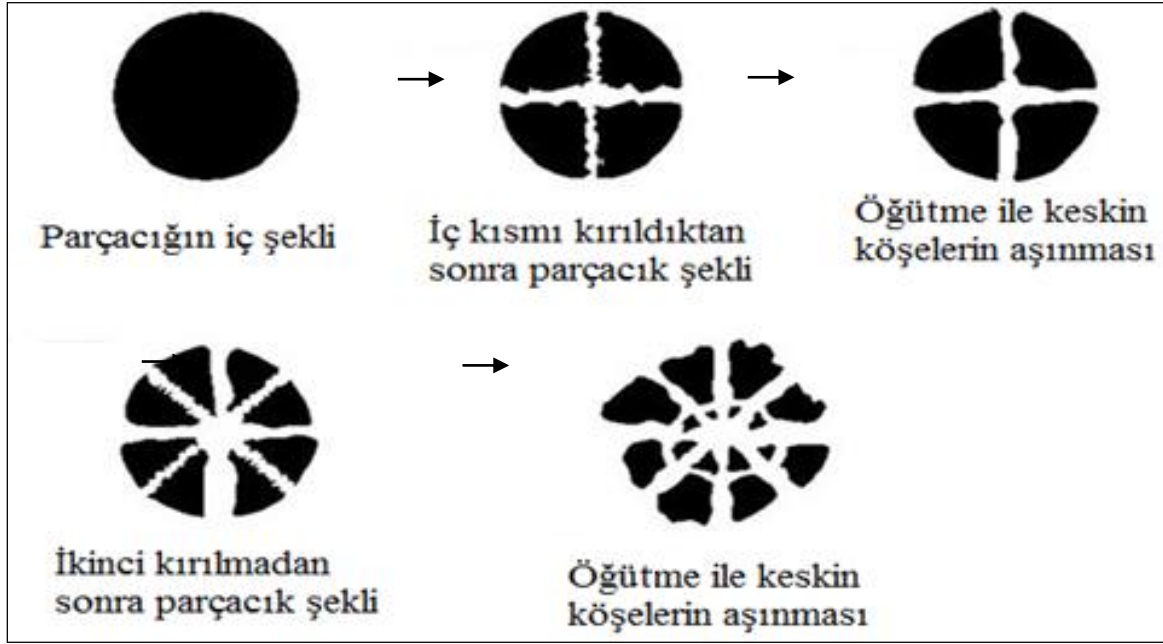
Şekil 1.14. Uçucu kül tanelerinin öğütme ile içyapılarında meydana gelen değişiklikler (Felekoğlu vd., 2009).

Farklı içyapıya sahip uçucu külleri öğütme ile tane yapısında meydana gelen değişim farkı Şekil 1.15 ve Şekil 1.16’da belirgin olarak gösterilmiştir. Şekil 1.15’de içyapıları düzgün olmayan ve pürüzlü yüzey yapısına sahip uçucu küllerin öğütülme ile taneciğinin içyapısında oluşmuş değişiklikler verilmiştir. Düzgün olmayan içyapıya sahip uçucu küllerde öğütülme işlemi devam ettikçe keskin köşeler aşınma sonucu azaldığını belirlemişlerdir.



Şekil 1.15. Öğütme ile parçacık şeklindeki değişiklikler (iç kısım şekli düzensiz (yamuk) ve pürüzlü) (Felekoğlu vd., 2009).

Şekil 1.16'da ise küresel ve pürüzsüz içyapısına sahip tanelerden oluşmuş uçucu külün öğütme ile içyapısında oluşan değişiklik verilmiştir. İçyapısı küresel olan uçucu küllerde öğütülme ile keskin köşelerin oluşmasına neden olmuş, öğütme devam ettikçe keskin köşelerin azaldığı görülmüştür.

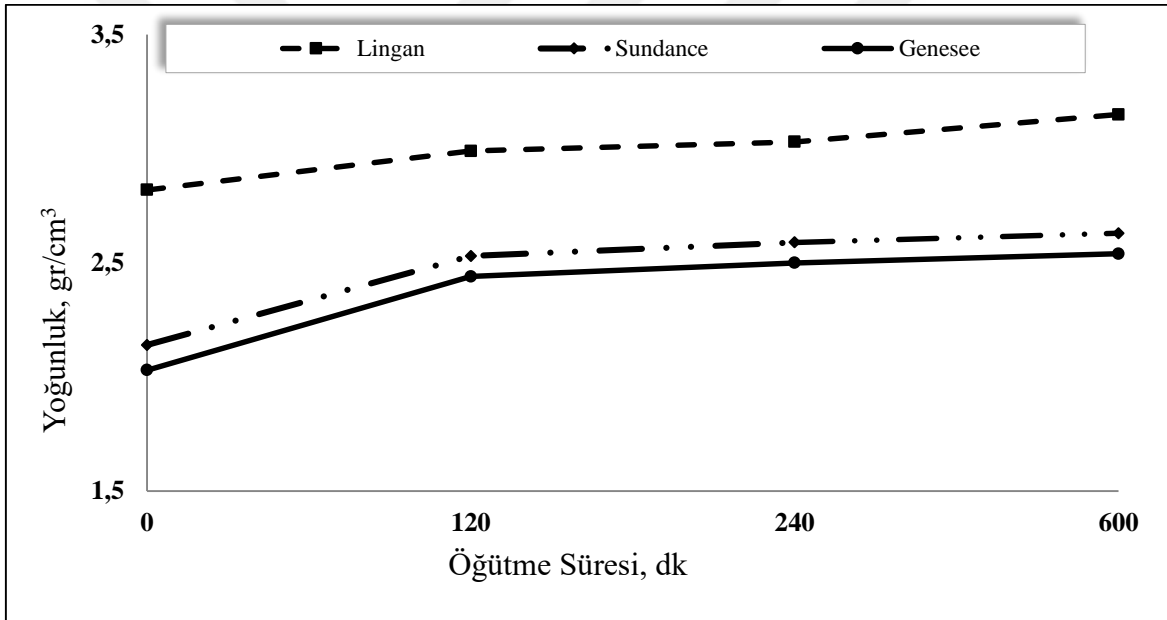


Şekil 1.16. Öğütme ile parçacık şeklinde olan değişiklikler (iç kısım şekli küresel ve pürüzsüz) (Felekoğlu vd., 2009).

1.6.1.1.2. Yoğunluk Üzerinde Etkisi

Uçucu küllerin yoğunluğu, uçucu külün kendine özgü özelliklerine ve öğütme işlemine bağlı olarak değişmektedir. Uçucu küllerin yoğunluk değerleri tanenin şekline, rengine, kimyasal bileşimine ve kömürden gelen yanmamış karbon parçacıkları gibi kendine özgü özelliklere göre değişmektedir. Örneğin, opak renklere küresel tane yapısına sahip hematit ve magnetit elementleri ve açık kahverengi ile siyah renklere sahip uçucu küllerin yoğunluğu daha yüksek değerler almaktadır. Öğütmeye bağlı olarak ise uçucu küllerin yoğunluk değerleri artmaktadır. Öğütme ile küresel büyük boşluklar içeren uçucu kül tanelerinin boşluklarında sıkışmış olarak bulunan gazların açığa çıkması ile yoğunluk değerinin artmasına neden olmaktadır (Gikunoo, 2004). Bouzoubal vd., (1997) yapmış oldukları çalışmalarında farklı kaynaklardan almış oldukları uçucu külleri (Lingan, Sundance, Genesee) farklı zaman aralıklarında (2, 4 ve 10 saat) öğütmüşlerdir. Öğütülmüş

uçucu külleri orijinal durumları ile kıyasladıklarında öğütülmüş uçucu küllerin orijinal durumlarına göre yoğunluk değerlerinin arttığını ifade etmişlerdir. Ancak yoğunluk değerindeki artış belli bir zamana kadar olduğu (2 saat sonrası) bu sürenin sonunda öğütme işleminin yoğunluk değeri üzerinde pek bir etkisinin olmadığını fark etmişlerdir (Şekil 1.17). Bunun sebebi olarak, tane şekli ve yapısı olarak içi boşluksuz küresel yapılar (katı camsı küre), cenospheres(camsı küresel şekilli tanecikler, boşluklu küreler, içi boş küreler), plerospheres (büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar) gibi yapıların genelde nispeten düşük yoğunluk değerine sahip olduğuna bağlamışlardır. Bu şekillere sahip tanelerin öğütme işlemine tabi tutulduklarında belli bir süreden sonra öğütülmeyip ezildiğini tespit etmişlerdir.

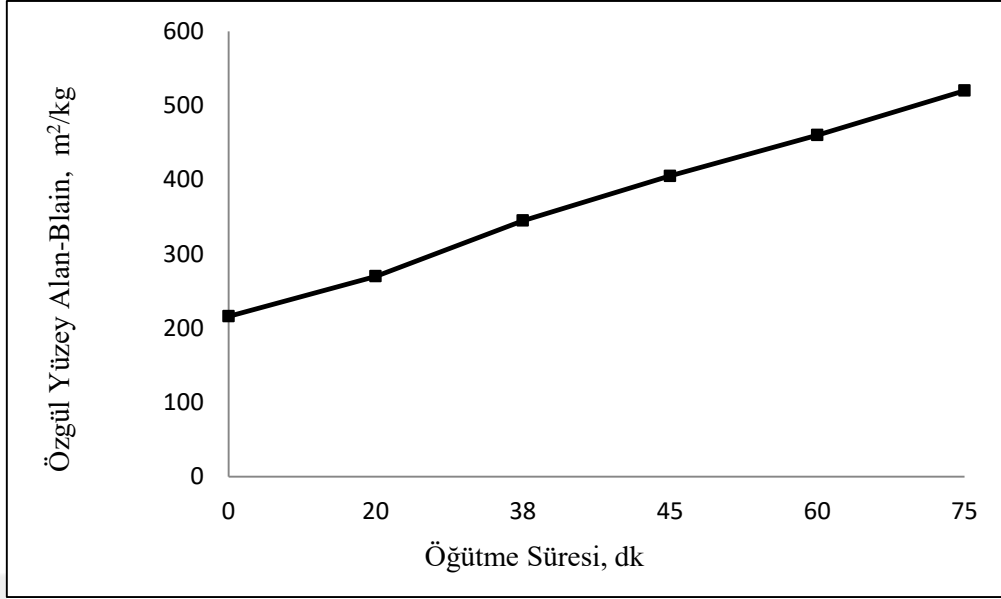


Şekil 1.17. Uçucu küllerde öğütmenin yoğunluk üzerine etkisi (Bouzoubal vd., 1997).

Paya vd., (1995) ise çalışmalarında uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini araştırmışlardır. Uçucu külü 10 ile 60 dk zaman aralıklarında bilyeli değirmende öğütmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, öğütme ile malzemenin incelik değerinin arttığını, 20 dk ve sonrası öğütme süreleri için öğütmenin etkinliğinin kaybolduğunu fark etmişlerdir. Bunun yanında orijinal kül içerisinde içi boşluklu kürelerin bulunmasından kaynaklı öğütme ile yoğunluk değerinin arttığını belirtmişlerdir.

1.6.1.2. Özgül Yüzey Alan (Blain) Üzerinde Etkisi

Çimento ve beton içerisinde kullanılan uçucu külün özgül yüzey alan (blaine) değeri, uçucu kül katkılı çimento ve betonun dayanım özelliklerini değiştirmede etkin rol oynamaktadır. İncelik değeri uçucu küllerde özgül yüzey alanı (blaine) ile temsil edilmekte olup uçucu kül-çimento arasında puzolanik reaktiviteyi etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Özgül yüzey alanı (blaine), uçucu külün oluşum mekanizması ve öğütme işlemi ile değiştirilmektedir. Bu faktörlerin her ikisinde uçucu külün özgül yüzey alanını farklı şekilde etkilemektedir. Örneğin pulvarize edilmiş kömürün yakılması sonucu elde edilen uçucu küller, genelde küresel ve ince tane boyutuna sahiptir. İnce tane boyutuna sahip uçucu küllerin camsı yapısı, iri tane boyutuna sahip küllere göre daha yüksektir. Bunun nedeni fırından ayrıldıktan sonra hızlı bir şekilde soğumasına bağlıdır. Uçucu küllerin iri taneli olması ise kömür içerisinde bulunan yanmamış karbon bileşiminden ileri gelmektedir. Öğütme ile iri tane yapısına sahip uçucu küller ince tane yapısına dönüşmektedir. Öğütülmüş uçucu kül katkılı çimentolarla üretilen betonların özellikleri üzerine uçucu külün öğütme etkisine bakılmıştır. Öğütülmüş uçucu kül katkılı betonların mekanik ve dayanıklılık özellikleri uçucu külü öğütme sonucu geliştirdiğini belirlenmiştir. Son yıllarda, ultra ince uçucu kül, yüksek performanslı betonun gerekli bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Bununla birlikte, uçucu küllerin birçoğu doğada kaba tane yapısına sahiptir. Dolayısıyla beton üretiminde yeterli performans elde etmek için öğütme gereklidir. Öğütme işlemi ile uçucu küllerin elek inceliği, tanecik boyutu ve özgül yüzey alanı gibi özelliklerin de belirgin bir değişiklik olmaktadır (Kiattikommal vd., 2001; Bouzoubal vd., 1997; Dvořák ve Hájková, 2015; Felekoğlu vd., 2009). Hela ve Orsáková (2013), öğütme ile uçucu külleri oluşturan tanelerin yuvarlaklıklarının azaldığı, yoğunluk ve özgül yüzey alanlarının ise arttığını belirtmişlerdir (Şekil 1.18). Paya vd. (1995) ise öğütülmüş uçucu küllerin özgül yüzey alan değerlerinin normal küllere göre daha yüksek olmasını, içi boş küresel ve boşluklu karbon tanelerinin öğütülme ile azalmasına bağlamışlardır.



Şekil 1.18. Öğütme ile özgül yüzey alan değerleri (Hela ve Orsakovà, 2013).

1.6.1.3. Öğütmenin Kimyasal ve Mineralojik Özellikler Üzerine Etkisi

Uçucu küllerin kimyasal bileşimi termik santralde yakılan kömürün özelliklerine ve kazanın yakma tipine göre değişmektedir. Kömürün çeşidine göre linyit ve yarı bitümlü kömürlerin yakılması sonucu elde edilen yüksek kalsiyum içeriğine sahip C sınıfı uçucu küller, kendiliğinden sertleşme özelliğine sahip olduğundan su ile reaksiyona girerek çimento özelliği göstermektedirler. Ayrıca bu kimyasal bileşime sahip uçucu küller yüksek puzolanik özelliğe sahiptirler. Bitümlü kömür ve antrasitin termik santralde yakılması sonucu ise düşük oranda kalsiyum ve yüksek oranda silisyum ve alimünyum bileşimine sahip F sınıfı uçucu küllerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu kimyasal bileşime sahip uçucu kül ise su ile bir araya geldiğinde kendiliğinden çok az ya da hiç sertleşme özelliği göstermez. Ancak puzolanik özellik gösterebilir. F sınıfı uçucu küller ancak belli şartlarda bir araya geldiğinde (ince öğütülme, belli sıcaklık ve nem ile beraber su ile bir araya geldiğinde) sertleşme özelliğine sahiptirler. F sınıfı uçucu küller kimyasal bileşimi bakımından, % 1-12 oranında bulunan kalsiyum bileşimi kalsiyumhidroksit, kalsiyum sülfat ve camsı bileşenler ile silisyum ve alimünyumla bir arada bulunmaktadır. C sınıfı uçucu külde ise kalsiyum oksit % 30-40 oranında bulunmaktadır. C sınıfı uçucu küllerde alkali (sodyum ve potasyum) ve sülfat (SO₄) miktarları F sınıfı küllere göre yüksek oranda bulunmaktadır.

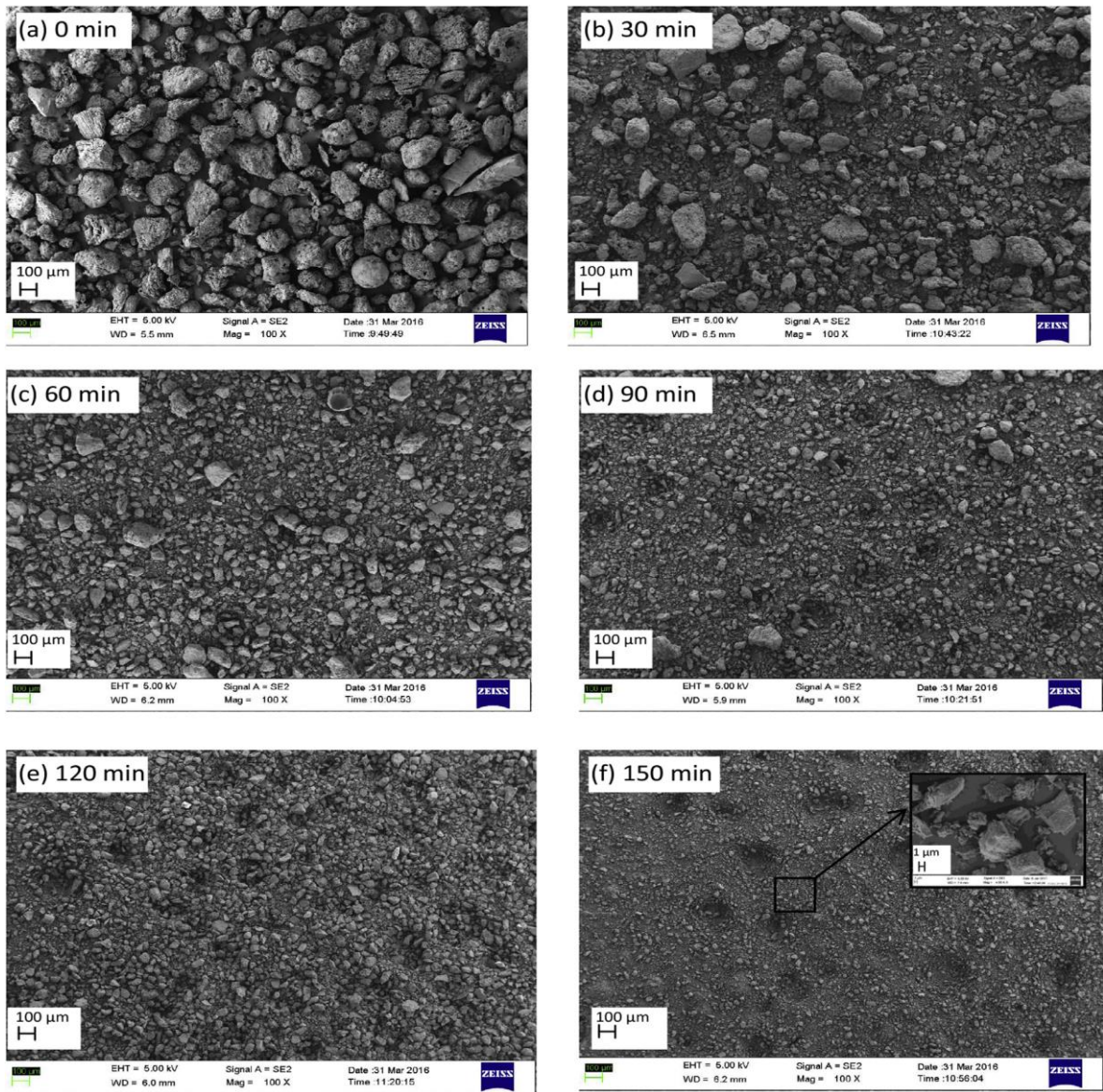
Uçucu küllerin mineralojik bileşimi kömürün jeolojisine, termik santralde yakılma şekline göre değişmektedir. Uçucu küller genel olarak mineralojik bileşimi, kuvars (SiO_2), kaolen [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$], illit [$(\text{K},\text{H}_3\text{O}) (\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})$] ve siderit (FeCO_3), az miktarda da kalsit (CaCO_3), pirit (FeS_2), hematitden (Fe_2O_3) oluşmaktadır. Düşük kalsiyumlu uçucu küllerde kuvars ve mullit kristal şekilde iken bu durum yüksek kalsiyumlu uçucu küllerde ise kuvars, trikalsiyum alimünat (C_3A ya da $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_4$), tetrakalsiyum alimüna ferrit (C_4AF yada $\text{Ca}_4\text{Al}_n\text{Fe}_{2-n}\text{O}_7$) şeklinde bulunmaktadır (Rajamma, 2011).

Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik bileşimi yukarıda da bahsedildiği gibi farklı faktörler (termik santralde yakılan kömürün tipine, yakma tipine, kül toplama sistemlerine) tarafından etkilenmektedir. Ancak bu faktörler arasında öğütme ile ilgili çok fazla bir çalışma olmadığı mevcuttur. Öğütme işleminin uçucu külün kimyasal ve mineralojik bileşimi üzerinde çok fazla bir etkisinin olmadığını Paya vd., (1995) yapmış oldukları çalışmada açıklamışlardır. Çalışmacılar orijinal durumda olan uçucu külü 10, 20, 30, 40 ve 60 dk'a kadar laboratuvarında bilyeli değirmende öğütmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, orijinal ve 60 dk öğütme süresi sonunda yapmış oldukları XRD analizine göre düşük kireç, kuvars, mullit, hematit ve magnetit minerallerinin olduğu ve mineralojik bileşiminin öğütme ile değişmediğini belirtmişlerdir. Ancak uçucu küllerini öğütmenin etkisi ile bağ yapısında olan değişikliğe bağlı olarak, kalsiyum karbonat, kalsiyum oksit ve karbondioksit dönüştüğünden mineralojik bileşiminde çok azda olsa değişiklik olduğunu istisna bir durum olarak ifade etmişlerdir. Bu durumun haricinde öğütme işlemi ile uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik bileşimlerinin değişmeden kaldığını açıklamışlardır.

1.6.1.4. Öğütmenin Morfolojik Özellikler Üzerine Etkisi

Uçucu küllerin morfolojik özellikleri öğütme işlemi ile değişmektedir. Bu değişiklikler farklı tane morfolojisi görüntüleme yöntemleri ile belirlenmektedir. Görüntüleme işlemlerinde uçucu kül taneleri çoğunlukla karmaşık tane boyutundan, sert ve içi boşluklu küresel tanelerden meydana gelmektedir. Paya vd., (1996) çalışmalarında orijinal durumda ve öğütme sonrasında uçucu küllerin iç ve dış morfolojisini SEM analizi görüntülerine göre kıyaslamışlardır. Orijinal durumda uçucu kül tanelerinin küresel, içi boşluklu ve dolu yuvarlak taneler ile düzensiz şekilli, gözenekli ve boşluklu tanelerden oluştuğunu ifade etmişlerdir. 10, 40 ve 60 dk öğütme süreleri sonunda iki tip morfolojik

yapı elde ettiklerini açıklamışlardır. Bunlardan birinin, uçucu küllerin büyük bir kısmının küresel tane yapısında kaldığı ve bu yapısının değişmediğini, diğerinin ise 20 µm ile 100 µm arasında tane boyutuna sahip iki farklı morfolojik yapıda olduğunu tespit etmişlerdir. Bu boyutlar arasında olan taneler ya kabuk şeklinde cenospheres (camsı küresel şekilli tanecikler, boşluklu küreler, içi boş küreler), plerospheres (büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar) yada kısmen sert ve içi dolu (yarı küre, sekizgen şekilli küre) tane yapısında olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca kısmen parçalanmış ve oldukça düzensiz şekilli tane yapılarının da mevcut olduğunu söylemişlerdir (Şekil 1.19).



Şekil 1.19. Orijinal ve farklı zamanlarda öğütülmüş uçucu küllerin SEM görüntüleri; a) 0 dk, b) 30 dk, c) 60 dk, d) 90 dk, e) 120 dk ve f) 150 dk. (Rajak vd., 2017).

Rajak vd., (2017) çalışmalarında 30, 60, 90, 120 ve 150 dk zaman aralıklarında uçucu külü öğütmüşlerdir. Orijinal ve öğütülmüş uçucu küllerin tane çaplarını belirlemişlerdir. Öğütmenin etkisi ile tane çapında azalma yani incelik değerinde artış olduğunu belirtmişlerdir (Tablo 1.18) . Ayrıca farklı zaman dilimlerinde öğütülmüş uçucu küllerin tane yapısında ve şeklinde meydana gelen değişiklikleri SEM analizi görüntülerine göre açıklamışlardır. Bu görüntüler sonucunda öğütme süresindeki artışa bağlı olarak tanelerin daha düzensiz bir yapıda olduğunu tespit etmişlerdir (Kiattikomol vd., 2001).

Tablo 1.18. Öğütme süresine göre tane çapı değişimi (Rajak vd., 2017).

Öğütme süresi, dk	Boyut (d_{32})*, μm
0	134,5
30	69,2
60	54,5
90	38,1
120	23,9
150	13,4
* Hacim-yüzey ortalama çapı	

1.6.1.5. Öğütmenin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi

Uçucu küllerin çimento içerisinde kullanılması ile üretilen karışımın erken ve nihai basınç dayanım değerleri üzerine etkileri farklıdır. Erken dayanım üzerine uçucu küllerin, seyreltici ve filler etkisi, geç dayanım üzerine ise puzolanik etkisi vardır. Uçucu küllerin erken dayanım değerini geliştirmesi üzerine seyreltici etkisi, uçucu külün çimento ile yer değiştirilerek kullanılması ile daha az çimento katkılı karışımlar oluşturması ile ilişkilidir. Geç dayanım değeri üzerine uçucu küllerin etkisi, uçucu külün puzolanik özelliğine bağlı olarak çimento hidrasyonuna katkı sağlayarak ek hidrasyon ürünlerinin oluşmasına etki etmektedir. Uçucu küllerin dayanım değeri üzerine etkisi, uçucu külün tipine, kimyasal bileşimine, tanenin inceliğine ve çimento içerisinde kullanılan miktarına göre değişmektedir. İnce tane yapısına sahip uçucu küllerin çimento içerisinde kullanılması ile çimentonun daha yüksek hidrasyon oranı ve daha erken puzolanik reaksiyon geliştirmeye katkı sağlamaktadır. Kimyasal bileşimi bakımından uçucu küllerin yüksek miktarda kalsiyum içermesi puzolanik reaksiyonun gelişmesini sağlamaktadır. Puzolanik reaksiyonun gelişmesi ile basınç dayanımının artmasına neden olmaktadır. Erken dönemde puzolanik reaksiyonun gelişmesi için kalsiyum hidroksit bileşimine ihtiyaç vardır. Bu bileşik miktarının düşük olması sonucu dayanım gelişiminin uzun süreler almasına neden

olmaktadır (Weng, 1992). Ayrıca uçucu küllerin kimyasal bileşimi bakımından içerisinde silis ve alüminyum bulundurması ile çimento hidratasyonuna ilave C-S-H jelleri oluşturmakta ve dayanımın artmasına katkı sağlamaktadır. Dahası çok ince parçacıklara sahip olması ile filler etkisi oluşturarak betonda oluşan boşlukları doldurmaktadır. Boşlukların dolması ile daha sıkı bir beton oluşmaktadır. Genellikle betonda uçucu kül kullanımı taze betonun işlenebilirliğini arttırmakta, katkı miktarını azaltmakta, hidratasyon ısısını düşürmekte, sertleşmiş betonun geçirimsizlik özelliğini azaltmakta, betonun kimyasal etkilere karşı direncini arttırmakta ve maliyeti düşürerek birçok olumlu katkı sağlamaktadır (Yazıcı ve Arel, 2012).

1.6.1.5.1. Basınç Dayanımı Üzerine Etkisi

Uçucu küller çimento ve beton üretiminde kullanıma uygun bir malzemedir. Bu malzemenin farklı incelik değerinde, oranında ve kimyasal bileşimde olması uçucu kül katkılı çimento ve betonunun dayanımını etkileyen en önemli faktörlerdir. Uçucu küllerde yüksek incelik değeri, öğütme ve sınıflandırma yöntemleri ile elde edilmektedir. Kiattikomol vd., (2001) uçucu kül katkılı çimento harçlarının basınç dayanımı üzerine uçucu külün inceliğinin etkisi araştırmışlardır. Çalışmalarında Thailand'ta 5 farklı kaynaktan aldıkları uçucu küllerin kimyasal bileşimine bakmadan öğütme ile tane boyutunu değiştirmişlerdir. 9 µm'dan daha küçük tane boyutu sahip uçucu kül katkılı 28 günlük harç örnekleri üretmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre ince tane boyutuna sahip uçucu kül katkısı ile hazırlanan harçların 28 günlük dayanım aktivite indeksini % 100 oranında arttırdığını ifade etmişlerdir.

Uçucu küllerin farklı tane boyutuna getirilmesinde sadece öğütme yöntemi değil sınıflandırma yöntemi de kullanılmaktadır. Bu iki yöntem ile farklı tane boyutları, şekilleri ve yapısına sahip uçucu küller oluşturulmaktadır. Örneğin, sınıflandırılmış uçucu küllerde yanma olayı tamamen gerçekleştiği için parçacıklar küresel ve düzgün yüzey özelliğine sahiptir. Öğütülmüş uçucu küllerde ise parçacıkların içerisinde bulunan gözenekli ve pürüzlü yüzey yapısı azaldığından daha yüksek puzolanik aktivitenin oluşmasına neden olmaktadır. Camsı küresel şekilli tanecikler, boşluklu küreler, içi boş kürelerden oluşan tane yapısına sahip uçucu küllerin öğütme ile yoğunluk, incelik ve puzolanik aktivite değerleri artmaktadır. Bu özelliklere sahip ince tane yapısında olan uçucu küller ile hazırlanan katkılı harçların su ihtiyacını azaltmakta, basınç dayanımını ise arttırmaktadır.

Ancak öğütmenin etkisi ile her zaman bu özellikler gelişmemektedir. Bazen düzensiz tane yapısı ve yüzey alanına sahip uçucu küller harç içerisinde kullanıldıklarında harcın su ihtiyacını artırarak basınç dayanımını azaltmaktadır (Aydın vd., 2010). Chindaprasirt vd., (2005) sertleşmiş çimento pastası içerisinde boşlukların boyutu, harcın porozitesi ve basınç dayanımı üzerinde uçucu kül inceliğinin etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında, F tipi uçucu külü öğütme ve sınıflandırma yöntemleri ile iki farklı inceliğe ayırmışlardır. İki farklı incelikteki uçucu külleri çimento içerisinde % 20 ve % 40 seviyelerinde kullanmışlardır. Sınıflandırılmış uçucu kül katkılı harçların basınç dayanımı, sınıflandırılmamış uçucu kül katkılı harçlara göre daha yüksek değerler aldığını ifade etmişlerdir. Öğütmenin etkisi ile yüksek incelikteki uçucu kül ile hazırlanan harçların, orijinal durumda iri taneli harç örneklerine göre erken dayanım değerlerinin daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Öğütülmüş uçucu küller ile daha sağlam ve boşluksuz çimento pastaları oluşturulabilmesi basınç dayanımını arttırmaya katkı sağladığı sonucuna varmışlardır.

Uçucu külün incelik değeri, kimyasal bileşimi ve çimento içerisinde kullanılan ikame oranı, basınç dayanımı üzerine etkisi mevcuttur. Haque ve Kayali (1998) çalışmalarında uçucu küller ile ürettikleri betonlarda daha yüksek erken dayanım ve dayanım değerinin geliştirilmesi için 45 µm elekten % 99 oranında geçen öğütülmüş F sınıfı uçucu külü çimentoda % 10 oranında kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuca göre uçucu kül ilavesi ile hazırlanan numunenin kontrol numunesine göre % 20 oranında basınç dayanımını arttırdığını ifade etmişlerdir. Aydın vd., (2010) ise 290 m²/kg özgül yüzey alan değerine sahip uçucu külü bilyeli değirmende öğütme ile 907 m²/kg özgül yüzey alan değerine sahip uçucu kül elde etmişlerdir. Çimentoya % 20, 40 ve 60 oranında öğütülmüş (GFA20, GFA40 ve GFA60) ve orijinal (OFA20, OFA40 ve OFA60) durumdaki uçucu külleri çimento içerisinde kullanarak ürettikleri harç örneklerin basınç dayanım değerlerini belirlemişlerdir (Tablo 1.19). Elde ettikleri sonuçlara göre, öğütülmüş uçucu kül ikameli numunelerde 28 gün ve daha sonrası günlerde basınç dayanım değerleri kontrol ve orijinal kül ilaveli numunelere göre yüksek değerler almıştır. Öğütmenin etkisi ile uçucu kül, çimentonun hidrasyonunu ve puzolanik aktiviteyi geliştirdiğini, dolgu etkisi yaparak boşlukları doldurması sonucu basınç dayanımını arttırdığını açıklamışlardır.

Tablo 1.19. Farklı ikame oranlarında orijinal ve öğütülmüş uçucu kül katkılı harçların basınç dayanım değerleri (Aydın vd., 2010).

Dayanım süresi, gün	Basınç Dayanımı, MPa						
	OFA0	OFA20	OFA40	OFA60	GFA20	GFA40	GFA60
3	30,4	17,1	8,5	6,0	23,7	21,8	18,1
7	36,7	26,2	16,3	12,0	37,0	31,5	29,4
28	51,6	42,0	31,9	23,2	54,6	54,8	50,9
56	57,2	50,9	39,1	32,6	58,1	58,1	54,3

OFA; normal uçucu kül, GFA; öğütülmüş uçucu kül, 0-20-40-60 çimento yerine kullanılan uçucu kül miktarı

Hsu vd. (2018) çalışmalarında F tipi uçucu külden üç farklı özgül yüzey alan değeri elde etmek için (4610 cm²/g, 5690 cm²/g, and 6300 cm²/g) bilyeli değirmende öğütmüşlerdir. Çimento içerisine ağırlık esasına göre (% 0, % 10, % 15 ve % 20) farklı ikame oranlarında uçucu kül katarak hazırladıkları örneklerin 3, 14, 28 ve 56 günlük basınç dayanım değerlerini belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, ilk 14 güne kadar uçucu kül katkılı numunelerin basınç dayanım değerleri, ileriki yaşlarda elde edilmiş basınç dayanım değerlerine göre düşük olduğunu söylemişlerdir. İlk 3 günlük basınç dayanım değerleri birbirine yakın olduğunu, 28 gün sonra ise katkılı çimentoların basınç dayanım değerleri kontrol numunesine göre yüksek değerler aldığını fark etmişlerdir. Uçucu kül inceliğinin basınç dayanımı üzerine etkisini, 6300 cm²/g ve 5690 cm²/g özgül yüzey alan değerlerinde uçucu külleri çimento içerisine % 15 ve % 20 ikame oranı ile hazırlamış oldukları örneklerin 14, 28 ve 56 günlük basınç dayanım değerlerini karşılaştırmışlardır. Belirledikleri kür süresine göre inceliği daha yüksek olan uçucu kül ikameli örneklerin basınç dayanım değerlerinin daha yüksek olduğunu açıklamışlardır. İnce uçucu kül ikamesinin basınç dayanımını geliştirmeye katkısını, puzolanik aktivitenin daha kolay gelişmesine, harcın boşluk yapısını ve su ihtiyacını azaltmaya, çimento hidratasyonunu geliştirmeye ve filler etkisine bağlamışlardır.

Chindaprasirt vd., (2003) uçucu kül inceliğinin harcın dayanımı, büzülme ve sülfat direnci üzerinde etkisini incelemişlerdir. 1800 cm²/g, 3000 cm²/g, 3900 cm²/g, 4800 cm²/g, 4900 cm²/g ve 9300 cm²/g özgül yüzey alan değerlerine sahip uçucu külleri çimento yerine % 40 oranında ikame ederek harç örnekleri hazırlamışlardır. Hazırladıkları örneklerde en yüksek basınç dayanım ve puzolanik aktivite değerlerini en ince uçucu kül katkılı harçlardan elde etmişlerdir. Uçucu külün inceliğindeki artışa bağlı olarak basınç dayanımında büyük oranda arttığını görmüşlerdir. 90 günlük kür süresi sonunda iri tane

boyutunda ve orijinal uçucu küller ile hazırlanan harçların haricinde yüksek incelik değerine sahip uçucu küller ile hazırlanan harçların basınç dayanımı uçucu kül ilavesiz harçlardan daha yüksek sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

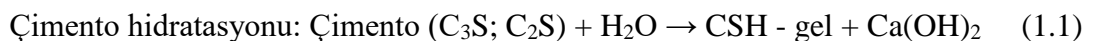
Erdoğdu ve Türker (1998), uçucu kül ilavesiz (sadece çimento) ve farklı inceliklerde düşük ve yüksek kalsiyum içeriğine sahip uçucu kül katkılı harç örnekleri üretmişlerdir. Uçucu külleri 125, 90, 63 ve 45 µm eleklerden geçirmeleri sonucu farklı incelik değerleri elde etmişlerdir. Elde edilen uçucu külleri 6 farklı tane boyutunda gruplandırmış ve çimento yerine % 25 oranında kullanmışlardır. Sonuç olarak, 45 µm'dan daha az incelikteki yüksek kalsiyum içeriğine sahip uçucu kül ilaveli harç örneklerinin basınç dayanım değerleri diğer incelik değerine sahip uçucu kül katkılı harç örneklerine göre yüksek ancak kontrol numunesinden düşük değerler aldığını açıklamışlardır.

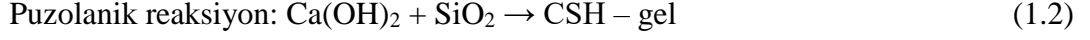
1.6.1.5.2. Puzolanik Aktivite İndeksi Üzerine Etkisi

Puzolanik aktivite indeksi uçucu küllerde, tane boyu, özgül yüzey alanı, tane şekli ve morfolojisi ile mineralojik içeriğine göre değişmektedir. Tane boyutu ise uçucu küllerde öğütme ile artmaktadır. Ancak öğütme yöntemi ile atık malzemenin bir kısmının kullanılması gerisinin ise çevrede depolanmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden öğütme işlemi ile sınıflandırma ve ayırma yöntemlerinin bir arada kullanılması hem puzolanik aktivitenin gelişmesine hemde çevrede depolanan uçucu kül miktarını azaltmaktadır (Mucsi, 2016). Uçucu küllerin inceliğinin yanı sıra alüminyum-reaktif silis içerikli camsı yapıda kimyasal bileşimine sahip olması puzolanik reaktivitesini geliştirmeye etki eden farklı faktörlerden biridir. Kimyasal bileşimi bakımından uçucu külün kalsiyum içeriği puzolanik reaktiviteyi etkileyen önemli bir bileşendir. Örneğin, düşük kalsiyum içerikli uçucu küller puzolanik özellikte iken yüksek kalsiyum içerikli uçucu küller ise hem puzolanik hemde kendi başına bağlayıcılık özelliğine sahiptirler. Uçucu küllerde incelik ve tane şekli (45µm'dan daha küçük küresel tane yapısına sahip) çimento pastasının/harcın sabit bir kıvam miktarı için su ihtiyacını azaltmaya katkı sağlamaktadır. Ayrıca ince tane boyutuna sahip uçucu küller çimento taneleri arasında boşlukları doldurarak daha sıkı bir malzeme oluşturmaya etki etmektedir. İri tane yapısına sahip uçucu küller ise düzensiz ve boşluklu yapıda olmaya daha eğilimli olup buda çimento harcının/pastanın su ihtiyacını arttırmaya neden olmaktadır. Uçucu külden incelik değeri, uçucu külün tane boyu dağılımı ve özgül yüzey alanı ile belirlenmektedir. Uçucu külün 45µm elekten elendiğinde elek

üzerinde kalan miktar ve özgül yüzey alanı ile puzolanik aktivite arasında doğrusal bir ilişki söz konusudur. Katkılı çimento malzemesi olarak betonda uçucu küllerin kullanımı ile kimyasal içeriğine göre çok az çimentolanma özelliği göstermesi ve ince agrega olarak davranması betonun erken dayanımının gelişmesine katkı sağlamaktadır. Ancak nihai dayanım için uçucu kül katkılı betonlar katkısız betonlara göre daha yüksek dayanım değeri vermektedir. Daha yüksek dayanım değeri vermesi, puzolanik reaksiyonun artması sonucu reaksiyon Ca(OH)_2 miktarını azaltarak C-S-H yapısının artmasına neden olmaktadır. Buda dayanımın gelişmesine büyük oranda katkı sağlamaktadır (Abualrous, 2017).

Uçucu külün inceliği, kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri gibi farklı parametrelerin puzolanik aktiviteyi kısa ve uzun dönemde geliştirmektedir. Demir vd., (2008) puzolanik aktiviteye uçucu kül ve çimentonun kimyasal bileşenlerinin etkisini incelemiştir. Çalışmalarında çimento bileşimindeki kalsiyum hidroksit ve puzolandaki alüminosilikatlar arasındaki reaksiyonun hızı ve kapasitesi tarafından etkilendiğine değinmişlerdir. Ayrıca puzolanik reaktivitenin kimyasal bileşenler dışında uçucu külün amorf fazda ve yeterli inceliğe sahip tane boyutunda olması ile geliştirilebileceğini vurgulamışlardır. Puzolanik aktivitenin kısa ve uzun dönem hangi faktörler tarafından etkilendiğini incelemiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre kısa dönem de uçucu külün yüzey alanı, uzun dönemde ise kimyasal ve mineralojik bileşimi tarafından artırılabilirliğini açıklamışlardır. Uçucu külün yüzey alanının öğütme ile artırılması sonucu, orijinal durumda olan uçucu külün su ile temasında kendi başlarına sertleşmediği ancak ince öğütme ile kalsiyum hidroksitle $[\text{Ca(OH)}_2]$ reaksiyona girmeleri sonucu dayanımın artmasına neden olan kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşiklerinin oluşturmasına neden olduğunu söylemişlerdir. Karim vd., (2011) ise uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini, puzolanik aktivite ve dayanımın geliştirilebilirliğini, çimentoda yerleştirme oranı ve inceliğinin harç ve beton örnekleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Uçucu küller normal sıcaklıklar altında sertleşebilmekte ve hidrate olduğunda kristal yapıda mineralojiye sahip olmadığını görmüşlerdir. Çimentonun bileşiminde bulunan Ca(OH)_2 ile uçucu külün amorfolojik camsı yapısı reaksiyona girmesi sonucu klinker hidrasyonunu oluşturan kalsiyum silika hidrat ve kalsiyum silika alüminat bileşimlerini oluşturduğunu söylemişlerdir (Denklem 1.1 ve 1.2).

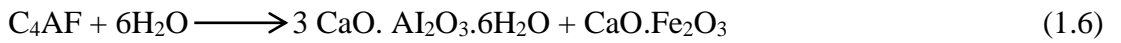




Ancak bu reaksiyonlar uzun dönemlerde ortaya çıktığından kısa dönemde puzolanik aktivitenin gelişmesinin daha yavaş olduğunu, uçucu külü öğütme ile hızlandırılabileceğini ifade etmişlerdir.

1.6.1.6. Priz Süresi Üzerine Etkisi

Çimento ve suyun bir araya gelmesi plastik özelliğe sahip bir malzeme oluşmasına neden olur. Ancak zamanla kimyasal reaksiyon sonucu plastik özelliğini kaybederek sertleşmeye başlamaktadır. Bu olaya priz başlama ve sertleşmenin tamamlanması ile plastik özelliğinin tamamen kaybolduğu süreye ise priz bitiş süresi denilmektedir (URL, 15). Çimento su ile bir araya geldiğinde suyu emer ve sertleşerek basınç karşısında dayanıklı bir malzeme oluşmasını sağlar. Çimentoda priz süresi ve sertleşme olayı çimentonun bileşiminde bulunan bütün bileşiklerin bir dizi kimyasal reaksiyonu sonucu oluşmaktadır. Sertleşme ve priz alma olayı çimentoda bulunan silikat ve alüminat fazların hidrate olması ile meydana gelmektedir. Bu olay ince çimento tanelerinin ilk olarak yüzeyinde başlar (Denklem 1.3, Denklem 1.4, Denklem 1.5, Denklem 1.6).



Hidrate olmuş bileşikler suyun varlığında jel yapısına dönüşmektedir. Çimento içerisinde bazı hidrate olmamış (susuz kalmış) silikat ve alimünat ayrıca hidrolizi (su ile çözünmesi) üstlenmesi ile Ca(OH)_2 , Al(OH)_3 ve silika jeli açığa çıkmasına neden olmaktadır. Jeller, kısmen buharlaştırmayla ve çimento tanesinin susuz çekirdeğindeki hidratlarını oluşturarak, suyunu yavaş yavaş kaybetmektedirler. Jellerin kuruması nedeniyle yüzey sertleşmekte ve çekirdek aşamalı olarak hidrate olmaktadır. Bunu, hidrate olmuş tuzların kristalizasyonu ve silis jeli içerisindeki Ca(OH)_2 bileşiği takip etmektedir. Kristaller silis taneleri ile birbiri içerisine geçer ve sertleşmiş kütle için dayanım vermesini

sağlamaktadır. Ayrıca oluşmuş olan $Al(OH)_3$ boşlukları doldurur ve sertleşmenin oluşmasına yardımcı olur (Saikia, 2000).

Genel olarak ortalama çimentonun priz süresi sınırları, minimum priz başlama süresi 60 dk, maksimum priz bitiş süresi ise 600 dk arasında değişmektedir. Çimentoya uçucu kül ikame edilmesi ile elde edilen katkılı çimentolarda uçucu kül oranının artmasına bağlı olarak priz süresinin uzatmasına neden olmaktadır. Priz süresinin uzaması, oluşan hidrasyon hızını yavaşlatmakta, hidrasyon ısısını ve sıcaklığını düşürdüğünden büzülme durumuna karşı etkili olmaktadır. Ancak bu artış minimum ve maksimum değerleri aşmaması gerekir (Koçak, 2011). Priz süresini uçucu külün uzatmasındaki en büyük rolü, uçucu kül ilavesiz karışım ile uçucu kül ilaveli karışımların aynı kıvam değerinde olabilmesi için yani iki karışım için kıvamın sabit tutulduğunda uçucu küllü karışım daha fazla suya ihtiyaç duymaktadır. Karışıma ilave edilen su miktarının artması priz alma sürelerinin uzamasına neden olmaktadır. Ayrıca uçucu külün yüksek miktarda karbon içermesine bağlı olarak daha fazla su isteğinden dolayı priz alma sürelerini uzatmaktadır (Saikia, 2000). Uçucu küllü çimento içerisinde kullanıldığında priz süresini uzatması üzerine uçucu külün bileşiminin ve miktarının yanı sıra başka faktörlerde etkilemektedir. Bu faktörlerden bir tanesi uçucu külün puzolanik reaksiyonunun etkisidir. Bu reaksiyon çimento hidrasyonu sonucu oluşmuş kalsiyum hidroksit miktarına bağlıdır. Çimento hidrasyonu sonucu puzolanik reaksiyon gelişmesi zaman alıcı olması priz sürelerinin uzamasına sebep olmaktadır. Ayrıca sadece uçucu kül katkılı örneklerin CaO içeriği çimento bileşimine göre düşük olması puzolanik reaksiyonu uzatıcı bir diğer faktör olup buna bağlı olarak priz alma sürelerini de uzatmaktadır (Xiao, 2007).

Uçucu kül katkılı çimentolarla üretilen betonlarda uçucu kül ilavesinin priz süresi üzerine etkisi, uçucu külün bileşimine, tane yapısına, inceliğine, çimento tipi ve miktarına, su/çimento oranına, karışıma ilave edilecek kimyasalın tipine ve miktarı ile betonun sıcaklığına bağlıdır. Kimyasal bileşimi bakımından yüksek kalsiyumlu uçucu küllerin (C tipi) puzolanik aktiviteyi oluşturacak kalsiyum içeriğinin mevcut olmasına bağlı olarak, düşük kalsiyum içeriğine sahip (F tipi) küllere göre priz süresini daha az geciktirici özelliğe sahiptirler. Uçucu kül ilavesi ile priz süresinin uzaması, özellikle yol kaldırımları yapımı sırasında betonun yerleştirilmesinde sıkıntı oluşturmaktadır. Pratikte özellikle soğuk havalarda uçucu kül miktarının belli sınırlarda olması gereklidir (Thomas, 2007).

Uçucu külleri öğütme ile elde edilen farklı incelik değerleri ve çimentoya ikame edilen miktarındaki artışa bağlı olarak hazırlanan uçucu kül katkılı örneklerin katkısız

örneklere göre priz süresini üzerinde uzatıcı etkisi olduğu belirtilmiştir. Choi vd., (2012) çimentoya 4125 cm²/g, 6686 cm²/g ve 9632 cm²/g özgül yüzey alan değerlerinde ve % 0, % 15, % 30, % 45 ve % 60 ikame oranlarında uçucu kül ikameli harç örnekleri hazırlamışlardır. Çalışmalarında uçucu külün inceliği ve ikame miktarının harçların sıcaklık artışı, priz süresi ve dayanım gelişimi üzerine etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre uçucu külün çimento içerisindeki ikame oranı ve incelik değerinin artmasına bağlı olarak priz sürelerini uzattığını gözlemlemişlerdir. Karim vd., (2011) uçucu kül katkılı çimento ile ürettikleri harcın ve betonun basınç dayanımı üzerine uçucu külün farklı incelik değeri ve ikame oranının etkisini incelemişlerdir. Ayrıca uçucu külün fiziksel ve kimyasal özelliklerini, pozolanik aktivitesini, normal kıvamını, priz süresini ve dayanım gelişimi ile beton içerisinde uçucu kül kullanımının avantaj ve dezavantajlarını ortaya çıkarmak için detaylı bir çalışma yapmışlardır. Uçucu külü çimento içerisinde, çimentonun belli bir miktar ağırlığını azaltmak şartı ile kullanıldığında priz süresi üzerine uzatıcı etki oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Uçucu kül katkılı çimento pastasının katkısız göre daha yüksek priz süresi vermesini, çimentodaki trikalsiyumsilikatın (C₃S) sertleşmesine ve erken yaşlarda uçucu kül katkılı pastanın dayanım değerini düşürmeye bağlamışlardır (Tablo 1.20).

Tablo 1.20. Uçucu kül katkılı pastaların normal kıvam ve priz süreleri (Karim vd., 2011).

UK: POÇ İkame oranları (Ağırlığa göre)	Normal Kıvam, %	Priz başlama, h: dk	Priz sonu, h: dk	Referans
00: 100	26,8	1:27	2:45	(Cheerarot ve Jaturapitakkul, 2004)
10:90	27,8	1:44	3:00	
20:80	27,8	1:56	3:15	
30:70	28,1	2:07	3:30	
20:80	25,5	2:42	4:32	(Fu vd., 2002)
44:45*	31,0	6:22	13:41	
51:38*	31,5	4:42	11:52	
65:23*	33,0	5:44	25:54	
00:100	24,7	1:47	2:55	(Kiattikomol vd., 2001)
20:80 ^a	23,4	1:59	3:30	
20:80 ^b	25,1	1:57	2:15	
20:80 ^c	25,2	1:55	2:15	
20:80 ^d	24,4	1:45	2:10	

Not: *Uçucu kül ile klinkere % 4 geri kalan miktar jips katkılı, ^{a, b, c, d} uçucu kül orta tane boyutta, 28.5, 9.0, 5.3 ve 1.9 µm, UK; uçucu kül, POÇ; Portland çimento

1.6.1.7. Kıvam Üzerine Etkisi

Çimento ve katkılı çimento pastalarının standart kıvamı için gerekli olan su ihtiyacı yapılan kıvam tayini (vicat) deneyi ile belirlenmektedir. Kıvam tayini ile taze pastanın uygun işlenebilirliği için gerekli olan su miktarı yüzdesel olarak belirlemeyi sağlar. Bir malzeme için uygun kıvam değerini elde etmek için su miktarındaki değişim o malzemenin dayanım değişimini de etkileyen en önemli etmenlerdir biridir.

Uçucu küllerin mineral karışım olarak çimento ve beton endüstrisinde kullanılması mekanik ve durabilite özellikleri üzerinde olumlu birçok etkisi vardır. Betonda uzun dönem daha yüksek basınç dayanımları ve durabilite ile daha iyi akıcılık (kıvam) sağlamaktadır. Uçucu küllerin betonun birçok özelliğini geliştirmede etkin rol oynaması, sahip olduğu bir takım özelliklerinden ileri gelmektedir. Özellikle harcın kıvamı üzerinde, uçucu külün ince tane boyutunda ve küresel tane yapısında olması kıvamı geliştiren önemli özelliklerindedir. Küresel tane yapısına sahip uçucu küller birbiri üzerinde kolaylıkla hareket ederek daha az sürtünme oluşturmaya neden olmaktadır. Ayrıca bu tane yapısına sahip uçucu küllerle daha iyi sıkıştırma yoğunluğu elde edilmesi mümkündür. Uçucu kül ilavesi ile hazırlanan karışımlarda işlenebilirlik üzerinde, küresel taneler daha düşük su tutma ve daha sonrasında daha az su isteği oluşturmaya katkı sağlamaktadır (Yijin vd., 2004). Uçucu külün küresel tane yapısı ve ince tane boyutunda olması, beton ve harcın su ihtiyacını belirleyen önemli parametreler olduğu ve bunların su ihtiyacı üzerine nasıl bir etki oluşturduğu birçok araştırmacı tarafından detaylı olarak çalışılmıştır. Abualrous, (2017) çalışmasında uçucu külün kimyasal bileşiminden sonra tane boyutu, beton ve harcın su ihtiyacını ve reaktivitesini belirleyen önemli faktörlerden bir tanesi olduğunu ifade etmiştir. 45 µm'dan daha az tane boyutunda ve küresel tane yapısına sahip uçucu küller ile hazırlanan, sabit bir kıvamdaki karışımın su miktarını uçucu külün azalttığını söylemiştir. Çok ince tane boyutuna sahip uçucu küller, karışımda bulunan çimento tanelerinin arasındaki boşlukları doldurarak maksimum sıkışma sağladığını ifade etmiştir. İri tane yapısına sahip uçucu küllerin ise düzensiz ve boşluklu yapıda olmaya daha eğilimli olduğundan söz etmiştir. Tane boyutuna göre uçucu küllerin sınıflandırılması beton ve çimentoda uçucu kül kullanımı ile karışımın performansını arttırmaya katkı sağladığını söylemiştir.

Uçucu kül katkılı çimento pastasının kıvamı için gerekli olan su miktarı uçucu külün yüksek porozitesi ve yüzey alanına, tane inceliğine, tane şekline ve dokusuna, özgül

ağırlığına, organik madde içeriğine bağlı olarak değişmektedir (Saikia, 2000; Shi, 1992). Bu özellikler karışımın işlenebilirliği üzerinde önemli etkileri vardır. İşlenebilirlik ise karışımın yerleştirilmesi ve dayanımın gelişmesinde önemlidir. Karışımın su ihtiyacı uçucu külün yukarıda ifade edilen birçok özelliğine göre artırıcı ve azaltıcı yönde olmaktadır. Düzgün ve camsı dokusu ile küresel tane yapısına sahip uçucu küller ile hazırlanan karışımların akıcılığı arttırarak işlenebilirliği geliştirmekte ve karışımın su ihtiyacını azaltıcı özelliğe sahiptir. Uçucu külün organik madde içeriği olup kızdırma kaybı değeri olarak ifade edilmektedir. Uçucu külde yanmamış karbon içeriği daha fazla boşluklu yapıyı oluşturması ile suyu absorbe ederek karışımın su miktarını arttırmaya neden olmaktadır. 45 µm'dan büyük iri tane yapısına sahip uçucu küllerin tane boyutuna bağlı olarak içerisinde karbon parçacıklarını biriktirmeye daha yatkındır. Uçucu külün tane boyutunun artması karışımda dağıtma ve filler etkisini azalmaktadır. Küresel tane yapısına sahip uçucu kül miktarının azalması ile içsel sürtünme de azalmaktadır. Buna bağlı olarak uçucu kül karışımın su ihtiyacını azaltmaya neden olmaktadır. Uçucu külün yüzey alanının yüksek olması işlenebilirliği etkileyen özelliklerindedir. Bu özelliğin etkisi, ince taneli uçucu küller çimento taneleri arasındaki suyun yerine doldurarak işlenebilirliği arttırmaya ve su miktarını azaltmaya katkı sağlamaktadır. Ancak ince tanelerin yüzey alanının artmasına bağlı olarak işlenebilirlik artarken su ihtiyacını da arttırmaktadır (Wu, 2000). Bu yüzden uçucu külü çimento ya da betonda uygun oranlarda ve özelliklerde kullanılması ile işlenebilirlik geliştirilmektedir (Thomas, 2007). Karim vd., (2011) uçucu kül katkısının çimento pastasının kıvamı üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında çimento pastasını içerisindeki su miktarını kıvam olarak açıklamışlardır. Farklı ikame oranlarında uçucu külün çimento içerisinde kullanımı ile hazırladıkları pastaların uygun kıvam değerleri için gerekli olan su ihtiyacını Tablo 1.20'de verilen değerlerde bulmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre ilk olarak çimento pastasının kıvamı için gerekli olan su miktarı % 26,8 değerinde, uçucu kül ilaveli çimento pastalarının kıvamı için gerekli olan su miktarı ise % 27,8-% 29 aralığında bulmuşlardır. Çimento pastası içerisinde uçucu kül miktarının artışına bağlı olarak kıvamın arttığını tespit etmişlerdir. Kıvam değerindeki bu artışı, ilk olarak uçucu kül içerisindeki bazı parçacıkların yüksek miktarda boşluklu olmasına bağlı olarak suyu emmekte ve daha yüksek su tüketimine neden olduğu şeklinde ifade etmişlerdir. Yüksek boşluk miktarına sahip uçucu küllerin boşluk miktarı öğütme ile azaltılabileceğinden söz etmişlerdir. Pastanın kıvamını arttırmasında uçucu külün etkin rolü, artan yüzey alanına bağlı olarak su ihtiyacını arttırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca

harcın su ihtiyacını etkileyen bir diğer önemli parametrenin uçucu külün iç kısmındaki parçacık şekli karakterizasyonunun etkin rol oynadığını vurgulamışlardır.

Uçucu külleri oluşturan parçacıkların iç kısmı ise bazen küresel ve pürüzsüz, bazende boşluklu ve düzensiz yapılardan oluşmaktadır. Küresel ve pürüzsüz tane yapısında bulunan uçucu küller genelde karışımın su ihtiyacını azaltmaya ve işlenebilirliği geliştirmeye katkı sağlamaktadır. Ancak boşluklu ve düzensiz tane yapısına sahip uçucu küller ise karışımın su miktarını arttırarak dayanım değerini düşürmeye neden olmaktadır. Boşluklu tane yapısına sahip uçucu küllerin karışımın su ihtiyacını azaltması ancak uçucu külleri öğütme ile geliştirilmektedir. Öğütme ile uçucu kül içerisindeki boşlukların azalmasına ve karışımın su miktarını düşürmeye katkı sağlamaktadır. Çimento içerisinde uçucu kül kullanmak pastanın akıcılığını azaltmaktadır. Ancak öğütülmüş kül kullanmak, pastanın reolojik özelliklerini geliştirmektedir. Uçucu külü bazı durumlarda öğüterek çimentoda kullanmak ise harç ve betonunu işlenebilirliği üzerinde negatif etki yaratmaktadır. Hela ve Orsàkovà (2013), çalışmalarında öğütme zamanının su ihtiyacı üzerinde etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, 2 saatlik öğütme sonrası büyük boşluklu yapıya sahip parçacıkların kırılmasıyla boşluklu yapının bir miktar azaldığı, öğütme süresi 4 saate çıkarıldığında herhangi bir etkisinin olmadığı, 10 saatlik öğütme süresinde ise artan düzensiz şekilli parçacıklardan dolayı su ihtiyacında arttığını gözlemlemişlerdir.

1.6.1.8. Genleşme Miktarı Üzerine Etkisi

Çimento içerisinde bulunan MgO ve CaO bileşiklerinin fazla miktarda olması çimento hamuru içerisinde zamanla genleşmeye neden olmaktadır. Genleşme olayı ise betonda çatlak ve hasar oluşumuna sebebiyet vermektedir (Koçak, 2011). TS EN 196-3+A1 standardına göre serbest kalsiyum oksit (CaO) muhtevasını belirlemek için, kütlece % 1,0'den fazla, % 2,5'tan az olan uçucu küller de, karışım oranı kütlece % 30 silis uçucu kül ve % 70 CEM I çimentosu ya da % 30 kalkersi uçucu kül ve % 70 CEM I çimentosu ile hazırlanan karışımların hacim genleşme miktarı 10 mm'yi geçmemesi istenmektedir.

Uçucu küllerde genleşme miktarı uçucu külün kimyasal bileşimi ve tane inceliği ile değişmektedir. Bu iki parametrenin genleşme miktarı üzerine etkisi birçok araştırmacı araştırmalarında incelenmiş ve detaylı bir şekilde açıklamışlardır. Sinsiri vd., (2006) magnezyum sülfat çözeltisine maruz kalmış uçucu kül katkılı çimento harcının genleşme

değeri üzerine uçucu kül inceliğinin etkisini araştırmışlardır. Uçucu külden farklı özgül yüzey alan değerleri ($3215 \text{ cm}^2 / \text{g}$, $4440 \text{ cm}^2 / \text{g}$ ve $5890 \text{ cm}^2 / \text{g}$) elde etmek için sınıflandırma yöntemi kullanmışlardır. Her bir incelik değeri için sırası ile $25,57 \mu\text{m}$, $7,69 \mu\text{m}$ ve $4,81 \mu\text{m}$ tane boyutları elde etmişler ve uçucu külleri CEM I ve CEM V çimentolar içerisine ağırlık esasına dayanarak % 0, % 20, % 30 ve % 40 ikame oranlarında yerdeğiştirerek kullanmışlardır. CEM I çimento bileşimini, klinkerin sadece kalsiyum sülfat ve minör bileşen olarak ağırlıkça en fazla % 0-5 arası mineral katkıdan oluştuğunu ifade etmişlerdir. CEM V çimentosu bileşimini ise hem cüruf (% 18-50) ve hem de puzolan ile uçucu kül (% 18-50) belirlenen sınırlar içerisinde değiştirilerek katıldığı ve bu katılım miktarlarını klinker oranının % 20-64 arasında kalacak şekilde ayarlanarak oluşturdukları kompozite bir malzeme olarak ifade etmişlerdir. Çalışmalarında farklı çimento çeşitleri içerisine ikame ettikleri uçucu küller ile hazırladıkları harç örneklerinin hacim genleşme miktarı üzerine etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda, CEM V içerisine uçucu külü aynı incelik ve yerleştirme oranında kattıklarında CEM I'e göre daha az hacim genleşmesi oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Aynı incelik değerine sahip % 40 ikameli uçucu külün % 20 ve % 30 oranlarına göre daha az hacim genleşmesi oluşturduğunu açıklamışlardır. Uçucu külün ince tane boyutunda olmasının sadece genleşme miktarını azaltmadığını bunun yanında yüksek dayanım değerleri verdiğini de söylemişlerdir. Baharavaru, (2012) ise çalışmasında iri ve ince tane boyutuna sahip uçucu kül ilavesi ile hazırladığı harçların su ihtiyacı ve bazı özellikler üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışmasında, ince tane yapısına sahip uçucu kül ilaveli harç çubuklarını sodyum sülfat çözeltisine maruz bıraktığında, harcın su/bağlayıcı oranını azaltması ve daha az boşluk yapısı oluşturması ile daha dayanıklı yapıların oluşmasına katkı sağladığını ifade etmiştir. İri tane boyuta sahip uçucu külleri kullanarak hazırladığı harç örneklerinde ise su/bağlayıcı oranını artması ile daha fazla su tutulumu ve sonuçta genleşme miktarında da artışa neden olduğunu belirtmiştir. Erdoğan ve Erdoğan (2007) çalışmalarında ince tane boyutuna sahip puzolanın çimento içerisinde kullanımı ile genleşme üzerine etkisini incelemişlerdir. Puzolanın çimento miktarını azaltması ile karışım içerisinde bulunan trikalsiyum alüminat anabileşeni ve alkali bileşenlerinde azalma olduğunu söylemişlerdir. Bu bileşenlerin karışımında az oranda bulunması ile sülfata maruz kaldığında dayanıklılığın artmasına ve alkali-agrega reaksiyonuna bağlı genleşme miktarını azaltmaya katkı sağladığını ifade etmişlerdir. Ayrıca çok ince taneli mineral katkılar betonda boşlukları doldurduğundan

daha az boşluk yapısı, su geçirimsizliği azaltması ile genişleme miktarında azalttığı kanısına varmışlardır.

1.6.1.9. Öğütmenin Mikro Yapı Üzerine Etkisi

Uçucu kül katkılı pastaların özelliklerini belirlemede pastanın mikro yapısının önemli bir rolü vardır. Pasta içerisinde bulunan malzemelerin davranışlarını açıklamak için mikro yapı incelemeleri bir model olup, malzemelerin çeşitli etkiler ve koşullar altında davranışını tahmin etmeye yardımcı olmaktadır. Farklı boşluk boyutunda bulunan su, çimento pastasının özellikleri üzerinde farklı etkilere sahiptir. Sertleşmiş çimento pastasında boşluklar boyutlarına göre kapiler ve jel boşluklardan oluşmaktadır. Kapiler boşluklar serbest su ile doldurulurken, jel boşluklar CSH yapıları ile doldurulmuştur. Çimento pastasında hidrasyon süreci devam ettikçe, kapiler boşluklar fazlaca sulu bileşiklerle (hidratlarla) doldurulduğu zaman bu boşlukların boyutları ve hacmi azalmakta iken, jel boşlukların hacmi ise artmaktadır. Sertleşmiş pastanın basınç dayanımı ilk olarak kapiler boşluklarla ilişkilidir. CSH jelleri hidrasyon ürünlerinin yaklaşık % 70'ini oluşturmakta ve çimento pastasının özellikleri üzerinde baskın bir yapıya sahiptir. Mikro yapı üzerinde uçucu külün etkisi, uçucu kül ve kirecin puzolanik reaksiyonu sonucu oluşmuş hidratlar büyük boşlukları doldurmaya yardımcı olmaktadır. Bu reaksiyon devam ettikçe büyük boşlukların yerini küçük boşluklar alması ile sistemin dayanımının artmasına ve geçirimsizliğinin azalmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca uçucu küllerin puzolanik reaksiyonu pasta içerisinde bulunan boşlukların bir biri ile bağlantısının kesilmesini sağlamaktadır (Weng, 1992).

Uçucu küllerin çimento pastası içerisinde kullanılması ile elde edilen karışımın mikro yapısı üzerine uçucu külün tane inceliğinin etkisi belirlemede farklı yöntemler kullanılmaktadır. Mikro yapı incelemelerinde, sertleşmiş durumdaki uçucu kül karışımli pastaların içerisindeki boşlukların boyutu, dağılımı ve miktarı üzerine uçucu külün inceliğinin etkisi yapılan geçirimsizlik, civa porozimetresi ve termal analizle yöntemleri ile belirlenmektedir. Uçucu küllerde tane inceliğinin ve çimento içerisine ikame edilen uçucu kül miktarındaki artışa bağlı olarak çimento pastasının mikro yapısını geliştirdiğini birçok araştırmacının araştırmalarında elde ettikleri sonuçlara göre destekleyici nitelikte olduğu görülmüştür. Chindaprasirt vd., (2007) uçucu külde inceliğin sertleşmiş katkılı çimento pastasının mikro yapı ve boşluk boyutu üzerine etkisini incelemişlerdir. 300 m²/kg özgül

yüzey alan değerinde ve 19,1 µm tane boyutuna sahip orijinal durumdaki uçucu külden sınıflandırma yöntemi ile 510 m²/kg özgül yüzey alan değeri ve 6,4 µm tane boyutuna sahip uçucu kül elde etmişlerdir. CEM I çimento içerisine ağırlık esasına göre % 0, % 20 ve % 40 oranlarında uçucu kül ikamesi ile katkılı çimento pastası oluşturmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre sertleşmiş çimento pastasının boşluk boyutu önemli oranda, uçucu külün çimento içerisindeki ikame oranı ve ve incelik değeri tarafından etkilendiğini belirtmişlerdir. Orijinal uçucu kül ikamesi ile hazırlanan çimento pastalarının boşluk boyutu uçucu kül ilavesiz pastalara göre azaldığını ifade etmişlerdir. Boşluk boyutunda azalma miktarını uçucu külün inceliğine göre daha fazla olduğunu açıklamışlardır. Ayrıca X-ray diffraction (XRD) analizi sonucuna göre sınıflandırılmış uçucu kül ilaveli pastanın orijinal uçucu kül ilaveli pastaya göre daha fazla Ca(OH)₂ yoğunluğu düşürdüğünü belirtmişlerdir. Scanning electron microscope (SEM) analizi sonucuna göre ise daha ince uçucu kül ile hazırladıkları katkılı sertleşmiş çimento pastasının iri taneli uçucu kül ikamesi ile hazırladıkları pastaya nazaran daha sıkı (boşluksuz) bir yapı sergilediğini ifade etmişlerdir. Wang vd., (2017) mikro tane inceliğinde uçucu külü çimento ile karıştırarak hazırladıkları pasta üzerine uçucu kül inceliğinin etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında farklı su/bağlayıcı (0,35 ve 0,25) oranlarında CEM I 42,5 çimento içerisine % 8 ve % 15 ikame oranlarında uçucu kül kullanmışlardır. Uçucu kül katkılı sertleşmiş pastaların erken dayanım değerini ve SEM görüntüsünü incelemişlerdir. Erken dayanım değerlerinin katkısız çimento pastasına göre düşük, ancak geç dayanım değerlerinin yüksek çıktığını, ayrıca sertleşmiş katkılı çimento pastalarının boşluk yapısı erken günlerde düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Saha (2017) çalışmasında uçucu külün tane yapısının mikro yapı üzerine etkisini incelemiştir. Çalışmasında, çimento yerine % 40 oranında uçucu kül kullanımı ile oluşturduğu 28 günlük betonun mikro yapısını yaptığı SEM analizi ile değerlendirmiştir. SEM analizine göre, bağlayıcı matriksinin boşluklarında ve uçucu kül üzerinde etrenjit iğneleri oluştuğunu ifade etmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda mikro yapı içerisinde küresel uçucu kül tanelerinin bulunması, çimentonun ilk evredeki hidrasyonu ile reaktif olmadığını tespit etmiştir. Beton içerisinde uçucu külün bulunması hidrasyonu azalttığını, küresel tane şekline sahip uçucu küllerin ise betonun zararlı dış etkilere maruz kaldığında yavaş yavaş bozuldu ve etrenjit oluşmasına neden olduğu sonucu ile desteklemiştir. 180 günlük kür süresi sonunda uçucu külün puzolanik reaksiyonuna bağlı olarak, küresel parçacıkların yerini etrenjit aldığını görmüştür. Beton içerisinde agregalar arasındaki boşluklarda çok sayıda etrenjit olduğunu ve bunların marikste boş alanları doldurduğunu

fark etmiştir. Ancak uçucu külün puzolanik reaksiyonu, agregalar arasında etrenjite bağlı olarak boşlukları doldurduğundan uçucu kül katkılı betonlar normal betonlara kıyasla daha yoğun bir bağlayıcı makrikse sahip olduğu sonucuna varmıştır.

1.6.1.9.1. Geçirimsizliğe Etkisi

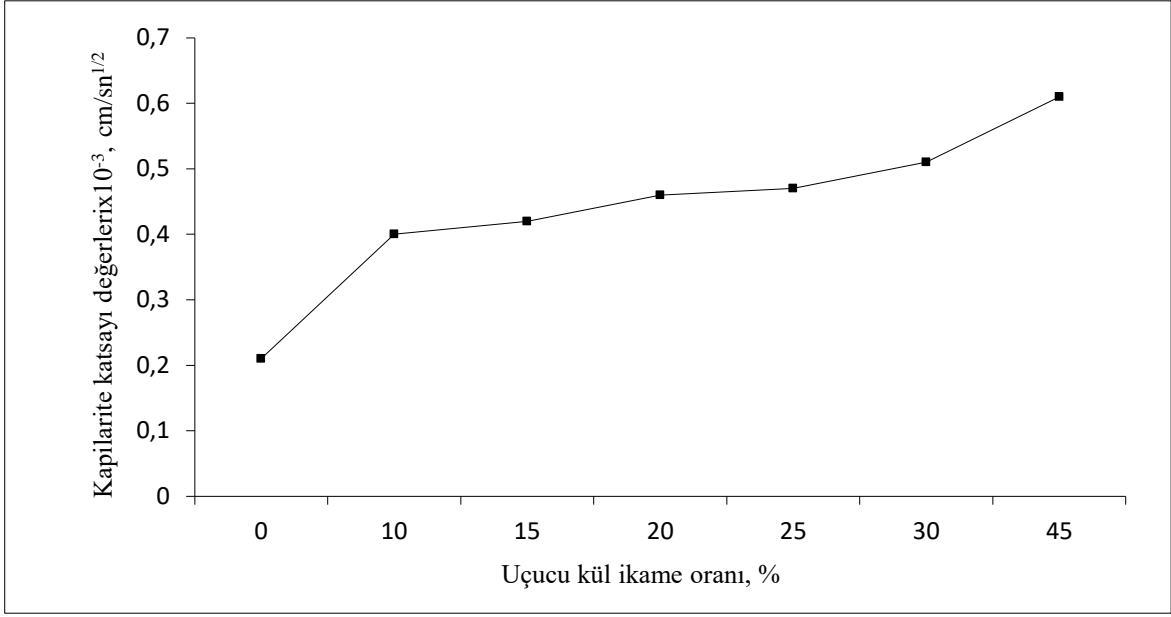
Uçucu küller ile üretilen katkılı pastaların mikro yapısı, pasta üzerine yapılan geçirimsizlik deneyi ile belirlenmektedir. Geçirimsizlik yöntemi üzerine etki eden birçok faktör mevcuttur. Uçucu külü oluşturan tanelerin inceliği, çimento içerisindeki kullanım oranı, tane şekli ve yüzeyi ile pastanın kür süresi bu faktörlerin en başında gelmektedir. Uçucu kül katkılı sertleşmiş pastanın geçirimsizliği TS EN 772-11 standartına göre belirlenmektedir. Bu standartta göre numunenin alt taban yüzeyi suya maruz diğer yan yüzeyleri ise sıvı geçirmez bir malzeme ile kaplanarak numunenin farklı zaman aralıklarında kılcal kanallar yolu ile emmiş oldukları su miktarının, numune üzerindeki ağırlık değişimlerinin ölçülmesi esasına dayanmaktadır.

Uçucu küllerin çimento içerisinde kullanım miktarı arttıkça geçirimsizlik değerini azaltmaktadır. Supit ve Shaikh, (2015) uçucu küller ile ürettikleri betonların geçirimsizlik özelliğini katkısız betonların geçirimsizlik özellikleri ile kıyaslamışlardır. Çalışmalarında beton içerisinde % 40 oranında uçucu kül kullanmaları ile betonun geçirimsizlik hacminin yaklaşık olarak % 6-11 oranında azaltmaya katkı sağladığını söylemişlerdir. Bu durumu uçucu külün çimento hamurunun geçirgenliğini ve agregaların etrafındaki geçiş bölgesini azalttığını ve betonun geçirimsizlik değerini en aza indirmesine bağlamışlardır. Saha, (2017) F sınıfı uçucu kül kullanımı ile hazırladığı katkılı betonların kılcal kanallar yolu ile emmiş olduğu su miktarlarını belirlemiştir. Çalışmasında beton içerisine % 0, % 10, % 20, % 30 ve % 40 ikame oranında uçucu kül kullanımı ile hazırladığı beton örneklerinin 28 gün sonra kılcal kanallar yolu ile emmiş olduğu su miktarlarını belirlemiştir. Uçucu kül ikame oranına göre kılcal su emme değerlerinin (0.097, 0.088, 0.081, 0.073, 0.068 mm min^{-0.5}) azaldığını görmüştür. Numunelerin 6 aylık kür süresi sonunda kılcal su emme değerlerinin ise daha düşük çıktığını fark etmiştir. Kür süresinin uzamasına bağlı olarak kılcal su emme miktarındaki azalmayı, bağlayıcının düzgün bir şekilde hidrate olmasına ve kapiler boşlukları azaltması ile ilişkilendirmiştir.

Çimento içerisinde inceliği yüksek olan uçucu küller ve orijinal durumda uçucu kül katkılı örneklerin kılcal kanallar yolu ile emmiş oldukları su miktarı birbirinden farklıdır.

İnce tane yapısına sahip uçucu kül katkılı örneklerin su emme oranları orijinal kül katkılı ve katkısız örneklere göre düşük değerlerdedir. Hsu vd., (2018) F sınıfı uçucu külü bilyeli değirmende $4610 \text{ cm}^2/\text{gr}$, $5690 \text{ cm}^2/\text{gr}$ ve $6300 \text{ cm}^2/\text{gr}$ özgül yüzey alan değerleri elde etmek için öğütmüşlerdir. Her bir incelik değerine sahip uçucu külleri çimento içerisinde % 0, % 10, % 15 ve % 20 ikame oranlarında kullanarak hazırladıkları harç örneklerinin su emme değerlerini uçucu kül katkısız harç örneğine göre kıyaslamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre uçucu kül katkılı çimentolarla hazırlanan harçların sadece çimento katkılı harca göre daha az su emme özelliğine sahip olduğunu görmüşlerdir. Katkılı çimento harçlarının su emme değerleri % 8,1'den % 8,77 kadar iken sadece çimento katkılı harcın % 8,87 bulmuşlardır. Uçucu kül kullanımı ile hazırladıkları harç örneklerinin su emme değerini azalmasını, uçucu külü oluşturan tanenin boyutuna, küresel yapısına ve pürüzsüz yüzey özelliğine sahip olmasına bağlamışlardır. İncelik değeri $4610 \text{ cm}^2/\text{g}$ (ikame oranı, 4F10, 4F15 ve 4F20) olan uçucu kül katkılı çimentolar, incelik değeri $5690 \text{ cm}^2/\text{g}$ ve $6300 \text{ cm}^2/\text{g}$ (5F10, 5F15, 5F20, 6F10, 6F15 ve 6F20) olan katkılı çimentolara göre daha fazla su emme özelliğine sahip olduğunu görmüşlerdir. Ancak incelik değeri $5690 \text{ cm}^2/\text{g}$ olan katkılı harçların su emme değeri $6300 \text{ cm}^2/\text{g}$ incelik değerine göre daha düşük olduğunu fark etmişler ve bu durumu basınç dayanım değerleri ile olan ilişkisine bağlamışlardır. Aslında katkılı çimento harçlarının su emme değerlerini, uçucu külün ikame oranının artmasına bağlı olarak azaldığını ifade etmişlerdir. Uçucu külün inceliğine bağlı olarakta su emme değerlerinin azalmasını ise uçucu kül incelidikçe yüzey alanının artmasına ve boşluklu parçacıkların azalması ile ilişkilendirmişlerdir. Naganathan ve Linda (2013) uçucu küllerin inceliğinin ve ikame oranının harçlarda normal ve kılcal kanallar yolu ile su emme değeri üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları çimentonun $4500,27 \text{ cm}^2/\text{g}$, orijinal uçucu külün $6477,93 \text{ cm}^2/\text{g}$ ve Los Angeles cihazı ile uçucu külü 8 saat öğütme ile $10703,54 \text{ cm}^2/\text{g}$ özgül yüzey alan değerleri elde etmişlerdir. Çimento içerisine % 0, % 10, % 20, % 30 ve % 40 oranında uçucu kül ikamesi ile hazırladıkları harçların 28 günlük kür süresi sonunda farklı su emme değerlerini belirlemişlerdir. Sonuç olarak uçucu külün incelik değeri ve çimentoya ikame edilen oranı arttıkça, normal yollarla ve kılcal kanallarla su emme değerlerinin sadece çimento katkılı harca göre düşük olduğunu görmüşlerdir. Uçucu külün inceliğinin artmasına bağlı olarak hacimde artmakta ve çimento harcının boşluklarını doldurarak daha sıkı ya da boşluksuz bir malzeme oluşmasına katkı sağlaması ile harcın su emmesine engel olduğunu açıklamışlardır.

Mikro yapı incelemelerinde uçucu külün inceliği, çeşiti, oranı gibi faktörlerin geçirimsizliği azaltıcı etkisi mikro yapıyı geliştirmesi için önemli faktörler arasında yer almaktadır. Ancak bu faktörlere ilave olarak hazırlanan örneklerin kür süresinin uzatılması geçirimsizliği azaltarak mikro yapıyı güçlendiren faktörlerden biridir. Bu faktörün mikro yapı üzerine etkisi, uçucu külün uzun kür süresi ile puzolanik reaksiyonunun gelişmesi ve bu reaksiyon sonucu boşlukları dolduracak ek yapılar oluşturması ile geçirimsizlik değerini azaltıcı etki oluşturmaktadır. Birçok çalışmada uzun kür süresinin mikro yapıyı geliştirdiği yönünde destekleyici sonuçlar elde edilmiştir. Zelinkova ve Ondova (2015) orijinal ve öğütülmüş uçucu kül ile hazırladıkları jeopolimer harçların 7 ve 90 günlük su emme, görünür porozite ve kılcal su emme özelliklerini incelemiştir. Orijinal uçucu külün özgül yüzey alan değeri $3920 \text{ cm}^2/\text{gr}$ iken 60 dk öğütme sonrası $14600 \text{ cm}^2/\text{gr}$ değerinde bulmuşlardır. Sonuç olarak en yüksek su emme, porozite ve kılcal su emme değerlerini en düşük basınç değerlerinde ve 7 günlük kür süresi sonunda elde etmişlerdir. 90 günlük kür süresi sonunda, örneklerin daha yoğun, sert ve kristal yapıda olması boşluk boyutu ve miktarını azalttığını görmüşlerdir. Karahan (2006) çalışmasında beton içerisine % 10, % 15, % 20, % 25, % 30 ve % 45 ikame oranlarında ve $2900 \text{ cm}^2/\text{gr}$ inceliğine sahip F sınıfı uçucu kül ve $2800 \text{ cm}^2/\text{gr}$ inceliğe sahip çimento kullanılarak $40 \times 40 \times 160$ mm boyutunda prizmatik numuneler üretmiştir. Bu numunelerin 28 günlük kür süresi sonunda kılcal kanallar yolu ile emmiş oldukları su miktarlarını belirlemiştir. Bunun için numuneleri önceden belirlemiş olduğu sürelerde (1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64 ve 81. dakikalarda) standartlara uygun şekilde su içerisinde bekleterek ağırlık miktarlarında meydana gelen değişimlerini ölçmüştür. Ölçüm sonucunda elde ettiği ağırlık değerlerini kılcal su emme formülünde yerine yazarak kılcal su emme katsayı değerlerini hesaplamıştır. Betona katmış olduğu uçucu kül miktarının artması ile kapiler su emme katsayısında arttığını görmüştür (Şekil 1.20).

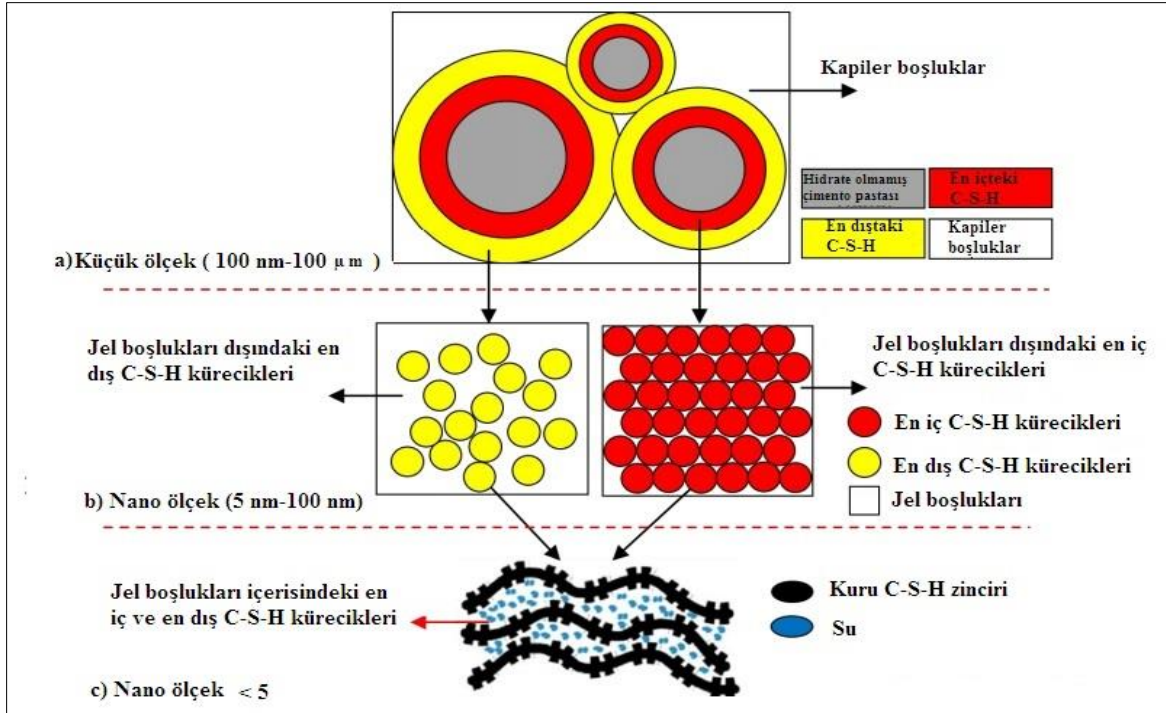


Şekil 1.20. Uçucu kül ikamesinin betonda kapilarite katsayısına etkisi (Karahana, 2006).

Kontrol betonun kılcal su emme katsayısını $0,21 \times 10^{-3} \text{ cm/sn}^{1/2}$ bulmuştur. Farklı ikame oranlarındaki uçucu küllü betonların (% 10, 15, 20, 25, 30 ve 45) kılcal su emme katsayı değerlerini ise sırasıyla 0.40, 0.42, 0.46, 0.47, 0.51 ve $0.61 \times 10^{-3} \text{ cm/sn}^{1/2}$ hesaplamıştır.

1.6.1.9.2. Porozite Üzerine Etkisi

Boşluk oranı genellikle çimento ve beton karışımlarında gözenek boyut dağılımını ölçüm esasına dayanan civa porozimetre yöntemi kullanılarak belirlenmektedir. Bu yöntemle, malzemeyi ıslatmayan akıcı bir sıvının basınç yardımıyla boşluklara yeteri kadar nüfuz etmesi ile ölçülmektedir. Ayrıca bu yöntem sayesinde malzemenin toplam, serbest erişilir ve hapsolmuş boşluk miktarında hesaplamaya yardımcı olmaktadır (Çavuşoğlu, 2013). Çimento pastası içerisinde boşluk boyutu nanometreden mikrometreye göre sıralanmış olup boşluk yapısı jel ve kapiler olmak üzere iki kısımdan oluşmuştur (Şekil 1.21).



Şekil 1.21. Çimento pastasının boşluk yapısı (Gao vd., 2015).

Boşluk yapısı çimento temelli bazı malzemelerin basınç dayanımı, geçirimsizlik ve durabilite özellikleri üzerinde büyük etkisi vardır. Kapiler boşluklar başlangıçta su ile doldurulmuş boşluk kalıntıları olarak düşünülmekte, jel boşluklar ise C-S-H'nin esas bir parçası olarak tanımlanmaktadır. Çimento pastasının boşluk yapısı, toplam porozite, boşluk boyutu dağılımı ve boşluk ağının bir biri ile bağlantısından oluşmuştur. Toplam porozite ve boşluk boyutu dağılımı civa porozimetresi (mercury intrusion porosimetry -MIP) ile belirlenmekte olup kapiler ve jel boşluk çapları birbirinden farklıdır (Tablo 1.21). Kapiler boşluklar 10 nm'dan daha büyük iken jel boşlukları 10 nm'dan daha küçüktür (Gao vd., 2015).

Tablo 1.21. Hidrata olmuş çimento pastasının boşluk boyut dağılımı (Gao vd., 2015).

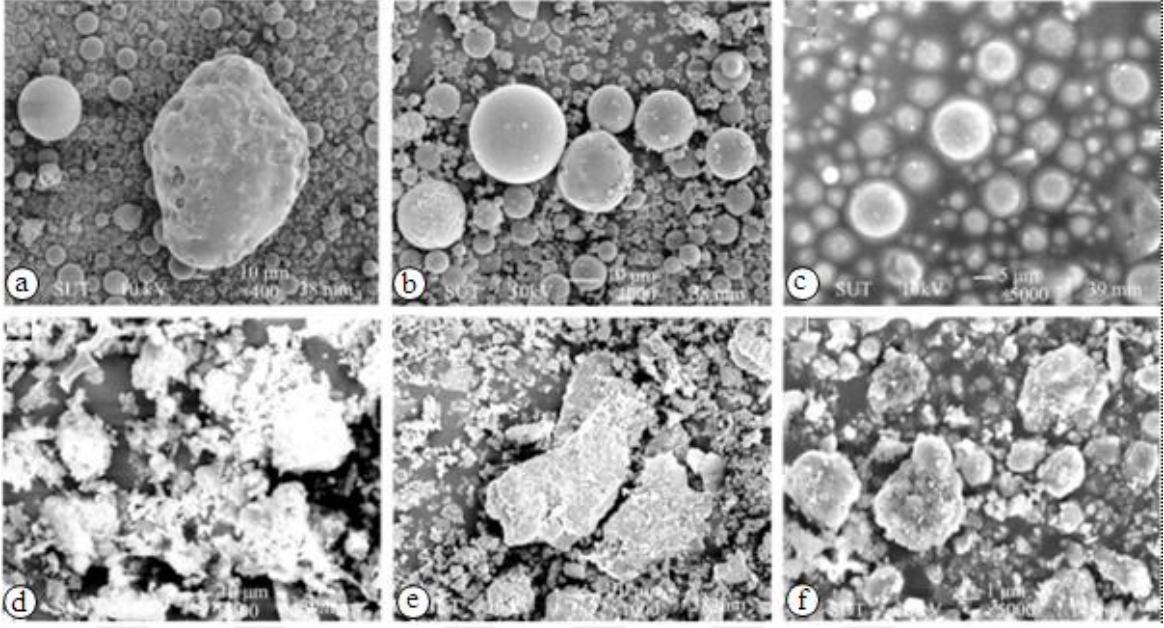
Boşluk Çeşiti	Boşluk Boyutu	Açıklama
Kapiler Boşluklar	10-0,05 μm	Büyük boyutta boşluklar (makro boşluklar)
	50-10 nm	Orta boyutta boşluklar
Jel Boşluklar	10-2,5 nm	Küçük izole edilmiş boşluklar
	2,5-0,5 nm	Mikro boşluklar
	≤ 0,5 nm	İç tabakadaki boşluklar

Çimento içerisinde kullanılan uçucu küller ile hazırlanan örnekler üzerinde, uçucu külün inceliğinin, çimento içerisinde kullanılan ikame oranının ve hazırlanan örneğin kür süresinin artmasına bağlı olarak boşluk miktarını azaltıcı bir etkisi vardır. Hsu vd. (2018) F sınıfı uçucu külü farklı özgül yüzey alan değerlerinde ($4610 \text{ cm}^2/\text{gr}$, $5690 \text{ cm}^2/\text{gr}$ ve $6300 \text{ cm}^2/\text{gr}$) ve ikame oranlarında (% 0, % 10, % 15 ve % 20) çimento içerisinde kullanmaları ile 56 günlük kür süresi sonunda katkısız ve katkılı çimento harçlarının boşluk hacmini ve boşluk çapını karşılaştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada uçucu küllerde incelik değerinin ve ikame oranının artması ile civanın boşluklara nüfus etmesinin daha az olduğunu belirtmişlerdir. Harç içerisinde uçucu kül ikame oranının artmasına bağlı olarak toplam boşluk hacmini azaltmasını, uçucu küllerin ince tane yapıda olması ile boşlukları doldurma özelliğine ve yüksek puzolanik aktivite değerine bağlamışlardır. Ayrıca $5690 \text{ cm}^2/\text{g}$ inceliğinde % 10, % 15 ve % 20 ikame oranlarında uçucu kül katkılı harçların toplam hacimleri sırası ile % 10,81, % 16,89 ve % 20,53 azaldığını hesaplamışlardır. Civanın nüfus ettiği toplam hacim uçucu külde artan incelik değerine göre daha az olduğunu belirtmişlerdir. Ancak incelik poroziteyi sınırlı oranda geliştirebildiğini görmüşlerdir. Bu durumun ana nedeninide puzolanik aktivite reaksiyonunun gelişmesinde yeterli miktarda Ca(OH)_2 olmamasına bağlamışlardır.

Singh vd., (2018) çalışmalarında C tipi uçucu kül kullanmışlardır. Çimentonun ve C tipi uçucu külün özgül yüzey alan değerlerini sırasıyla $3100,43 \text{ cm}^2/\text{g}$ ve $5502,62 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak bulmuşlardır. Uçucu külü çimento içerisinde ağırlık esasına göre % 0, % 10, % 20, % 30, % 40 ve % 50 ikame oranlarında kullanmışlardır. Çimentoya uçucu kül ikame etmeleri ile hazırladıkları pastaların boşluk yapısı ve oranı ile geçirimsizlik özelliği üzerine, uçucu külün çimento içerisinde kullanım oranı, şekli ve incelik değerinin etkisini incelemiştirlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, uçucu külün incelik ve çimento içerisindeki ikame oranı arttıkça çimento pastasının geçirimsizlik miktarının azaldığını görmüşlerdir. Çimento pastasının boşluk yapısı ve geçirimsizliğin azalmasını, uçucu külün ince tanelerinin boşlukları doldurmasına, uçucu külün puzolanik reaksiyonuna, çimentonun hidrasyon özelliklerine, ince malzemelerin bir araya gelerek boşlukları doldurması ve kür süresinin artmasına göre değiştiğine bağlamışlardır. Çimento pastasının geçirimsizlik özelliği uçucu kül katkılı pastaya göre aynı porozite değerinde daha yüksek olduğunu, çimento yüzeyinin ve şeklinin düzensiz olması ile ilişkilendirmişlerdir. Çünkü uçucu küller pulvarize edilmiş kömürün uygun bir şekilde yakılması sonucu küresel ve düzgün yüzeylere sahip tanelerden oluşması ile ince parçacıkların iyi bir sıkışma özelliği gösterdiğini ifade etmişlerdir. Uçucu

küllerde puzolanik aktivitenin, geçirimlilik ve boşluk oranı üzerine etkisini incelediklerinde ise, puzolanik aktivitenin daha uzun süreler sonunda boşluk miktarını azalttığını ve uçucu külün incelik değerindeki artışa bağlı olarak puzolanik aktiviteyi arttırmaya katkı sağladığını açıklamışlardır. Çünkü çimentoya göre daha ince tane boyutuna sahip uçucu küllerde, ince parçacıklar daha iyi sıkışması, uçucu külün puzolanik aktivitesi ve çimento hidrasyonunun etkin bir şekilde bir arada işlemesi ile pastanın porozite ve geçirimlilik özelliğini azalttığını görmüşlerdir. Kür süresininin uçucu kül katkılı çimento pastası geçirimlilik ve boşluk yapısı üzerine etkisini ise ince tane boyutuna sahip uçucu küllerin artan kür süresine bağlı olarak çimento hidrasyonunun artması ile azaldığı yönünde ifade etmişlerdir. Bu durumun, ince malzemenin parçacık şekli, incelik, ikame oranı ve puzolanik aktivitenin derecesi bağlı olarak değişmesi ile ilişkilendirmişlerdir.

Sinsiri vd., (2010) uçucu külün incelik değerinin ve tane şeklinin çimento pastasının boşluk yapısı ve geçirimlilik özelliği üzerine etkisini incelemişlerdir. İki farklı kömür külü (biri ince öğütülmüş kömür (PCC) uçucu külü diğeri akışkan yatak kömür uçucu külü (FBC) üç farklı incelik değerinde çimento içerisinde % 0, % 20 ve % 40 ikame oranlarında kullanmışlardır. Karışımda ince öğütülmüş kömür külünün özgül yüzey alan değerlerini 1650 m²/ kg, 2100 m²/ kg ve 3150 m²/ kg olarak bulmuşlardır. Akışkan yataklı kömür külün ise 8200 m²/ kg, 11200 m²/ kg ve 13250 m²/ kg ile çimentonun incelik değerini ise 1300 m²/ kg olarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre pastanın boşluk yapısı ve geçirimlilik özelliği, uçucu külün tane şekli, inceliği ve çimento içerisine ikame edilen uçucu kül miktarına bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca akışkan yataklı kömür uçucu külü ile oluşturulan pastanın boşluk ve geçirimlilik değerleri pulvarize edilmiş kömür uçucu kül katkılı pastalara göre daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Bu durumu, akışkan yataklı kömür külünün tane şekli ve yüzeyinin düzensiz, pulvarize edilmiş kömür külünü oluşturan tanelerin ise küresel ve düzgün yüzey özelliğine sahip tanelerden oluşması ile ilişkilendirmişlerdir (Şekil 1.22)



Şekil 1.22. Değişik kömürlerden elde edilen uçucu küller; öğütülmüş kömür külü, a) iri, b) orta, c) ince taneli uçucu küller, akışkan yataklı kömürün külü, d) iri, e) orta, f) ince taneli uçucu küller (Sinsiri vd., 2010).

Boşluk oranı uçucu külün çimento içerisindeki ikame oranına göre arttığı ancak incelik artışına göre azaldığını saptamışlardır. İnceliğe bağlı olarak boşluk oranının azalmasını ince parçacıkların sıkışma özelliğinin iyi olmasına bağlamışlardır.

1.6.1.9.3. Hidratasyon Üzerine Etkisi

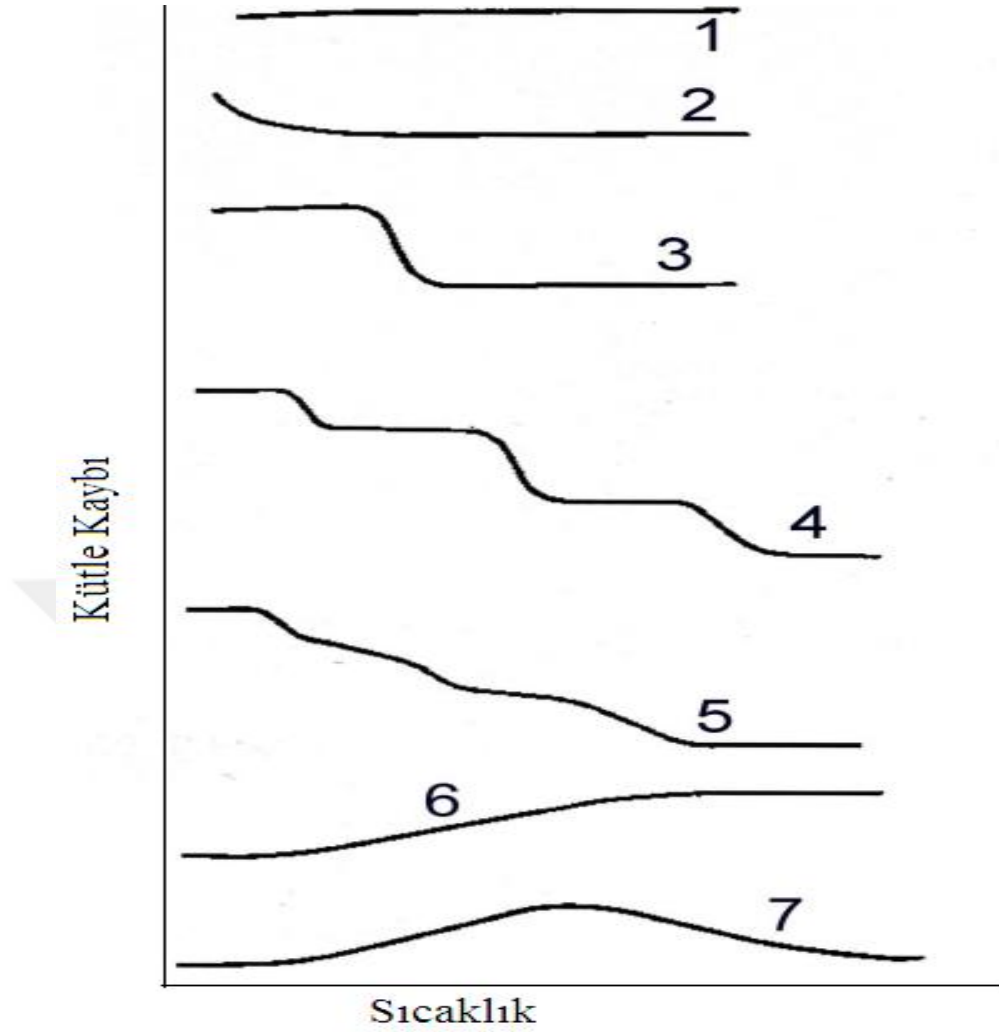
Sertleşmiş çimento pastası içerisinde Ca(OH)_2 miktarı, kireçle puzolan arasında puzolanik reaksiyonun gelişmesi için farklı zamanlarda karışım içerisindeki serbest Ca(OH)_2 miktarının belirlenmesi ile gösterilebilir. Sertleşmiş çimento pastası içerisindeki Ca(OH)_2 içeriğinin belirlenmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Termal analiz yöntemi de bunlardan bir tanesidir. Bu yöntemle, sertleşmiş çimento pastası ısıtıldığı zaman, ilk olarak boşluklar içerisindeki serbest su buharlaşmaktadır. Bu durumu hidratasyon ürünlerinin dehidratasyonu takip etmektedir. $400\text{ }^\circ\text{C}$ üzerindeki sıcaklıkta Ca(OH)_2 bozunmaya başlayarak CaO ve H_2O dönüşmektedir. Su yüksek sıcaklıkta buharlaşması ile ağırlık kaybı oluşturmaktadır. Örnek içerisindeki Ca(OH)_2 miktarı suya göre ağırlık kaybının kaydedilmesi ile hesap edilmektedir. Elektromanyetik bir alana örnek bırakıldığı zaman lineer bir sıcaklık artışında numunede meydana gelen ağırlık kayıpları belirlenmektedir. Bu kayıplar, termogravimetre (TG) yöntem sayesinde, sıcaklığın bir

fonksiyonu olarak ağırlık değişimleri ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Diferansiyal termogravimetri (DTG) yönteminde ise yine sıcaklığa bağlı ağırlık kaybı oranları belirlenmekte ancak TG analizinden farklı kolayca tanınamayan bir biri üzerine çakışmış ağırlık kayıplarını kolayca belirlemeye yardımcı olmaktadır (Shi, 1992). Ayrıca termal analiz sayesinde sıcaklığa bağlı ağırlık kaybının yanı sıra başka değişkenlerin (enerji, boyut) kayıplarında ölçülmektedir. Bir maddeye termal analiz yapıldığı zaman o maddede, faz değişimleri, erime, katı halden sıvı hale geçmeden direkt gaz haline dönüşmesi (sublimasyon), termal parçalanma, cam geçişi, oksitlenme ve redüklenme (oksitlenme, moleküle oksijen eklenmesi, artı değer artması ve molekülden hidrojen ayrılması olayı iken redüklenme ise oksitlenmenin tersidir. Bir molekül oksitlenirken öteki molekül redüklenir), boyutsal olarak farklı değişimler oluşmaktadır (Skoog ve West,1981: Skoog vd., 1998).

Farklı termal analiz yöntemleri mevcut olup ancak belli başlı en yaygın kullanılanlar aşağıda sıralanmıştır,

1. Termogravimetri (TG)
2. Diferansiyel Termal Analiz (DTA)
3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)

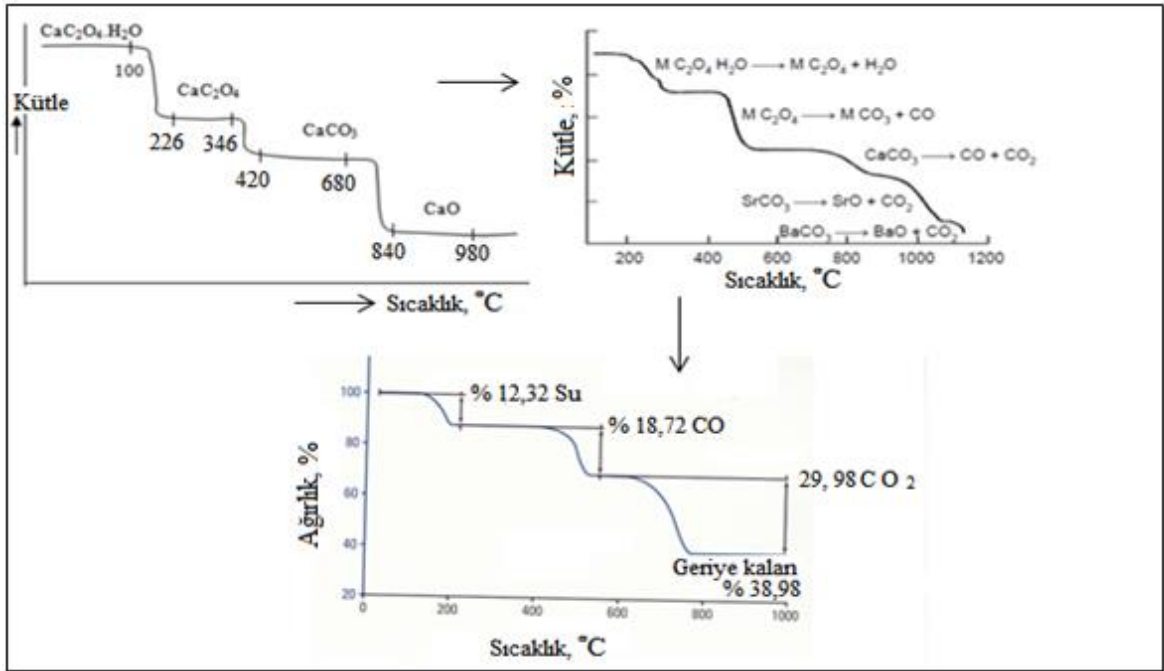
1. Termogravimetri (TG), sıcaklığın programlı bir şekilde artırılması ile numune kütlelerinde meydana gelen değişimin sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak inceleyen bir yöntemdir. Termogravimetrimin çalışma prensibi, bir madde de sıcaklığa bağlı olarak oluşan reaksiyonların, kütlede meydana getirdikleri değişimleri özel bir terazi yardımıyla sürekli olarak tartılması ile ölçüm yapılmaktadır. Termo-gravimetrik analiz (TG) kısaca, numuneye sıcaklık verildiğinde sıcaklık değişimine bağlı olarak numunenin kütledeki değişimi kaydeden bir yöntemdir. Bu yöntemde numune kütlelerinde meydana gelen değişimler Şekil 1.23'deki gibi bir düzende seyretmektedir (Skoog ve West,1981: Skoog vd., 1998).



Şekil 1.23. Termogravimetri analizine göre kütle-zaman grafikleri (URL 15).

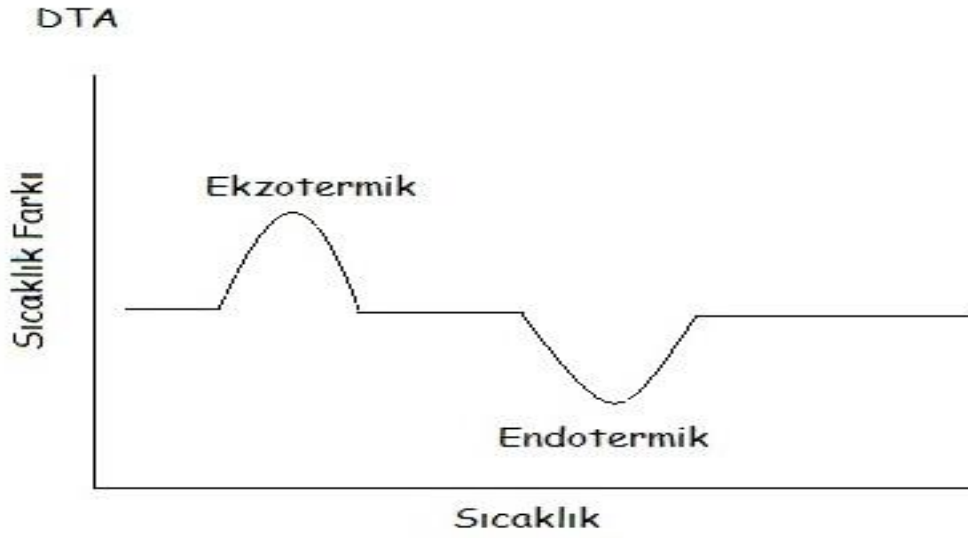
Şekil 1.23'de verilen grafiğe göre, (1) kütleli bir değişim söz konusu değil, (2) kütledeki azalmanın kurumaya bağlı oluşumu, (3) tek seferde dekompozisyon (parçalanma) ile oluşan kütle kaybı, (4) birkaç adımda dekompozisyon (parçalanma) ile oluşan kütle kaybı, (5) her ne kadar 4'e benzer bir eğri olsada farkı her adım sonucunda oluşan bir ara faz yok veya ısıtma hızı çok yüksek, (6) oksitlenme ile oluşan kütle artışı, (7) 6'a benzesede fark olarak oluşan ürün yüksek sıcaklıkta dekompozisyona uğramaktadır.

Bir madde üzerine termogravimetre analizi uygulandığı zaman hangi sıcaklıkta yaklaşık olarak ne kadar bir ağırlık kaybı oluşturduğu Şekil 1.24'de verilmiştir.



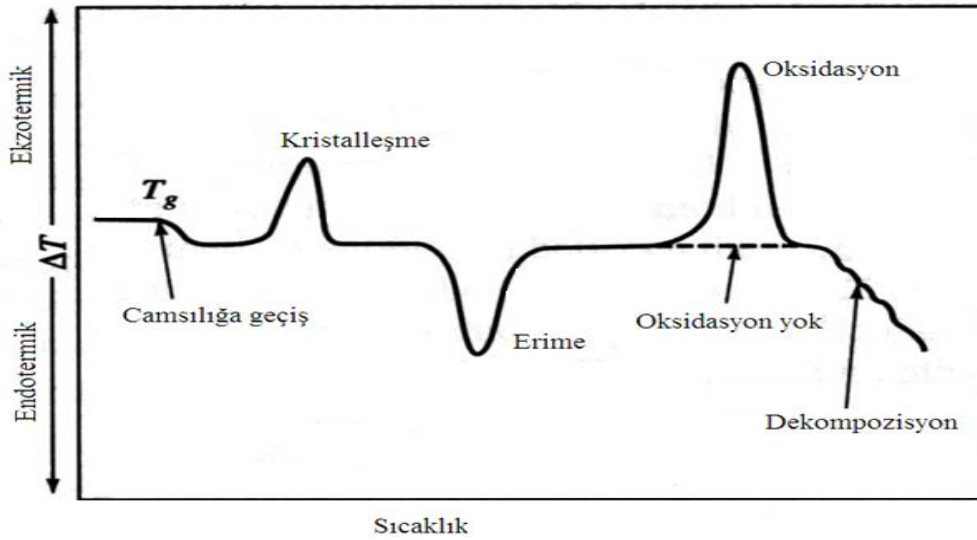
Şekil 1.24. Termogravimetre analizi ile sıcaklığa bağlı % ağırlık kayıpları (URL 15)

2. Diferansiyel Termal Analiz (DTA), bu yöntemde analiz yapılacak numune ve termal olarak inert ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) olan referans maddeye aynı sıcaklık miktarında sıcaklık verilmektedir. İki madde birlikte ısıtılmakta ve sıcaklıkta lineer bir artış söz konusu olup, arasında fark sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülmektedir. Termogravimetre analizine göre sadece madde de kütle kaybı olmadığından daha geniş kullanım alanı bulmaktadır. Yötemde numunenin sıcaklığından referans numune sıcaklığı çıkarılıp ve arada oluşan farka göre grafik çizilmektedir. Bu grafikte sıcaklık değişimi Şekil 1.25’de gösterildiği gibi endotermik yada ekzotermik olabilir (Skoog ve West,1981: Skoog vd., 1998).



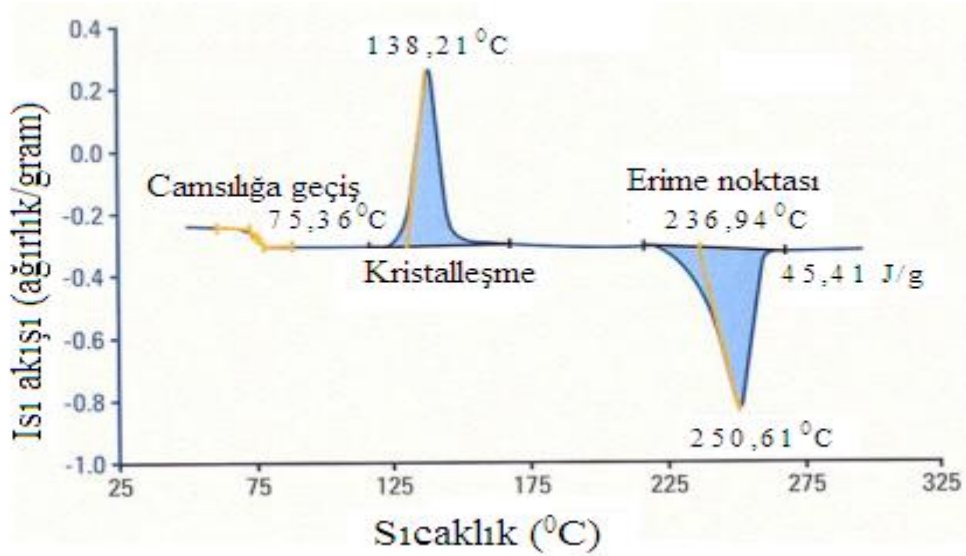
Şekil 1.25. Diferansiyel termal analiz (Skoog ve West, 1981; Skoog vd., 1998).

Sıcaklığa bağlı olarak oluşan endotermik ve egzotermik reaksiyonlarda maddede farklı değişimler söz konusudur (Şekil 1.26). Bunlar endotermikte; dehidratasyon (su kaybı), dekompozisyon (parçalanma), ergime, buharlaşma, süblimasyon (katının direk gaza geçmesi), ekzotermik; amorflaşma (şekilsiz yapı), amorf halden kristalleşme, katılaşma ve kristal yapıdan yeni bir kristal yapı oluşumu şeklinde değişiklikler gelişmektedir.



Şekil 1.26. Diferansiyel termal analiz ile endotermik ve egzotermik reaksiyona göre oluşan yapılar

3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC), referans ve numune arasındaki ısı akışını sıcaklığın bir fonksiyonu olarak inceleme esasına dayanır. Ölçüm esası ısınma sonucu belli bir noktaya kadar sıcaklık artışı söz konusu olup, daha sonra numune erimeye başlamaktadır (Şekil 1.27). Erime ile numunede sıcaklık sabit ancak referans numunede sıcaklık artışına göre çalışmaktadır. DTA'da sıcaklık, DSC ise ısı (enerji) farkını ölçülmesi esasına dayalı, DTA ya göre daha ayrıntılı bilgi vermekte ve sıcaklık dengelenmesi yerine enerji değişimleri ölçümüne göre çalışması ile iki yöntemi birbirinden ayıran en önemli farklardır (Skoog ve West,1981: Skoog vd., 1998).



Şekil 1.27. Diferansiyel taramalı kalorimetri örnek grafiği

Uçucu kül ve çimentonun bir arada kullanımı ile elde edilen pasta üzerine yapılan termal analiz ile sertleşmiş çimentolu malzemelerin puzolanik aktivitesinin değerlendirilmesi ve azalan kalsiyum hidroksit miktarını ölçmek için kullanılmaktadır. Termal analiz yöntemlerinden termogravimetri analizi ile ayrıca buharlaşmayan ve kimyasal olarak bağlı su içeriğini belirlemeye yardımcı olmaktadır. Bu yöntem çimentonun 105-1000 °C arasında kızdırma kaybını ve karbondan kaynaklı kayıp zamanını da vermektedir. Ayrıca bu yöntemle kimyasal olarak bağlı bulunan su, hidrasyon ısı ile orantılı olup hidrasyonu ölçmek için de kullanılmaktadır. Buharlaşmayan su, jel katı yapısının içerisine yerleşmiş bir parça olup sadece 105 °C'nin üzerindeki sıcaklıkta yapıdan ayrılabilir (Baert vd., 2008).

Uçucu küllerin farklı ikame oranlarında çimentoda kullanılması ile çimento hidratasyonu üzerine etkisini farklı termal analiz yöntemleri ile belirlenmektedir. He vd. (2014) su/bağlayıcı miktarını 3,5 kabul ettikleri F tipi uçucu külü çimento içerisine % 30 oranında ikame etmeleri ile hazırladıkları 28 günlük pastalar üzerine diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), termal yerçekim analizi-diferansiyel termal yerçekimi (TG-DTG) yöntemlerini kullanmaları ile uçucu kül katkılı pastaların fiziksel parametrelerini belirlemişlerdir. Çalışmalarında yaklaşık olarak 15 mg miktarında numune üzerine 5 °C 'lik sabit ısıtma hızlarında 25 °C 'den 1000 °C'ye kadar ısıtmışlardır. Sonuç olarak uçucu küllü çimento pastasının farklı ısıtma hızlarında performans gösteren üç endotermik reaksiyon aşamasının geliştiğini görmüşlerdir. Bu aşamalardan biri hidrate olmuş silikat ve etrinjit bozulmasını, diğeri Ca(OH)₂ ayrışması ve üçüncü CaCO₃'ün ayrışması olarak tespit etmişlerdir. Dorum vd., (2010) çalışmalarında ise CEM I 42,5 dayanımına sahip çimento içerisinde % 20 oranında F tipi uçucu kül kullanmaları ile hazırladıkları pastaların (UKKÇ) 2, 7 ve 28 günlük kür süresi sonunda diferansiyel termal (DTA) ve termal gravimetri (TG) analizi yaparak uçucu kül katkısız pastaya (PÇ) göre sonuçları kıyaslamışlardır. TG analizi ile farklı sıcaklık değerlerinde numuneler üzerinde meydana gelen kütle kayıp miktarlarını belirlemişlerdir (Tablo 1.22).

Tablo 1.22. TG analizine göre farklı sıcaklıktaki kütle kayıpları (Dorum vd., 2009).

Pasta	Farklı sıcaklıktaki kütle kayıpları, %					Toplam
	25-200 °C	200-450 °C	450-650 °C	650-950 °C	450-950 °C	
PÇ (2 gün)	3,8	4,3	4,0	2,1	6,1	14,1
UKKÇ (2 gün)	4,4	3,4	3,0	3,4	6,4	14,2
PÇ (7 gün)	4,6	5,5	4,7	2,2	6,9	17,0
UKKÇ (7 gün)	13,5	4,2	3,1	2,8	5,9	23,7
PÇ (28 gün)	5,4	6,0	5,1	1,8	6,9	18,3
UKKÇ (28 gün)	7,6	4,9	3,4	3,4	6,8	19,4

PÇ; Portland çimentosu, UKKÇ; Uçucu kül katkılı çimento

Tablo 1.22' e göre hidratasyon sonucu çimento pastasında farklı sıcaklık değerleri ve bu sıcaklıkların oluşturduğu farklı etkilere göre kütle kaybı oluşmuştur. Bu etkiler, 100 °C'de çimento pastalarında yaklaşık kapiler boşluklardaki suyun dehidratasyonu, 100-200 °C'de endotermik etkiler sonucu C-S-H jellerinin farklı evrelerdeki dehidratasyonu, 478 ve 498 °C'de Ca(OH)₂ (CH)'nin dehidratasyonu, 757 °C ve 773 °C'de CaCO₃'ün

dekarbonasyonuna bağlı olarak kütle kaybı ölçümlerini kaydetmişlerdir. Bu kayıpları, yaptıkları TG analiz sonuçlarına göre, hidrasyon günlerindeki farklılığa ve uçucu kül katkısına göre değiştirdiğini belirtmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, 2 günlük dayanıma sahip uçucu kül katkılı ve katkısız numunelerde hidrasyon sonrası toplam kütle kayıpları yaklaşık aynı iken, 7. ve 28. günlerde ise uçucu kül katkılı çimento pastasında daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca 25-200 °C’de sıcaklık aralığında özellikle tüm dayanım günlerinde uçucu kül katkılı çimento pastalarında daha fazla yapısal ve kristal su ile C-S-H fazlarının dehidrasyonu, 450-650 °C’de sıcaklık aralığındaki CH’nın daha az dehidrasyona uğradığı izlenmişlerdir.

Pane ve Hansen (2003), portland çimentosu içerisine uçucu kül, öğütölmüş cüruf ve silika dumanı ekleyerek hazırladıkları katkılı çimento pastaları üzerine diferansiyel termal analiz, termogravimetrik analiz (DTA/TGA) ve izotermal kalorimetri analizi yapmışlardır. DTA/TGA analizine göre çimento pastası içerisinde kimyasal olarak bağlanmış su, hidrasyon ısısı ile orantılı olup hidrasyonu ölçen bir gösterge olarak değerlendirmişlerdir. Ayrıca bu analiz yardımı ile hidrasyon sonucu oluşmuş Ca(OH)_2 ’ın dekompozisyonuna bağlı ağırlık kaybını, puzolanik reaksiyonu ölçmek için kullandıklarından bahsetmişlerdir. Çalışmalarında puzolan katkılı çimentoların hidrasyonu katkısız çimento hidrasyonuna göre daha karmaşık olduğunu söylemişlerdir.

Chaipanich ve Nochaiya (2009), çimento yerine % 10, % 20 ve % 30 oranında uçucu kül ve buna ek olarak % 5 ve % 10 oranında silika fume ilave ederek su/bağlayıcı (S/B) oranını 0,5 tutmak şartı ile katkılı çimento pastaları hazırlamışlardır. Hazırladıkları pastalar üzerine diferansiyel termal analiz (DTA)/termal gravimetri analiz (TGA) yapmışlardır. Çalışmalarında, farklı ikame oranlarında çimento-uçucu kül (% 10 ve % 20 sırası ile 10FA ve 20 FA) ile çimento-uçucu-silika fume karışımları (% 5 ve % 10 sırası ile 10FA5SF, 20FA10SF) ile hazırladıkları 28 günlük pastalara TGA analizi yapmışlardır. Bu analiz sayesinde farklı bileşimli pastaların kütle ve toplam kütle kayıplarını belirlemişlerdir (Tablo 1.23). Farklı sıcaklıklarda H_2O ve CO_2 miktarına bağlı olarak üç değişik kütle kaybı olduğunu tespit etmişleridir. Bu kayıplardan biri, 30-420 °C’de arasında etrenjit, C-S-H ve C_2ASH_8 , diğeri 420-500 °C’de Ca(OH)_2 ’den suyun ayrılması ve en sonucusu CaCO_3 ’ün bozulması ile CO_2 ’in açığa çıkması şeklinde kütle kayıpları olduğunu belirtmişlerdir.

Tablo 1.23. Uçucu kül ikameli pastaların TGA analizine göre % kütle kayıp miktarları

Pasta	TG eğrisine göre % kütle kaybı			Toplam kayıp içerisindeki % kütle kaybı		
	C-S-H+ Etrenjit+C ₂ ASH ₈	Ca(OH) ₂ (CH)	CaCO ₃ (CC)	C-S-H+ Etrenjit+C ₂ ASH ₈	Ca(OH) ₂ (CH)	CaCO ₃ (CC)
PÇ	21,10	4,80	2,94	73,17	16,64	10,18
10FA	20,35	4,23	2,05	76,41	15,88	7,71
10FA5SF	21,63	3,61	1,91	79,68	13,30	7,02
20FA	19,90	3,45	2,29	77,64	13,45	8,92
20FA5SF	19,97	3,02	2,32	78,88	11,93	9,18
20FA10SF	19,07	2,56	2,35	79,53	10,68	9,81

PÇ; çimento, 10,20 FA; başlangıçtaki sayılar çimento yerine ilave edilen % uçucu kül miktarları, 5, 10SF, çimento yerine ilave edilen % silika füme miktarları

Tablo 1.23'e göre en yüksek kütle kaybı sadece çimentolu pastalarda olduğunu, çimentoya uçucu kül ilavesi ile azaldığı ancak fazladan silika füme eklenmesi ile az da olsa tekrar bir artış gösterdiğini ifade etmişlerdir. Ancak uçucu kül ilavesi ile Ca(OH)₂ miktarı puzolanik aktiviteden ve silika füme miktarına bağlı olarak azaldığından dolayı bir kütle kaybı olduğu şeklinde açıklamışlardır. Toplam kütle kaybındaki artışı ise artan uçucu kül ve silika füme miktarına göre ilk olarak etrenjit, C-S-H ve C₂ASH₈ (gehlenit) değişimine bağlı, ikincisi ise puzolanik reaksiyondan dolayı Ca(OH)₂ miktarının azalmasına bağlı olarak geliştiği şeklinde ifade etmişlerdir. Kütle kayıplarını belirlemede tek bir termal analiz yönteminin yeterli gelmediğini, TGA analizi ile birlikte DTA analizinde kullanılmasının gerekli olduğunu söylemişlerdir. DTA analizine göre üç adet farklı sıcaklıklarda endotermik pik değerleri elde etmişlerdir. Bunlar 82-163 °C'de kalsiyum silikat ve kalsiyum alümina silikatın dehidratasyonu (sıvı kaybı), 455-466 °C'de Ca(OH)₂ dekompozisyonu (atomlara parçalanma) ve 697-724 °C'de CaCO₃ dekompozisyonu (atomlara parçalanma) şeklinde açıklamışlardır. Ayrıca numunelerin kür süresinin artmasına bağlı olarak meydana gelen kütle kayıpları artışlarında belirlemişlerdir (Tablo 1.24). Artan kür süresi ile daha fazla kayıp miktarı ölçmüşlerdir. Yüksek kütle kaybı miktarlarını, kür süresine bağlı olarak daha fazla hidrasyon ürünü oluşturduğu ve silika füme miktarının artması ile daha fazla Ca(OH)₂ tükettiğinden kütle kaybında azaltma meydana getirdiği şeklinde açıklamışlardır.

Tablo 1.24. Uçucu kül ikameli pastaların 7, 28 ve 90 günlük TGA analizine göre % kütle kayıp miktarları

Pasta	TG eğrisine göre % kütle kaybı			Toplam kayıp içerisindeki % kütle kaybı		
	C-S-H+ Etrenjit+ C ₂ ASH ₈	Ca(OH) ₂ (CH)	CaCO ₃ (CC)	C-S-H+ Etrenjit+ C ₂ ASH ₈	Ca(OH) ₂ (CH)	CaCO ₃ (CC)
20FA10SF-7 gün	17,32	2,77	2,74	75,87	12,14	12,01
20FA10SF- 28 gün	19,07	2,56	2,35	79,53	10,68	9,81
20FA10SF-90 gün	21,91	2,29	2,36	82,49	8,63	8,89

20 FA; başlangıçtaki sayı çimento yerine ilave edilen % uçucu kül miktarı, 10SF, çimento yerine ilave edilen % silika füme miktarı

Tablo 1.24’de DTA analizi sonuçlarına göre, kür süresinin uzamasına bağlı olarak katkılı çimento pastalarında puzolanik reaksiyonun etkisi ile Ca(OH)₂ miktarı azaltıldığını, C-S-H miktarını ise arttırdığını görmüşlerdir. Kür süresinin uzaması ile meydana gelen ek hidrasyon ürünleri basınç dayanımının artmasında katkı sağladığını ifade etmişlerdir.

Uçucu küllerin çimento içerisindeki ikame oranı ve kür süresi, çimento hidrasyonunu etki eden en önemli faktörlerdir. Bu faktörlerin hidrasyon üzerinde oluşturduğu etkiler sonucu, hidrasyona maruz bırakılan örnekte meydana gelen kütle kayıp miktarlarının ve bu miktarların hangi sıcaklık aralıklarında olduğu yapılan birçok araştırmacı tarafından belirlenmiştir. Hidrasyona etki eden bir diğer faktör, uçucu külü oluşturan tanelerin boyutudur. Monteagudo vd., (2014) çalışmalarında hidrasyon üzerine uçucu külün seyreltme ve heterojen çekirdeklenme etkisi olduğunu açıklamışlardır. Seyreltme etkisi, karışımın su/bağlayıcı oranını arttırdığını ve sonuçta yerleştirme oranı ve sonrasında çimento miktarını azalttığı yönünde etkisi olduğunu söylemişlerdir. Heterojen çekirdeklenmenin hidrasyon üzerine etkisi yeni parçacıklarla alakalı olup buda özgül yüzey alanını büyütme ve kimyasal reaksiyonun gelişmesini sağlamaktadır. Hidrasyon üzerinde ayrıca ilave ürünlerin tane boyutunun ve kimyasal bileşiminde etkin rol oynadığından bahsetmişlerdir. De Belie vd., (2015) ise uçucu küllerin tane boyutunun hidrasyon üzerinde dolgu etkisi oluşturduğundan bahsetmişlerdir. Dolgu etkisinin çimento hidrasyonu üzerinde iki etkisi olduğunu söylemişlerdir. Bu etkilerden biri, aynı su/bağlayıcı oranında katkılı çimento malzemesi ile klinkerin ikamesi seyreltici etkisi ve daha yüksek efektif su/çimento oranının oluşmasında etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Diğeri ise, çimento malzemesinin yüzeyi hidrasyon için çekirdek alan gibi davranabildiğinden bahsetmişlerdir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında, iki farklı termik santralden alınan ve farklı özelliklere sahip uçucu küller, CEM I 42,5 R çimento ve şebeke suyu kullanılmıştır. Çalışmada çimento içerisinde mineral katkı olarak kullanılabilen uçucu küllerin, en uygun öğütme inceliğinde ve ikame oranında kullanılması ile katkılı çimento üretmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, uçucu küllerin orijinal durumları ve değişik öğütme sürelerinde (10, 20, 30, 45 ve 60 dk) öğütülmüş ve farklı tane inceliğe sahip uçucu küller üretilmiştir. Farklı tane inceliklere sahip uçucu küllerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için özgül yüzey alanı (blaine), yoğunluk, tane boyu analizi (mastersize), rutubet, kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için XRF, serbest kireç, kızdırma kaybı ve genleşme tayini, mineralojik özelliklerinin belirlenmesi için XRD, morfolojik özelliklerinin belirlenmesi için SEM-Taramalı elektron mikroskobu analizleri yapılmıştır. Çalışmada kullanılan çimento için ise özgül yüzey alanı (blaine), yoğunluk, tane boyu analizi (mastersize), rutubet, serbest kireç, kızdırma kaybı, genleşme ve XRF analizleri yapılmıştır. Öğütme sonucu elde edilen her bir uçucu külün değişik öğütme sürelerini (öğütme sonucu uçucu küllerin değişik tane boyu incelik değerleri) çimento içerisine % 10, % 30 ve % 50 ikame (çimento içerisine eksiltelen çimento kadar katılan uçucu kül miktarı) edilmesi ve şebeke suyunun ilave edilmesi sonucu katkılı çimento pastaları üretilmiştir. Ayrıca çimento içerisine uçucu kül ikamesiz yani katkısız sadece su ve çimentodan oluşmuş referans numunesi de oluşturulmuştur. Hazırlanan katkılı ve katkısız (referans) taze haldeki çimento pastalarının su miktarlarının belirlenmesi için kıvam tayini, priz sürelerinin belirlenmesi için priz başlama ve bitiş süreleri deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş uçucu kül katkılı ve katkısız çimento pastaları için ise, basınç dayanımı, puzolanik aktivite indeksi değeri, mikro yapılarını (boşluk oranı, termal analiz ve kapillarite) belirlemeye yönelik deneyler yapılmıştır.

Deney ve analiz sonuçlarına göre, uçucu küllerin orijinal ve değişik öğütme sürelerine ait karakteristik özellikleri ile çimentonun karakteristik özellikleri kıyaslanmıştır. Ayrıca değişik öğütme süreli ve ikame oranlı katkılı ve katkısız çimento pastalarının farklı özellikleri de karşılaştırılmıştır.

Elde edilen deney sonuçlarına göre;

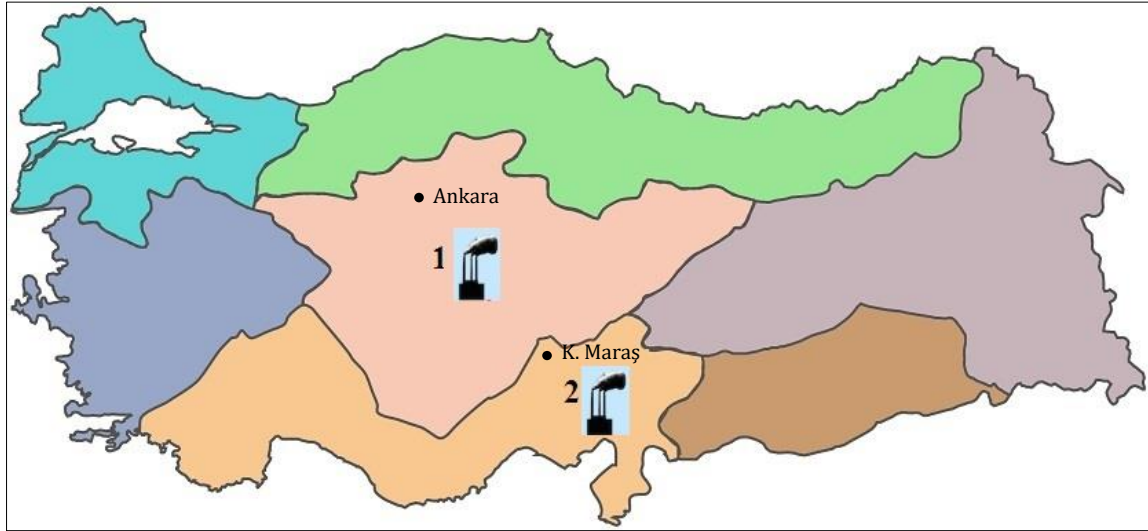
1. Öğütme öncesi ve sonrası iki farklı uçucu külün herbir öğütme süresine ve çimentoya ait özgül yüzey alan (blaine) değerleri belirlenmiş ve kendi içerisinde kıyaslanmıştır.
2. Uçucu küllerin kimyasal bileşenleri belirlenerek standartlara göre hangi grup uçucu kül sınıfında yer aldığı belirlenmiştir.
3. Uçucu küllere mineralojik tayin yapılması ile hangi minerallerden oluştuğu gösterilmiştir.
4. Öğütmenin etkisi ile iki farklı uçucu külü meydana getiren tanelerin şekilsel ve yapısal değişimi SEM analizi ile ortaya konulmuştur.
5. Uçucu kül katkılı çimento pastalarının kıvamı üzerine, uçucu küllerin farklı yüzey alan (blaine) değerlerinin ve çimento içerisinde ikame edilen (% 10, % 30 ve % 50) uçucu kül oranının etkisi belirlenmiştir. Ayrıca uçucu kül katkısız (referans) numunesinde kıvam değeri belirlenmiş ve uçucu kül katkılı numunelerin değerleri ile kıyaslanmıştır.
6. Uçucu kül katkılı çimento pastalarının priz süreleri üzerine, uçucu küllerin farklı yüzey alan (blaine) değerlerinin ve çimento içerisinde ikame edilen (% 10, % 30 ve % 50) uçucu kül oranının etkisi belirlenmiştir. Ayrıca uçucu kül katkısız (referans) numunesinde priz süreleri belirlenmiş ve uçucu kül katkılı numunelerin değerleri ile kıyaslanmıştır.
7. Uçucu kül katkılı çimento pastalarının kısa ve uzun dönem basınç dayanımları üzerine, uçucu küllerin değişik öğütme sürelerinin ve çimento içerisindeki farklı ikame oranlarının etkisi incelenmiştir. Ayrıca uçucu kül katkısız (referans) numunesinde kısa ve uzun dönem basınç dayanım değerleri belirlenmiş ve uçucu kül katkılı numunelerin değerleri ile kıyaslanmıştır.
8. Sertleşmiş halde bulunan katkılı ve katkısız (referans) çimento pastası örneklerinin mikro yapısı incelenmiş ve birbiri ile kıyaslanmıştır. Katkılı ve katkısız çimento pastalarının mikro yapısı üzerine, uçucu küllerin öğütme süresi ve çimentoya ikame edilen uçucu kül miktarının etkisi incelenmiştir. Mikro yapı incelemelerinde pastaların boşluk yapısı civa porozimetresi deneyi ile pastalarda bulunan boşluklardan nüfuz eden su miktarı ise kapilarite deneyi ile belirlenmiştir. Ayrıca pasta içerisinde bulunan boşluklardan, çimento ve uçucu külün reaksiyonu sonucu oluşan hidrasyon olayına bağlı ağırlık kaybı ile sıcaklığa bağlı faz değişimi termal analiz ile tespit edilmiştir.

2.2. Kullanılan Malzemeler

Deneilerin yapımı için iki farklı termik santralden alınmış (Afşin Elbistan ve Çayırhan) uçucu küller, çimento ve su kullanılmıştır. Çalışmada CEM I katkısız çimento kullanılmıştır. Çalışmada bu çimentonun seçilmesindeki amaç içerisinde bulunan bileşenlerden ileri gelmiştir. Bu çimento içerisinde % 95-100 oranında klinker ve % 0-5 oranında mineral katkıları bulundurması ile standartlara göre katkı oranı düşük ya da en az olan çimento olarak kabul edilmektedir. Karışıma ilave edilen su şebeke suyu olup herhangi bir analiz yapılmamıştır.

2.2.1. Uçucu Küller

Bu çalışmada malzeme olarak kullanılmış olan uçucu küller, Afşin Elbistan ve Çayırhan termik santrallerinden temin edilmiştir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Uçucu küllerin temin edildiği termik santraller 1) Çayırhan Termik Santrali (Ankara), 2) Afşin Elbistan Termik Santrali (Kahramanmaraş)

2.2.2. Çimento

Çalışmada kullanılmış olan çimento Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Temin edilen çimento CEM I 42,5 R sınıfında olup incelik değeri ve

kimyasal bileşimi temin edilen çimento fabrikası laboratuvarlarında ilgili deneylerin yapılması ile elde edilmiştir.

2.2.3. Su

Uçucu küller ve çimentonun bir araya gelmesi ile hazırlanan pastalar için Gümüşhane Belediyesi şebeke suyu kullanılmıştır.

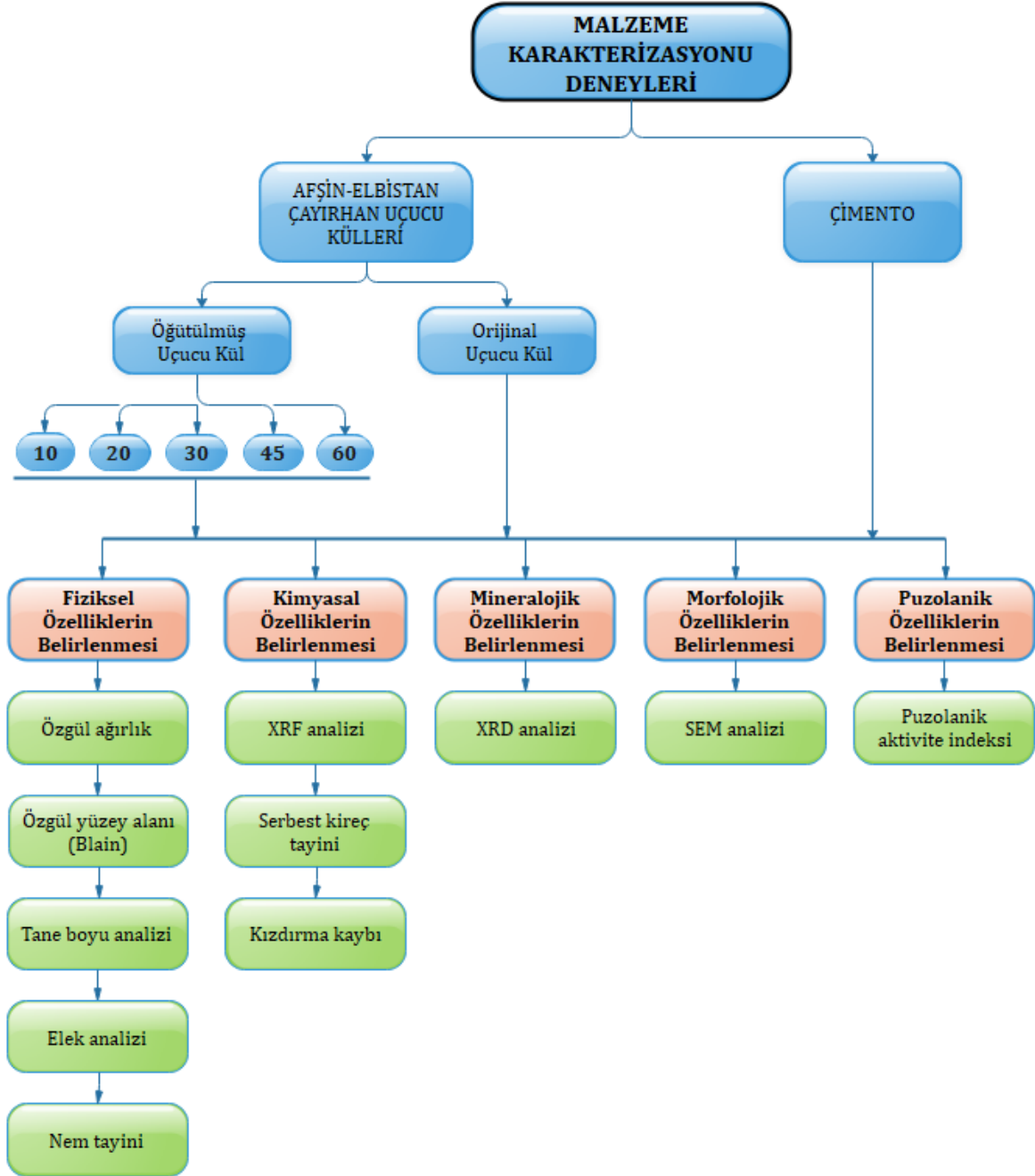
2.3. Malzeme Karakterizasyonu

Uçucu küller KTÜ Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bilyeli değirmen kullanılarak öğütülmüştür. Çalışmada her iki uçucu kül için öğütme süreleri, yapılan literatür taraması sonucunda en ideal süreler belirlenmiştir. Bu öğütme süreleri bir çok çalışmacı tarafından en düşük 10 dk en yüksek 150 dk aralığında kabul görmüştür (Rajak vd., 2017; Hela ve Orsàková, 2013; Paya vd., 1995). Ayrıca Çavuşoğlu (2013) yapmış olduğu doktora çalışmasında Çayırhan uçucu külünü 5 ve 15 dk öğütme sürelerinde yeraltında dolgu olarak kullanması bu tez çalışmada öğütme sürelerini belirlemede ön çalışma olarak kabul edilmiştir. Öğütme işlemi uçucu küllerin kuru ve toz haldeki durumlarına yapılmıştır. Öğütme için değirmende numunenin koyulduğu hazne silindirik boyutta ve 6 lt kapasiteye sahiptir. Öğütme işleminde her iki uçucu külün her bir öğütme süresi için toplamda 10 kg numune öğütülmüştür. Tablo 2.1’de öğütme için gerekli parametreler verilmiştir.

Tablo 2.1. Uçucu küllerin bilyalı değirmende öğütülmesi ile ilgili veriler

Bilya çapları, cm	Bilya sayısı, adet	Dönme hızı, devir/dakika	*Öğütülen malzeme miktarı, kg
4	6	66	2
3,5	7		
3	12		
2	50		
1,75	30		
*Bir seferde numune haznesine konulan uçucu kül miktarı			

Çalışmada öğütürerek farklı tane inceliğine getirilen uçucu küllerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi için bir takım deney ve analizler yapılmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Malzemelerin karakterizasyonunu belirlemek için yapılan deney ve analizler

2.3.1. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Afşin Elbistan ve Çayırhan termik santrallerinden alınan küllerin görüntüsü Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Çalışmada kullanılan uçucu küller; a) Afşin Elbistan, b) Çayırhan

Uçucu küllerin farklı sürelerde öğütme ile fiziksel özellikleri üzerinde oluşturduğu etkinin belirlenmesi için, tane boyut dağılımı, yoğunluk, özgül yüzey alan (blaine) ve rutubet durumu analizleri yapılmıştır.

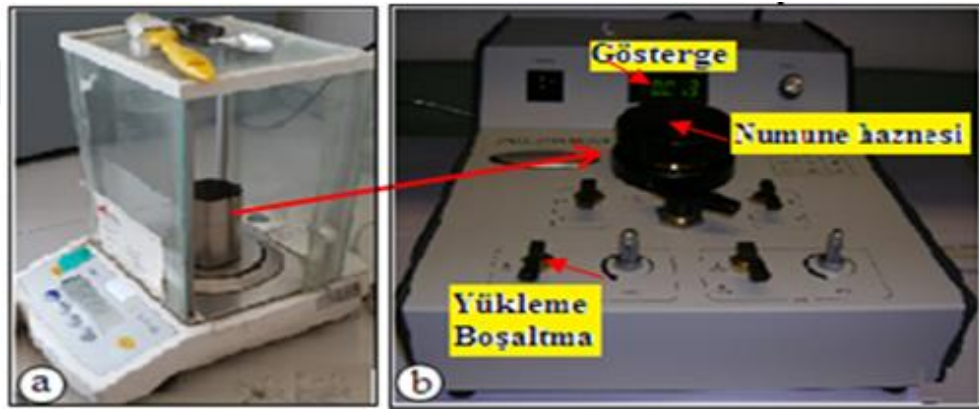
2.3.1.1. Uçucu Küllerin Tane Boyutu Analizi

Öğütmenin etkisi ile uçucu küllerin tane boyutunda olan değişimin belirlenmesi için KTÜ Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında tane boyu analizi yapılmıştır. Tane boyu analizi için Malvern Hydro 2000 MU model lazer tane boyu analiz cihazı kullanılmıştır. Her iki uçucu külün orijinal ve farklı öğütme süreleri (10, 20, 30, 45 ve 60 dk) için 3 analizin ortalaması alınarak tane boyu dağılım analizi yapılmıştır.

2.3.1.2. Uçucu Küllerin Yoğunluk Analizi

Uçucu küllerin yoğunluk deneyi TS EN 196-3 standardına göre yapılmıştır. Yoğunluk, 1cm^3 hacmindeki boşluksuz malzemenin gr olarak ağırlığının ifadesi olarak tanımlanmıştır. Bu deney Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası Laboratuvarında yoğunluk

cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deneye ilk olarak numune konulacak haznenin tartılıp ve darası alınması ile başlanmıştır. Ardından cihazın numune haznesine 50-55 gr arasında numune tartılarak cihaza yerleştirilmiştir. Cihaz içerisinde daha öncesinde mevcut olan boşluklar giderilmesi için boşaltma işlemi yapılarak sıfırlanmıştır. Daha sonra cihaza helyum gazı verilerek doldurma işlemi yapılmıştır. Cihaz göstergesinde gaz dolumu uçucu küller için 17 seviyesini gösterdiğinde kesilip ardından gaz boşaltma işlemine geçilmiştir. Boşaltma miktarı cihaz göstergesinde 6 seviyesine yaklaştığında işlem sonlandırılmış ve okunan değerler kayıt altına alınmıştır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Uçucu küller için yoğunluk analizi; a) numunenin tartılması, b) değerlerin okunması

Gaz yükleme ve boşaltma sonucu okunan değerler ile numune ağırlığı daha önceden hazırlanan Tablo 2.2’de uygun olan alanlara yazılmıştır. Bu işlem her iki uçucu külün orijinal ve tüm öğütme süreleri ile çimentoya uygulanarak yoğunluk değerleri otomatik olarak hesaplanmıştır. Tablo 2.2’de verilen VR ve VC sabitler, numune, deney için kullanılan uçucu kül miktarı, P 1, cihaza helyum gazı verildiğinde gaz dolum işleminde elde edilen değer, P 2, cihazdan helyum gazı boşaltıldığında okunan değer, VP, hesaplamada dikkate alınmayan sabit, yoğunluk, numunenin hesap edilen yoğunluk değeri olarak ifade edilmiştir.

Tablo 2.2. Uçucu küllere ait yoğunluk tablosu

YOĞUNLUK HESABI	
VR	87,49870
VC	148,94030
Numune	52,92780
P 1	17,018
P 2	6,838
VP	18,68
YOĞUNLUK	2,83

2.3.1.3. Uçucu Küllerin Özgül Yüzey Alan (Blaine) Deneyi

Özgül yüzey alan deneyi TS EN 196-6 standardına göre yapılmıştır. Deney belirlenmiş boyutlarda ve porozitedeki sıkıştırılmış bir çimento yatağının içinden sabit bir hava miktarının geçtiği sürenin gözlemlenmesi esasına dayanmaktadır. Özgül yüzey alanı bir gram çimentoyu oluşturan tüm taneciklerinin kapladığı yüzey alanı şeklinde açıklanmış olup cm^2/gr şeklinde ifade edilmiştir.

Bu deney Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası Laboratuvarında otomatik blaine cihazı kullanılarak yapılmıştır. Cihaz 220 V ve 50 hz ile çalışıp dijital zaman ve sıcaklık ayarlı olup, hassas ve kolay okuma özelliğine sahiptir. Üzerinde bulunan yardımcı tuş takımı ile gerekli değerler girildiğinde numuneye ait özgül yüzey alanı (blaine) değerini otomatik olarak vermektedir.

Deneye ilk numunenin tartılması ile başlanmıştır. Deneyde kullanılan malzeme miktarları numunenin özgül ağırlığı değeri ve özgül yüzey alan (blaine) cihazında yer alan sabitler kullanılması ile hesap edilmiştir (Tablo 2.3).

Tablo 2.3. Özgül yüzey alanı için numune miktarlarının hesaplanması

Öğütme Süresi, dk	Blaine Deneyi İçin Kullanılan Kül Miktarı, gr*	
	Çayırhan Külü	Afşin Elbistan Külü
0 (Orjinal kül)	79,13	93,48
10	83,55	96,43
20	85,76	96,79
30	87,23	101,58
45	88,33	104,16
60	89,44	105,63
CEM 1 42,5 R Çimento	114,09	

* Özgül yüzey alan (Blaine) deneyi için kullanılan malzeme miktarı formülü ($m = d \times v \times e$), m: kullanılan uçucu kül miktarı (gr), d: kullanılan külün yoğunluğu (gr/cm^3), v: kullanılan blaine cihazında numune haznesinin hacmi (cm^3) (73,61 olarak alınmıştır), e: porozite (0,5)

Tartımı alınmış numune, numune haznesine konularak cihaza yerleştirilmiş ve numunenin yoğunluk değeri cihaza girilmiştir. Daha sonra cihazın vakum yapması sağlanmış ve yaklaşık 2 dk'lık bekleme süresinden sonra cihazda özgül yüzey alan değeri (blaine) okunmuştur (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Uçucu küllerin özgül yüzey alanı; a) numune tartımı, b) numunenin hazneye yerleştirilmesi, c) haznenin cihaza yerleştirilmesi, d) özgül yüzey alan (blaine) değerinin okunması

2.3.1.4. Uçucu Küllerin Rutubet (Nem) Analizi

Deney ASTM D 2216 standardına göre yapılmıştır. Deneyin amacı, laboratuvar ortamında numunenin kurutulması sonucu ağırlık kaybına bağlı olarak rutubet (nem) içeriğini belirlemektir. Bu deney Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası Laboratuvarında MA 35 Sartorius model nem tayin terazisi kullanılarak yapılmıştır. Cihaz % 0,01 hassasiyetinde, 35 gr maksimum ölçüm kapasitesi ve 40- 160 °C sıcaklık aralığında, tam otomatik ve zaman ayarlayıcı özelliğe sahiptir.

Rutubet tayini için cihaza yerleştirilen numune en az 10 gr en fazla 30-35 gr arasında olması öngörülmüştür. Bu çalışma için kullanılan numune miktarı 10-15 gr arası kabul edilmiştir. Çünkü cihaza bu gramdan fazla numune koymak yanıltıcı sonuçlar vermesine neden olduğu yapılan ön çalışmalarla belirlenmiştir. Cihaza tartımı alınmış numunenin yerleştirilmesi ile başlanmıştır. Numune cihaz içerisinde 105 °C'de 20 dk bekletilmiştir. Bu süre sonunda numunenin içerisinde bulunan su (nem) miktarı cihazın gösterge kısmında % olarak verilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Uçucu küllerin rutubet (nem) tayini; a) numunenin tartılması, b) nem değerinin okunması

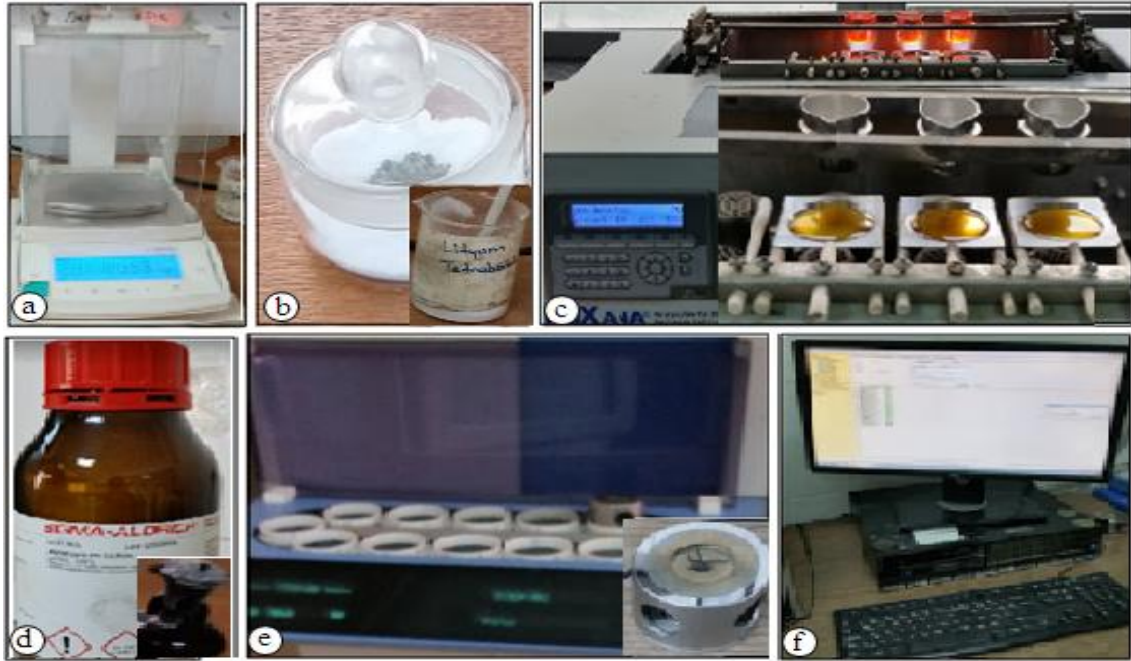
2.3.2. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal özellikleri, içerisinde bulunan oksit bileşenlerin % olarak dağılımının ortaya konulması ile belirlenmiştir. Kimyasal bileşimi sayesinde uçucu küller ifade edilen standartlara göre sınıflandırılmıştır. Uçucu küllerin kimyasal bileşimi XRF (X-Işını Floresans Spektrometresi), içerisinde bulunan kireç miktarı için serbest kireç tayini, su ve karbondioksit miktarları ise kızdırma kaybı analizleri ile belirlenmiştir.

2.3.2.1. XRF (X-Işını Floresans Spektrometresi)

Deney TS EN 196-2 standardına göre yapılmıştır. Deneyde iki farklı termik santralden alınan uçucu küllerin kimyasal bileşimleri belirlenmiştir. Bu deney Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası Laboratuvarında yapılmıştır. Numuneler Vulcan Fusion Technology modele sahip cihazı ile oluşturulmuş ve ardından XRF cihazı ile kimyasal bileşimleri tayin edilmiştir. Cihazın çalışma prensibi, numunedeki atomlar tarafından yayılan X-ışınları bir dedektör tarafından toplanıp ardından analiz kısmında işlenerek enerjiye karşı X-ışınının yoğunluk noktalarını gösteren bir spektrum oluşturma esasına dayanmaktadır. Bunun sonucunda verilen enerji sayesinde pik elementi tanımlanmıştır. Pik alanı veya yoğunluğu, numunedeki element miktarının % olarak gösterimini sağlamıştır (URL 16).

Öğütme sonrasında uçucu küllerin boyutsal olarak değişiminin kimyasal bileşimi üzerine herhangi bir etkisinin olmadığını belirlemek için XRF analizi her iki uçucu külün tüm öğütme süreleri üzerine yapılmıştır. Deneyde kullanılan malzeme miktarı o numuneye ait kızdırma kaybı değeri verisinin de kullanımıyla belirlenmiştir. Tartımı bilinen numunenin numune hazırlama aşaması olan yakma evresinde 8 gr lityum tetrabonat tartılmış ve numune kabına konularak iyice karıştırılması sağlanmıştır. Karıştırıldıktan sonra yanması için ocak başına getirilerek numune yakma kaplarına dökülmüş ve üzerine 5 damla ammonium iodide (ideal aralık ön tecrübe sonucu 4-8 damla) dökülerek numunenin çözünmesi sağlamıştır. Bu sıvının ideal aralıklarda kullanılmaması durumunda numunede topaklanma oluşmasına neden olmaktadır. Yanma işleminin bitmesi ile saydam kapsüller oluşmuş ve bu kapsüller soğumak üzere bekletilmeye bırakılmıştır. Soğuma işlemi sonrası kapsüller XRF cihazının numune haznesine yerleştirilip bilgisayar bağlantısı ile kimyasal bileşimleri belirlenmiştir (Şekil 2.7).

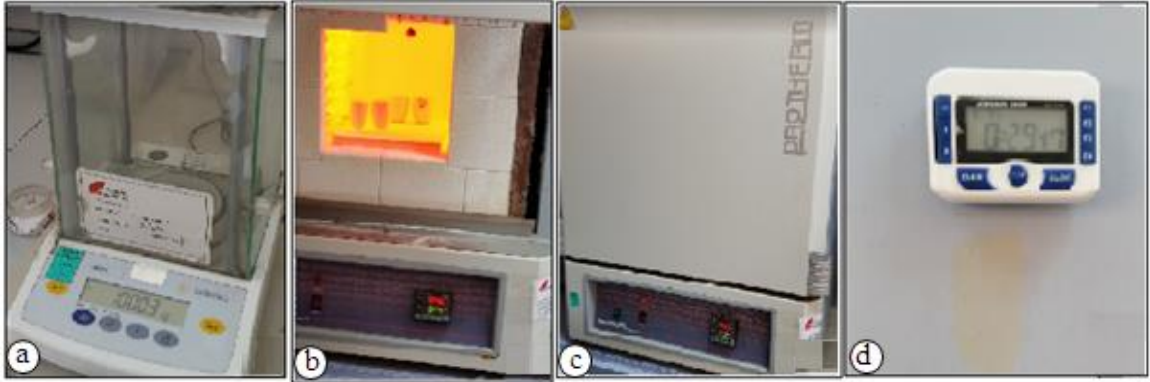


Şekil 2.7. Uçucu küller için XRF analizi; a) numunelerin tartılması, b) lityum tetrabonatın numune ile karıştırılması, c) numuneleri yakma, d) ammonium iodide ilavesi, e) numunelerin XRF cihazında numune haznesine yerleştirilmesi, f) sonuçların okunması

2.3.2.2. Kızdırma Kaybı (Loss On Ignition-LOI) Tayini

Deney TS EN 196-2 standardına göre yapılmıştır. Deney iki farklı termik santralden alınan uçucu küllerin farklı öğütme sürelerinde malzemenin bünyesinde bulunan su ve karbondioksit miktarının belirlenmesi için yapılmıştır. Bu deney Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası Laboratuvarında Protherm Furnaces model cihazın kullanımı ile yapılmıştır.

Deneye 1 gram numune tartılarak başlanmıştır. Tartımı alınan numune, numune kabına (kuroze) koyulmuş ve ardından ilk tartım işlemi yapılmıştır. Daha sonra numune 975 °C sıcaklıkta 30 dk etüvde bekletilmiştir. 30 dk sonra numune etüvden çıkarılarak soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numune tartılarak son tartım işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk tartım değerinden son tartım değeri çıkarılıp, yüzdesel olarak ifade edilmesi ile uçucu küllerin her bir öğütme sürelerine ait kızdırma kaybı değerleri hesaplanmıştır (Şekil 2.8).



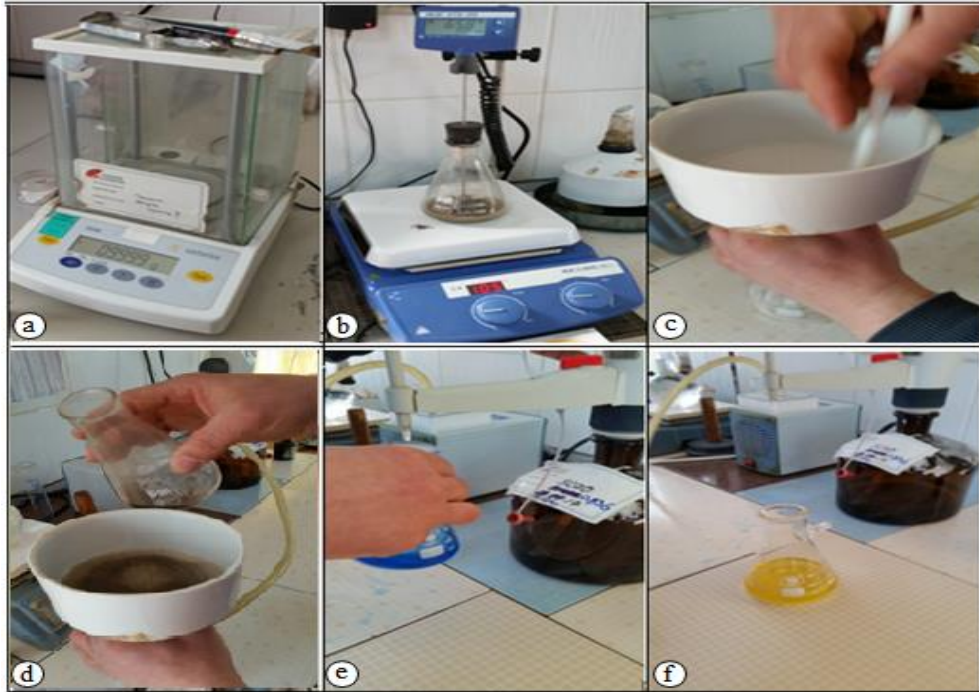
Şekil 2.8. Uçucu küllerde kızdırma kaybı tayini; a) numunenin tartılması, b) numunenin fırına yerleştirilmesi, c, d) fırında bekletilmesi

2.3.2.3. Serbest Kalsiyum Oksit (Serbest Kireç-SCaO) Tayini

TS EN 451-1 / TS EN 196-3 standartlarına göre yapılmıştır. Deneyde, uçucu küllerin bünyesinde bulunan serbest kalsiyum oksit miktarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu deney Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası Laboratuvarında deney için standartlarda belirtilen aparatlar ve çözeltiler kullanılarak yapılmıştır.

Deneye 1 gram numune tartılarak başlanmıştır. Daha sonra 50 ml Ethylene glycol çözeltisi, 1 gram numune ve 1 adet mıknatıs beher kapına dökülmüştür. Bu deney düzeneğinde mıknatıs, numunenin çözelti içerisinde iyice karıştırılarak topaklanmasını

engellemek için kullanılmıştır. Hazırlanan bu karışım 105 °C IKA C-MAG HS 7 model manyetik karıştırıcı üzerine yerleştirilmiş ve IKA ETS-D5 elektronik iletişim termometresi ile 30 dk karıştırılması sağlanmıştır. Karıştırma işlemi bittikten sonra erlenin ağzına beyaz porselen kapak kapatılmış ve bu kapağın içine 2 adet süzgeç kâğıdı yerleştirilmiştir. Ardında titrasyon cihazına bağlanmıştır. Daha sonra süzgeç kâğıdı porselen kapağa iyice oturması için ethylene glycol çözeltisi ile ıslatılarak çubuk yardımıyla kâğıdın kenarları yerleştirilmiş ve dökülen çözelti titrasyon cihazı açık olduğundan aşağı doğru süzdürülmesi sağlanmıştır. 30 dk karışan numune hazırlanan porselen başlıklı erlen kabının içerisine süzülmesi için dökülmüştür. Süzülme işlemi tamamlandıktan sonra erlen kabı içine bron prosel yeşili çözeltisinden üç damla dökülmüş ve erlen içindeki çözelti mavi rengi alması sağlanmıştır. Serbest kireç çözeltisi altına alınan mavi renkli çözelti içerisindeki erlen koyularak çözeltinin rengi açık sarı olana kadar sürekli serbest kireç çözeltisi damlatılarak karıştırılmıştır. Daha sonra çözelti açık sarı rengi aldığı anda cihaz üzerindeki değer okunmuştur. Cihaz üzerinde okunan değer (sarfiyat) \times 0,28 (faktör) \times 0,536 (faktör)= serbest kireç miktarını (SCaO) hesaplanmıştır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Serbest kalsiyum oksit tayini; a) numune tartımı, b) numunenin karıştırılması, c) süzülme için aparatların hazırlanması, d) numunenin süzülmesi, e) bron prosel yeşili dökülmesi, f) serbest kireç çözeltisi damlatılması

2.3.3. Uçucu Küllerin Mineralojik Özellikleri

Çalışmada kullanılan uçucu küller iki farklı termik santralde farklı kökenli kömürün yakılması sonucu elde edilmiştir. Farklı kökenlere sahip uçucu küllerin hangi minerallerden oluştuğunu belirlemek için XRD (X-Işını Difraktometresi) analizi yapılmıştır.

2.3.3.1. XRD (X-Işını Difraktometresi) Analizi

Bu analiz ile toz haline getirilmiş numuneleri oluşturan her bir kristalin kendi içerisinde belli bir sırada dizilmiş atomlara bağlı olarak X- Işınları belli bir düzen içerisinde kırılmasını sağlamıştır. Işınlardan kırılımı sonucu oluşturduğu faz o kristale ait bir nevi tanımlayıcı bir iz taşımaktadır. Bu sayede X-Işını Kırınım cihazı sayesinde kayaçlar, kristal haldeki malzemeler, ince filmler ve polimerlerin nitel ve nicel özelliklerinin belirlenmesini sağlamaktadır (URL 17).

Bu çalışmada kullanılan uçucu küllerin mineralojik bileşimleri Yıldızlar SSS Holding firmasına ait Bilecik Söğütten Fabrikası Laboratuvarında XRD analizi ile belirlenmiştir. Bu analiz, iki farklı uçucu külün orijinal ve 60 dk öğütme süreleri için yapılmış ve her iki uçucu külün mineralojik bileşimi ortaya konulmuştur. Analiz 2θ açısında 0-70 şiddet aralığında gerçekleştirilmiştir.

2.3.4. Uçucu Küllerin Morfolojik Özellikleri

Uçucu küllerin en dış ve iç kısmı, yüzey özellikleri, tane şekli (küresel, düzensiz vb.) ve yapısını ortaya koymak için morfolojik özellikleri belirlenmiştir. Uçucu küllerin morfolojik özellikleri SEM (Taramalı Elektron Mikroskop) analizi ile detaylı bir şekilde ortaya konulmuştur.

2.3.4.1. SEM (Taramalı Elektron Mikroskop) Analizi

Bu analiz sayesinde toz haline getirilmiş katı numuneler üzerine yüksek enerjiye sahip elektronların verilmesi ile numunenin yüzeyinde çeşitli sinyaller üretilmesi sağlanmıştır. Numune ve elektronların etkileşimi ile elde edilen sinyaller sonucu

numuneye ait dış morfolojisi (dokusu), tanelerin şekli, büyüklük dağılımı, tanelerin içinin boşluklu yada dolu yapıda olması gibi numuneye ait değişik görüntüler almasını sağlamaktadır. Analiz sayesinde numune içerisinde 1cm-5 mikron arasındaki bir alanda görüntü almayı kolaylaştırmaktadır. Ayrıca alınan görüntüleri 20X-30.000X kat aralığında büyütme özelliğine sahiptir (URL 18).

Uçucu küller için SEM analizi KTÜ (Karadeniz Teknik Üniversitesi) Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında yapılmıştır. Bu analiz sayesinde numunelerin içerisinde bulunan taneler 500X ve 3500X kat büyütülerek görüntü alınması sağlanmıştır. Farklı büyüklüklerde görüntü alınımı, her iki uçucu külün orijinal ve tüm öğütme süreleri (10, 20, 30, 45 ve 60 dk) üzerine uygulanmış ve öğütmenin tane şekli üzerinde ne gibi bir etkisi olduğu belirlenmiştir.

2.4. Karışım Oranları

Tez çalışması kapsamında katkılı çimento üretmek için iki farklı termik santralden alınmış uçucu küller kullanılmıştır. Bu küller farklı tane inceliklerine getirmek için 10, 20, 30, 45 ve 60 dk bilyalı değirmende öğütülmüştür. Öğütme sonucu her iki uçucu külün (UK) orijinal ve tüm öğütme sürelerine ait farklı tane inceliklerindeki malzemeler ile çimento içerisine (Ç) % 10, % 30 ve % 50 ikame edilmesi sonucu karışımlar hazırlanmıştır (Tablo 2.4).

Tablo 2.4. Uçucu küllerin öğütme sürelerine göre hazırlanan karışım oranları

Öğütme Süresi, dk	Uçucu kül-Çimento Oranı (Ağırlıkça), %					
	Afşin Elbistan uçucu külü			Çayırhan uçucu külü		
	10 -90*	30-70	50-50	10 -90	30-70	50-50
0 (Orijinal kül)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10	✓	✓	✓	✓	✓	✓
20	✓	✓	✓	✓	✓	✓
30	✓	✓	✓	✓	✓	✓
45	✓	✓	✓	✓	✓	✓
60	✓	✓	✓	✓	✓	✓

10 -90*, ilk rakam karışımında uçucu kül miktarını, ikinci rakam çimento miktarını göstermektedir

Uçucu küllerin çimento içerisinde farklı ikame oranlarında kullanımının belirlenmesinde daha önceden bu çalışmaya benzerlik gösteren çalışmalardan yararlanılarak seçim yapılmıştır. Yapılan literatür taramasına göre uçucu küllerin çimento içerisinde mineral katkı olarak kullanımında % 0 ile % 60 aralığında olduğu görülmüştür (Aydın vd., 2010; Hsu vd.,2018; Choi vd., 2012). Ayrıca Çavuşoğlu (2013) yapmış olduğu doktora tezinde ‘ Kimyasal katkıların uçucu küllü dolgularda etkilerinin incelenmesi’ adlı çalışmasında uçucu külleri çimento içerisinde % 80 oranına kadar kullanmıştır. Bu çalışmalardan yararlanılarak tez çalışması kapsamında uygun ikame oranları % 10, % 30 ve % 50 olarak kabul edilmiştir.

Tez çalışmasında 3 farklı karışım oranı hazırlanmış ve bu karışım oranlarında S/B [Su/ Bağlayıcı (Çimento+uçucu kül)] oranı 0,2951 olarak sabit tutulmuştur. Bu oran belirlenirken literatürde yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır. Bu çalışmaya benzer çalışmalardan S/B oranı 0,25-0,50 aralığında tutulmuştur. (Chaipanich ve Nochaiya, 2009; Wang vd., 2017). Bu tez çalışmasında da su/bağlayıcı oranı önceki yapılan çalışmalar dikkate alınarak ve tez çalışmasında kullanılan uçucu küllerin su ihtiyacına göre en uygun oran olarak 0,2951 olarak kabul edilmiştir. Ayrıca uçucu küllerin özelliklerine bağlı olarak su/bağlayıcı oranı uçucu küllerin en kalın (orijinal durumda) ve ince (60 dk öğütme süresi sonrası) tane yapısına sahip malzemeler ile hazırlanan karışımlarda kullanılan su miktarlarının belirlenmesi sonucu hesap edilmiştir. Uçucu küllerin değişik öğütme süreleri ile çimento içerisine ikame edilmesi sonucu hazırlanan karışımlarda kullanılan uçucu kül ve çimento oranları belirlenmiştir. 1. Karışımda, % 10 uçucu kül % 90 çimento, 2. karışımda % 30 uçucu kül % 70 çimento ve 3. Karışımda % 50 uçucu kül % 50 çimento oranlarından oluşmuştur (Tablo 2.5).

Tablo 2.5. Karışım oranları ve numune sayısı

Uçucu Kül tipi	Kür süresi, gün	İkame Oran, %	Öğütme Süresi, dk						Toplam, adet	
			0	10	20	30	45	60		
Afşin Elbistan Uçucu Külü	2	10	3	3	3	3	3	3	18	
		30	3	3	3	3	3	3	18	
		50	3	3	3	3	3	3	18	
	7	10	3	3	3	3	3	3	18	
		30	3	3	3	3	3	3	18	
		50	3	3	3	3	3	3	18	
	28	10	3	3	3	3	3	3	18	
		30	3	3	3	3	3	3	18	
		50	3	3	3	3	3	3	18	
	56	10	3	3	3	3	3	3	18	
		30	3	3	3	3	3	3	18	
		50	3	3	3	3	3	3	18	
	90	10	3	3	3	3	3	3	18	
		30	3	3	3	3	3	3	18	
		50	3	3	3	3	3	3	18	
	Toplam Numune Sayısı, adet			45	45	45	45	45	45	270
	Uçucu Kül tipi	Kür süresi, gün	İkame Oran, %	Öğütme Süresi, dk						Toplam, adet
				0	10	20	30	45	60	
Çayırhan Uçucu Külü	2	10	3	3	3	3	3	3	18	
		30	3	3	3	3	3	3	18	
		50	3	3	3	3	3	3	18	
	7	10	3	3	3	3	3	3	18	
		30	3	3	3	3	3	3	18	
		50	3	3	3	3	3	3	18	
	28	10	3	3	3	3	3	3	18	
		30	3	3	3	3	3	3	18	
		50	3	3	3	3	3	3	18	
	56	10	3	3	3	3	3	3	18	
		30	3	3	3	3	3	3	18	
		50	3	3	3	3	3	3	18	
	90	10	3	3	3	3	3	3	18	
		30	3	3	3	3	3	3	18	
		50	3	3	3	3	3	3	18	
	Toplam Numune Sayısı, adet			45	45	45	45	45	45	270
	*Referans	Katkısız	Kür süresine göre numune sayısı, adet						Genel Toplam	
			2	7	28	56	90	555		
3			3	3	3	3				
* Referans numunesi her iki uçucu kül katkılı karışımlar için aynıdır										

Hazırlanan karışımların su miktarlarının belirlenmesi için kıvam tayini, priz sürelerinin belirlenmesi için priz başlama ve bitiş süresi ve hacim genişleme deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler toplamda 111 adetten oluşmuştur. Bunların 54 adeti Afşin Elbistan uçucu külü ile hazırlanan karışımlara ait olup, 18 adeti kıvam tayini, 18 adeti priz

süreleri ve 18 adeti genişleme deneylerinden meydana gelmiştir. Aynı deneyler ve deney sayıları Çayırhan uçucu külü ile hazırlanan karışımlar içinde yapılmıştır. Geriye kalan 3 adet deney ise sadece çimento ve su ile hazırlanan referans numuneleri için yapılmış ve uçucu kül katkılı karışımlar sonucu elde edilen deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İki farklı tip uçucu kül katkılı numunelerin basınç değerlerinin belirlenmesi için basınç dayanım testleri yapılmıştır. Bu testler numunelerin farklı günlerde (2, 7, 28, 56 ve 90) kür havuzunda bekletilmesi sonunda elde edilmiştir. Her bir kür süresi için 3 adet $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ boyutunda küp numuneleri dökülmüş ve bu 3 numunenin ortalaması alınarak basınç dayanım sonuçları belirlenmiştir. Tablo 2.5’de uçucu küllerin karışım oranları ve numune sayısı verilmiştir.

Kılcal su emme (kapilarite deneyi) deneyi Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin orijinal, 30 dk ve 60 dk öğütme süreleri için yapılmıştır. Bu öğütme sürelerine sahip uçucu küller çimento içerisinde % 10, % 30 ve % 50 oranlarında ikame edilmesi ile uçucu kül katkılı pastalar üretilmiştir. Bu pastaları 28, 56 ve 90 gün kür havuzunda bekletilmiştir. Kür süresini tamamlayan numunelerin geçirimsizlik özelliklerinin belirlenmesi için kılcal su emme (Kapilarite) deneyi yapılmıştır (Tablo 2.6).

Tablo 2.6’da iki farklı uçucu kül tipi için kılcal su emme (Kapilarite) deneyine ait kür süreleri, ikame oranları, öğütme süreleri ve numune sayıları verilmiştir. Bu deney toplamda 57 adet numune üzerine uygulanmıştır. Bu sayının 27 adeti Afşin Elbistan uçucu kül katkılı numuneler, 27 adeti Çayırhan uçucu kül katkılı numuneler, 3 adeti sadece su ve çimentodan oluşan uçucu kül katkısız referans numuneleri üzerine yapılmıştır. Boşluk tayini deneyi basınç dayanım değerleri belirlenmiş numuneler üzerine uygulanmıştır. Bu numuneler $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de 2 gün etüvde kurutulmuştur. Kurutulan numuneler halkalı değirmende toz haline getirilmiştir. Bu malzeme içerisinde bulunan boşluk miktarının belirlenmesi için boşluk tayini (civa porozimetri) deneyi yapılmıştır. Termal analiz iki farklı tip uçucu külün orijinal ve 60 dk öğütme süreleri için yapılmıştır. Bu öğütme sürelerine ait uçucu küller çimento içerisinde % 30 ikame oranında kullanılmıştır. Bu analiz için hazırlanan numunelerin su/bağlayıcı [S/B] oranı 2 olarak kabul edilmiştir. Analiz için toplamda 5 adet numune oluşturulmuştur. Bu numunelerden 2 adeti Afşin Elbistan katkılı uçucu küller ile, 2 adeti Çayırhan uçucu kül katkılı küller ve 1 adeti sadece su ve çimentodan oluşmuş katkısız referans numunesi için yapılmıştır.

Tablo 2.6. Karışım numunelerine yapılan kılcal su emme deneyi

Uçucu Kül tipi	Kür süresi, gün	İkame Oran, %	Öğütme süresi göre numune sayısı, adet			Toplam, adet
			0 dk	30 dk	60 dk	
Afşin Elbistan Uçucu Külü	28	10	3	3	3	9
		30				
		50				
	56	10	3	3	3	9
		30				
		50				
	90	10	3	3	3	9
		30				
		50				
Toplam Numune Sayısı, adet			9	9	9	27
Uçucu Kül tipi	Kür süresi, gün	İkame Oran, %	Öğütme süresi göre numune sayısı, adet			Toplam, adet
			0 dk	30 dk	60 dk	
Çayırhan Uçucu Külü	28	10	3	3	3	9
		30				
		50				
	56	10	3	3	3	9
		30				
		50				
	90	10	3	3	3	9
		30				
		50				
Toplam Numune Sayısı, adet			9	9	9	27
Referans	28	Katkısız	3			3
	56					
	90					
* Referans numunesi her iki uçucu kül katkılı karışım için aynıdır						57

2.4.1. Karışım İçin Malzeme Miktarı Hesabı

Yapılan karışım deneylerinde kullanılan malzeme miktarı için karışımın Su/Bağlayıcı oranı sabit tutulmak şartı ile Denklem 2.1’de verilen değerlerin kullanılması ile belirlenmiştir.

$$\frac{Ç}{\rho_ç} + \frac{P}{\rho_p} + \frac{W_a}{\rho_a} + V_s + A = 1000 \text{ dm}^3 \quad (2.1)$$

Burada;

- Ç : Karışımında kullanılan çimento miktarı, gr
P : Çimento yerine ikame olarak kullanılan mineral katkı (puzolan) miktarı, gr
 $\rho_{\text{ç}}$: Çimentonun yoğunluğu, gr/cm^3
 ρ_{p} : Puzolanın yoğunluğu, gr/cm^3
 V_{s} : Karışımında kullanılan suyun hacmi, cm^3
 W_{a} : Karışımında kullanılan agrega ağırlığı, gr
 ρ_{a} : Agreganın özgül kütlesi, gr/cm^3
A : Betondaki toplam hava miktarı, %

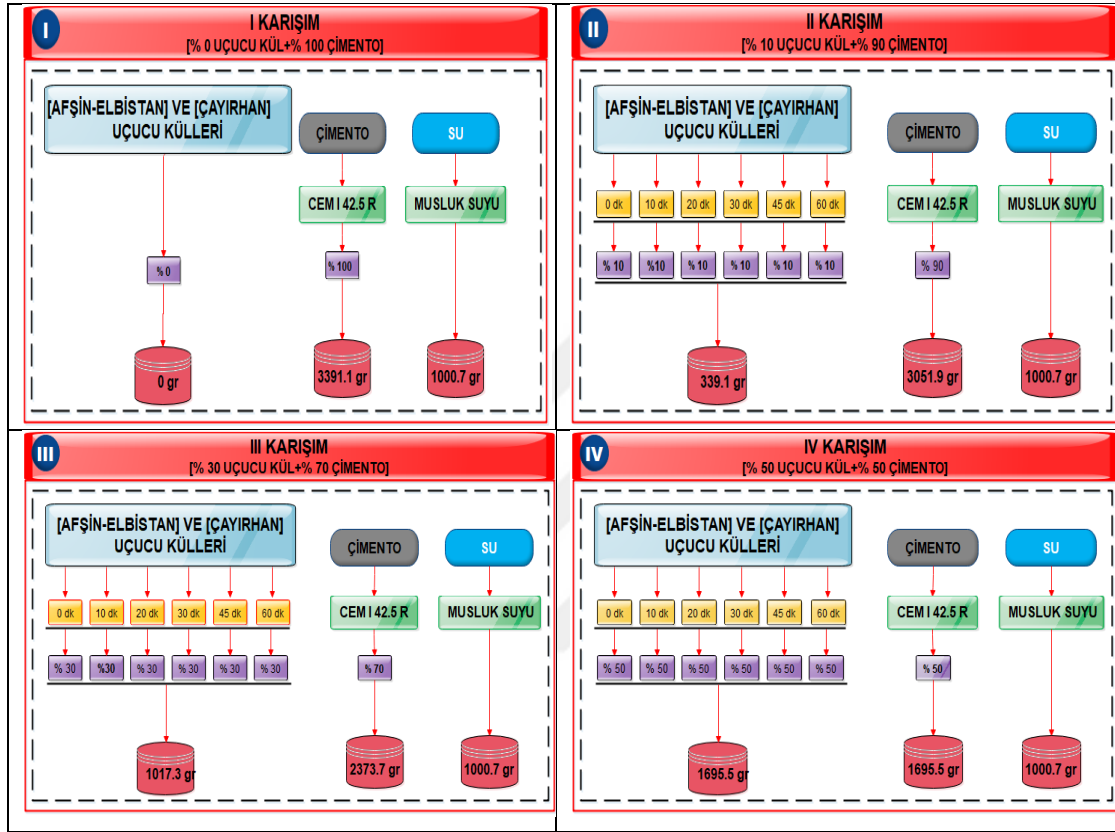
Karışımın malzeme hesabında agrega kullanılmadığından hacim hesabına dahil edilmemiş, hava miktarı da sıfır olarak kabul edilmiştir. Örnek bir karışım hesabı kontrol (sadece çimento ilaveli) numunesi için yapılmıştır. Daha sonra uçucu kül ikame oranına göre çimento miktarı azaltılarak uçucu kül katkılı karışımlar hazırlanmıştır (Tablo 2.7).

Su/ Bağlayıcı oranı (Çimento+ uçucu kül): 0,2951 iken Su: $0.2951 \times \text{Çimento}$ (İlk karışımında uçucu kül kullanılmamıştır).

Tablo 2.7. Karışım için kullanılan malzemelerin miktar hesabı

Karışım Hesabı												
[Su/ bağlayıcı] oranı*	0,2951											
Malzeme Oranları, %	% 0 uçucu kül+ % 100 Çimento			% 10 uçucu kül+ % 90 Çimento			% 30 uçucu kül+ %70 Çimento			% 50 uçucu kül+ % 50 Çimento		
Karışımında kullanılan malzemeler	Çimento	Su	Uçucu Kül	Çimento	Su	Uçucu Kül	Çimento	Su	Uçucu Kül	Çimento	Su	Uçucu Kül
Karışımında kullanılan malzeme miktarları**, gr	3391,1	1000,7	0	3051,9	1000,7	339,1	2373,7	1000,7	1017,3	1695,5	1000,7	1695,5
Malzeme miktarı hesabı	Ç =3391,040 ~ 3391,1 gr Su: 0,2951*x 3391,1= 1000,69 ~ 1000,7 gr			Çimento miktarı: 3391,1 gr olup % 10 Uçucu kül: 3391,1 x 0,10= 339,1 gr olup çimento miktarından çıkarıldığında çimento: 3051,9 gr			Çimento miktarı: 3391,1 gr olup % 30 Uçucu kül: 3391,1 X 0,30= 1017,3 gr iken çimentodan bu değer çıkarılarak karışımında kullanılan çimento: 2373,7 gr			Çimento miktarı: 3391,1 gr olup % 50 Uçucu kül: 3391,1 X 0,50= 1695,5 gr iken çimentodan bu değer çıkarılarak karışımında kullanılan çimento: 1695,5 gr		
*Su/ bağlayıcı oranı iki farklı uçucu külün 0, 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme süreleri için en iri (0 dk) ve en ince (60 dk) öğütme sürelerine ait malzemelerle hazırlanan ön karışımlar sonucu belirlenmiştir. ** karışımlarda kullanılan malzeme miktarı, uçucu küllerin her bir öğütme süresi (0, 10, 20, 30, 45 ve 60 dk) için farklı ikame oranlarında (% 10, % 30 ve % 50) hazırlanan karışımlarda kür süresine (2, 7, 28, 56 ve 90 dnlük) göre kullanılan kalıp sayısı ile belirlenmiştir. 1 karışım için, örneğin 0 dk öğütmeli çimento içerisine % 10 uçucu kül ikameli karışımın her bir kür süresi için 1 adet olmak üzere toplamda 5 adet kalıp kullanılmıştır. 1 adet kalıp 5x5x5 cm ³ boyutunda olup kalıp hacmi 375 cm ³ değerinde hesap edilmiştir. 1 karışım için 5 adet kalıp kullanılmakta olup toplam kalıp hacmi 375x5= 1875 cm ³ olarak hesap edilmiştir. Deney esnasında oluşabilecek malzeme kayıplar göz önünde bulundurularak hesap edilen kalıp hacminin yaklaşık % 11,71 oranında fazla miktarda hesap edilmesi ile toplam karışım hacmi 2094,58 cm ³ değeri üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.												
Karışımında kullanılan malzeme miktarları hacim hesabına göre denklem 2.1'de hesaplamalar yapılmış ve bütün karışımlarda su miktarı sabit kabul edilmiştir.												
Su/ Bağlayıcı oranı (Çimento+ uçucu kül): 0,2951 iken Su: 0,2951 x Çimento (İlk karışımında uçucu kül kullanılmamıştır) Toplam Hacim: 2094,58 cm ³ Çimentonun özgül ağırlığı: 3,10 gr/ cm ³ Suyun özgül ağırlığı: 1 gr/ cm ³ olup denklem 2.1'de bilinenler yerine yazılarak karışımında kullanılan su ve çimento miktarı belirlenmiştir. Ç =3391,040 ~ 3391,1 gr, Su: 0,2951x3391,1= 1000,69 ~ 1000,7 gr												

Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu kül katkıli karışımlarda kullanılan malzeme miktarları Şekil 2.10'da verilmiştir. Şekil 2.10'da I karışım uçucu kül katkısız sadece çimento ve sudan oluşmuş referans numunesinden oluşmuştur. II., III., ve IV. karışımlar değişik oranlı uçucu kül katkıli karışımlardan oluşmuştur.

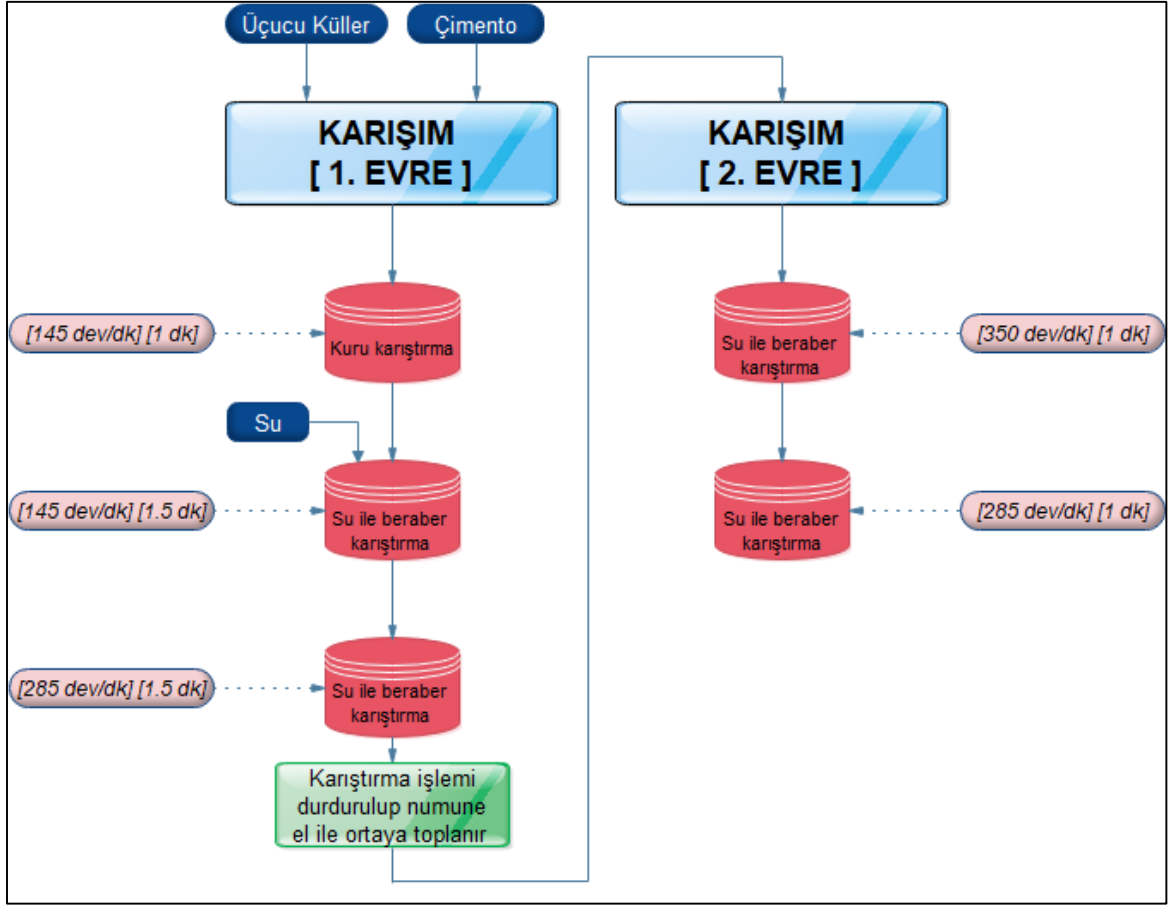


Şekil 2.10. 4 farklı karışım oranları ve malzeme miktarları

2.4.2. Karışım Numunelerinin Hazırlanması

İki farklı tip uçucu kül ve çimento kullanımı ile hazırlanan karışımların malzeme miktarları belirlenmiştir. Belirlenen malzeme miktarları numuneler Şekil 2.11'de verilen karıştırma aşamalarına göre üretilmiştir.

Karışım numuneleri Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında hazırlanmıştır. Numunelerin karıştırılmasında 10 lt kapasiteli (Şekil 2.12d), 1 KW motor gücünde ve 3 farklı devir hızında (145/285/350 devir/dk) çimento mikseri kullanılmıştır. Malzemelerin karıştırılması ilk etapta kap içerisinde kuru olarak el ile yapılmıştır (Şekil 2.12b) ve cihazın karıştırma kabına boşaltılmıştır (Şekil 2.12c).



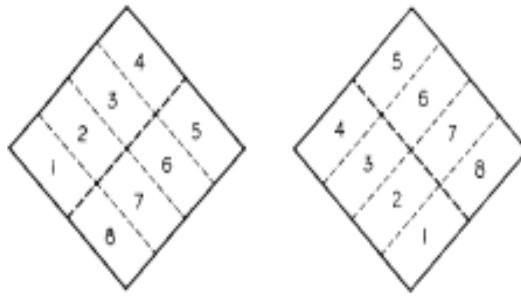
Şekil 2.11. Karıştırma numunelerinin hazırlanması için karıştırma aşamaları

Karıştırma işlemi toplamda 2 evreden ve 6 dk'dan oluşmuş olup, farklı devirlerde malzeme ilavesi ile karıştırma işlemi yapılmıştır.



Şekil 2.12. Karıştırma numunelerinin hazırlanması; a) numunelerin tartılması, b) el ile ön karıştırma, c) mikserle ön karıştırma, d) tüm malzemelerin bir arada karıştırılması

Karışım sonrası malzemeler ASTM C 109/C 109M-07 standartında belirtilen 50x50x50 mm boyutunda küp kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıba yerleştirilen malzeme aynı standartta belirtilen el ile sıkıştırma yöntemi içerisinde hava kalmayacak şekilde vibrasyona tabi tutulmuştur. Kalıpların el ile vibrasyon işlemi 2 kısımdan oluşmuştur. İlk kısımda, kalıplar yarısına kadar doldurulup Şekil 2.13’de belirtilen yönde 4 tur (32 defa) dik açı olacak şekilde yaklaşık 10 sn içerisinde plastik tokmakla sıkıştırma işlemi yapılmıştır.



Şekil 2.13. El ile vibrasyon işlemi (ASTM C 109/C 109M-07).

İkinci kısım, kalıbın geri kalan kısmı doldurularak yine aynı 1. kısımdaki gibi ancak bu sefer plastik tokmak doldurulan üst kısma gelecek şekilde sıkıştırma yapılarak vibrasyon işlemi tamamlanmıştır. Daha sonra yüzeyi masterla düzeltilip üzeri yağlanarak cam ile kapatılmıştır. Yüzeyi kapatılan kalıplar suyunu kaybetmemesi için nemli bezle üzeri örtülmüştür. Bu şekilde yaklaşık 20-25 °C sıcaklıkta ve % 50 nemli laboratuvar ortamında 1 gün bekletilmiştir. Ardından yaklaşık 23 °C sıcaklığa sahip kür havuzunda bekletilmeye bırakılmıştır (Şekil 2.14).



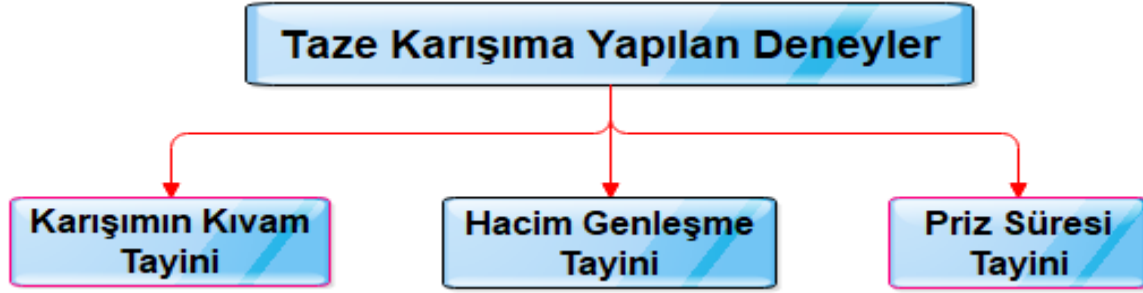
Şekil 2.14. Numunelerin kalıplara yerleştirilmesi; a) numunenin yüzeyinin düzeltilmesi, b) cam ile yüzeyinin kapatılması, c) nemli bezle kalıpların sarılması, d) kür havuzunda numunelerin bekletilmesi

2.4.3. Karışım Numunelerine Yapılan Deneyler

Uçucu küllerin çimentoya katılması ile hazırlanan karışımların taze ve sertleşmiş durumları için farklı deneyler yapılmıştır. Taze haldeki karışımlar için kıvam, priz süreleri ve hacim genişleme deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş numunelerin farklı kür sürelerine (2, 7, 28, 56 ve 90 günlük) ait basınç dayanım değerleri belirlenmiştir. Numunelerin puzolanik özelliklerinin belirlenmesi için 28 ve 90 günlük puzolanik aktivite indeksi deneyi yapılmıştır. Sertleşmiş numunelerin mikro yapı özelliklerini belirlemek için boşluk tayini, termal analiz ve kılcal kanallar yolu ile (kapilarite) emmiş oldukları su miktarları belirlenmiştir.

2.4.3.1. Taze Haldeki Numuneler Üzerine Yapılan Deneyler

Farklı oranlarda ve öğütme sürelerinde kullanılan uçucu küllerle hazırlanan karışım numuneleri için gerekli olan su miktarlarının belirlemede kıvam tayini deneyi yapılmıştır. Karışımların sertleşmeye başladığı ve tamamen katılaşma sürelerinin belirlenmesi için priz başlama ve bitiş süresi tayini ve karışımın kimyasal bileşimine bağlı olarak hacim genişleme deneyleri yapılmıştır (Şekil 2.15)



Şekil 2.15. Taze numuneler üzerine yapılan deneyler

2.4.3.1.1. Kıvam Tayini

Uçucu küllerin orijinal ve 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme sürelerinin her biri için çimento yerine % 10, % 30 ve % 50 ikame edilmesi ile hazırlanan karışımların su miktarlarını belirlemek için kıvam tayini deneyi yapılmıştır. Kıvam tayini deneyi TS EN 196-3+A1 standardına göre yapılmıştır. Bu deney Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası laboratuvarında vicat aleti kullanılarak belirlenmiştir.

Deneye ilk olarak kontrol numunesi için 500 gr çimento kullanılarak başlanmıştır (Şekil 2.16). Uçucu küllerin her bir öğütme süresi ile çimento içerisinde farklı oranlarda ikame edilmesi sonucu hazırlanan tüm karışımların kıvam tayinleri belirlenmiştir. Kıvam tayini deneyi için malzemelerin karıştırılmasında 5 lt kapasiteli çimento mikseri kullanılmıştır. Karışımların uygun kıvam değerini yakalamak için kullanılan su miktarını belirlemede ilk etapta karışıma düşük su ilavesi ile başlanmıştır. Malzemelerin 5 lt kapasiteli çimento mikserinde karıştırılması farklı devirlerde ve sürelerde yapılmıştır. Karışım ilk olarak 90 sn düşük hızda (140 ± 5 devir/dak) karıştırılmış ve 30 sn sonra cihaz durdurularak malzemenin kenarlarının toparlanması sağlanmıştır. Daha sonra karışım standartta ifade edilen uygun kıvam değerini yakalamaması durumunda ek su ilavesi ile 90 sn daha düşük hızda karıştırılarak işlem sonlandırılmıştır. Sonrasında karışım hafif yağlanmış numune kabına konulmuş ve yüzeyi düzeltilmiştir. Numune doldurulmuş kap vicat cihazının tam merkezine yerleştirilmiştir. Vicat sondası pastanın merkezine girmesinden 30 sn sonra ibredeki yazılan değer kayıt altına alınmıştır. Şayet ibrede okunan değer 6 ± 2 mm (en az 2 mm en çok ise 8 mm) arasında değilse karışım için ilave edilen suyun yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Karışımın kıvamı standartta belirtilen seviyelerde olmaması durumunda uygun kıvam değerini yakalamak için deneye su ilave edilerek işlemler tekrar edilmiştir.

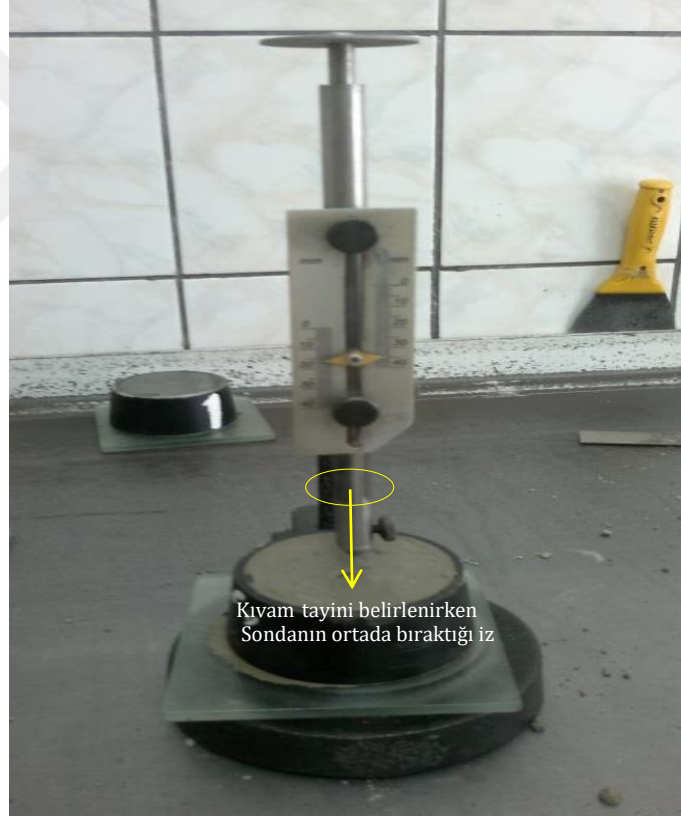


Şekil 2.16. Standart kıvam tayini; a) malzemelerin karıştırılması, b) karışımın yağlanmış numune kabına yerleştirilmesi, c) kap içerisindeki numunenin yüzeyinin düzeltilmesi, d) numunenin vicat cihazına yerleştirilmesi, e) sondanın bırakılması, f) uygun batma değerinin okunması

Karışımın uygun kıvamın yakalanması durumunda sonradan eklenen su miktarı başlangıçtaki su miktarı üzerine ilave edilerek karışım için uygun kıvamdaki gerçek su değeri en yakın % 0,5 yuvarlatılarak hesaplanmıştır.

2.4.3.1.2. Priz Süresi Tayini

Kıvam tayini için hazırlanmış karışımlar üzerine TS EN 196-3+A1 standardına göre priz süresi tayini yapılmıştır. Bu deney Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası laboratuvarında vicat aleti kullanılarak yapılmıştır. Kıvam tayini yapılırken priz süresinin belirlenmesi için ilk olarak karışım malzemelerinin ve suyun karıştırıldığı ilk andaki saat bir yerde kayıt altına alınmıştır. Uygun bir süre sonra (numunelerin donmaya başlaması), kalıp taban plakası ve kap vicat cihazı iğnesinin altına yerleştirilmiştir. Ancak iğne altına yerleştirilen kalıp tam ortasından yerleştirilmemiştir. Çünkü kıvam tayini için sondanın bıraktığı açıklığa denk gelme ihtimalinden dolayı priz süresini yanlış hesaplamaya neden olmuştur (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Vicat cihazında iğne altına yerleştirilen kalıp

İğnenin ucu ile taban plakası arasındaki mesafeyi veren skala değeri, sıfır anından itibaren geçen süre ile birlikte kaydedilmiştir. İğnenin aynı numuneye batırılma işlemi için iki batırma noktası arasındaki mesafe farkına dikkat etmek gereklidir. Bu mesafeler batırma noktaları arasında en az 5 mm, batırma noktası ile kalıp kenarı arasında 8 mm ve

iğnenin bir önceki batırıldığı yer ile en az 10 mm mesafe kalacak şekilde ayarlanması gereklidir. Ayrıca batırma işleme en az 10 dakika aralıklarla tekrar edilmesi gereklidir. Bu işlemler numune donmaya başladığında yani priz süresi başlayana kadar devam ettirilmelidir. “Sıfır” olarak kabul edilen başlangıç zamanından itibaren, iğne ile taban plakası arasındaki mesafe 6 ± 3 mm arasında en az 3 mm en fazla 9 mm oluncaya kadar geçen süre en yakın 5 dakikaya yuvarlatılarak priz başlangıç süresi olarak kaydedilmiştir. Priz bitiş süresi, “Sıfır” anından iğnenin numuneye ilk defa 0,5 mm girdiği ana kadar geçen süre, priz bitiş süresi olarak alınmış ve en yakın 15 dakikaya yuvarlatılarak kaydedilmiştir. Örneğin: kıvam deneyi yapılırken su ve çimentonun karıştırılma saati 9:25 olarak kaydedilmiştir. Daha sonra priz süresi belirlenirken vicat iğnesi numuneye batırıldığında sonda üzerindeki gösterge 3 mm-9 mm arasında olduğu saat 11:25 olarak kaydedilmiştir. Bu iki saat arasındaki fark 2 saat olarak (11:25- 9:25) belirlenmiş olup priz başlama saate olarak kaydedilmiştir. Laboratuvarda priz bitiş süresi belirlenirken su ve çimento ilk olarak karıştırıldığı andaki saat 9:25, sondanın iğnesi numuneye 0.5 mm’lik bir batma yaptığı andaki saat 12:25 olarak kaydedilmiştir. İki saat arasında 12:25-9:25 fark 3 saat olarak belirlenmiş olup priz bitiş süresi olarak kaydedilmiştir.

2.4.3.1.3. Genleşme Tayini

Kıvam tayini için hazırlanmış karışımlar üzerine TS EN 196-3+A1 standardına göre hacim genleşme deneyi yapılmıştır. Bu deney Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası laboratuvarında Le Chatelier cihazı kullanılarak yapılmıştır. Genleşme deneyinin esas amacı malzeme içerisinde bulunan bağlanmamış (serbest) kalsiyum oksit ve/veya magnezyum oksit hidrasyonu sebebiyle sonradan ortaya çıkabilecek genleşme riskinin değerlendirilmesi için yapılmıştır.

Deneye ilk olarak hafif yağlanmış Le Chatelier kalıbını yine hafif yağlanmış olan plakanın üzerine koyulması ile başlanmıştır (Şekil 2.18a). Karışımın kalıba doldurma sırasında kalıbın yarık kısmının açılmaması için parmaklar hafif sıkılmış, uçları bağlanmış veya uygun bir lastik bantla tutturulmuştur (Şekil 2.18 b). Kalıbın üstü hafif yağlanmış plaka ile örtülmüş ve gerekirse ilave kütle eklenmiştir (Şekil 2.18 c). İlave kütle eklenmesindeki amaç standartta deney gereği toplam ağırlık en az 75 g olması ön görülmüştür. Le Chatelier kalıbının uçlarındaki lastikler çıkarılmış ($24 \pm 0,5$) saat ($20^{\circ}\text{C} \pm 1$) $^{\circ}\text{C}$ 'de ve % 90'dan az olmayan bağıl nem olan dolapta su içerisinde muhafaza edilmiştir

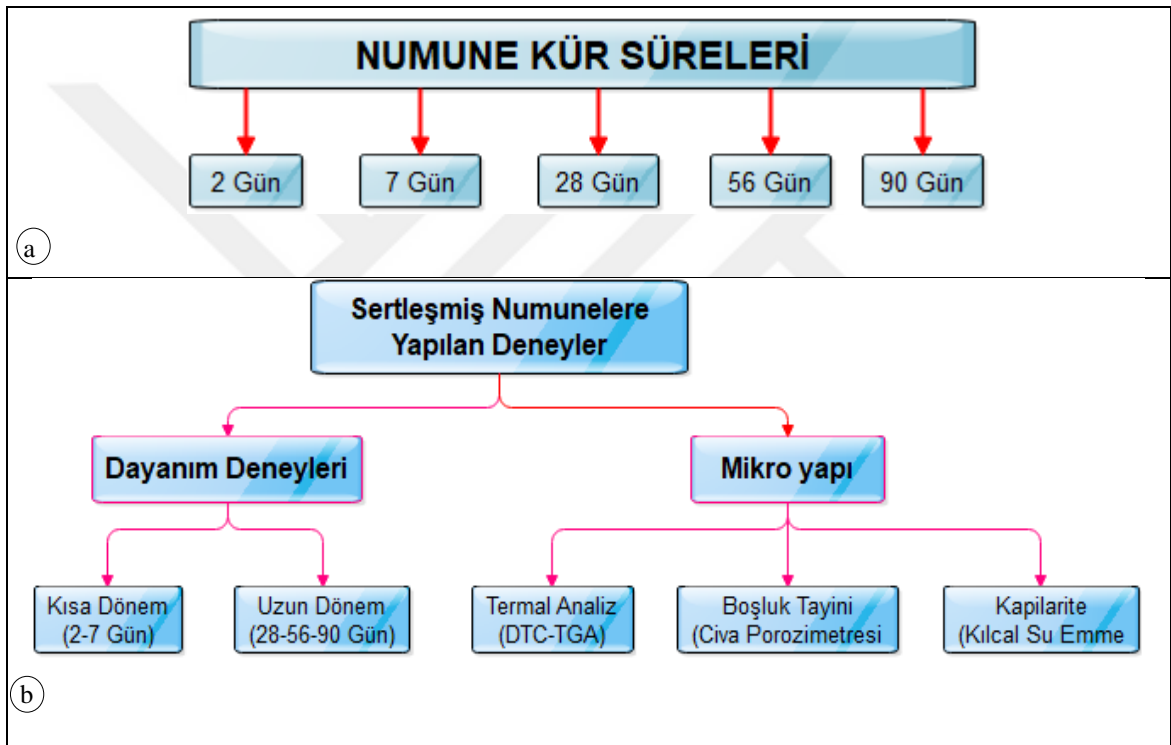
(Şekil 2.18 d). $24 \pm 0,5$ saatlik süre sonunda gösterge uçları arasındaki mesafe (A) en yakın $0,5 \text{ mm}$ 'ye yuvarlatılarak ölçülmüştür (Şekil 2.18e). Sonra kalıbı 30 ± 5 dakika içinde kaynama sıcaklığına kadar ısıtılan su banyosuna koyulmuş ve kaynatma sıcaklığında ($3 \text{ saat} \pm 5 \text{ dakika}$) daha bekletilmiştir (Şekil 2.18 f). Kaynama süresi sonunda gösterge uçları arasındaki mesafeyi (B) en yakın $0,5 \text{ mm}$ 'ye yuvarlatılarak ölçülmüştür. Kalıp kaynama dolabından çıkarılarak ($20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$)'ye kadar soğuması için bekletilmiştir. Soğuyan numunenin gösterge uçları arasındaki mesafeyi (C) en yakın $0,5 \text{ mm}$ 'ye yuvarlatılarak ölçülmüştür. Her numune için (A) ve (C) ölçümlerini kaydedilmiş ve (C-A) farkını en yakın $0,5 \text{ mm}$ 'ye yuvarlatılarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.18. Hacim genişleme deneyi; a) numune kabının hazırlanması, b) karışımın kalıba doldurulması, c) kalıp üzerine ağırlık koyulması, d) kür dolabında bekletilmesi, e) kür süresi sonrası ilk ölçümün alınması, f) numunenin kazanda kaynatılması

2.4.3.2. Sertleşmiş Numuneler Üzerine Yapılan Deneyler

Karışım numuneleri, belirlenen kür süresine göre kür havuzunda bekletilmiş ve daha sonra farklı deneyler ve analizler yapılmıştır (Şekil 2.19). Kür süresini tamamlamış numunelerin basma dayanım değerlerinin belirlenmesi için tek eksenli basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Puzolanik aktivite indeksi değerlerinin belirlenmesi için numunelerin 28 ve 90 günlük puzolanik aktivite sonuçları belirlenerek standartta belirtilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.19. Sertleşmiş numuneler üzerine yapılan deney ve analizler; a) kür süreleri, b) dayanım ve mikro yapı

Basınç dayanım değerleri sonuçlarına göre uçucu küllerin orijinal ve 30 ve 60 dk öğütmeli malzemelerin çimento içerisinde % 10, % 30 ve % 50 ikame edilmesi sonucu hazırlanan numuneler üzerine kılcal su emme (kapilarite) deneyi yapılmıştır. Bu deney sayesinde uçucu kül katkılı karışımların geçirimsizlik özellikleri sayesinde mikro yapı incelemesi yapılmıştır. Kılcal su emme deneyinin yanı sıra mikro yapı incelemeleri için numuneler Ortadoğu Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarına gönderilmiştir. Burada basınç dayanım değerleri elde edilen numunelerin 7 ve 90 günlük kür süresi sonunda

boşluk yapılarının belirlenmesi için boşluk tayini (civa porozimetresi) deneyi yaptırılmıştır. Mikro yapı incelemelerinden termal analiz için S/B [su/bağlayıcı] oranı 2 olarak belirlenmiş 0 ve 60 dk öğütülmüş uçucu küllerin çimento yerine % 30 ikamesi ile karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımlarda uçucu kül katkısının ve inceliğinin çimento hidrasyonu üzerine etkisini belirlemek için 90 günlük kür süresini tamamlamış numuneler üzerine termal analiz yaptırılmıştır.

2.4.3.2.1. Basınç Dayanımı

Karışım numunelerinin 2, 7, 28, 56 ve 90 günlük tek eksenli basınç dayanım deneyleri TS EN 196-1 standardında göre Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarında yapılmıştır. Deneyin, iki farklı tip özelliğe sahip uçucu küllerin çimentoda mineral katkı olarak kullanılmasında uygun ikame oranı ve öğütme süresi için optimum basınç dayanım değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deney için kullanılan tek eksenli basma cihazı, 0,5-20 KN/sn yükleme hızında ve 2000 KN kapasite özelliklere sahiptir.

Deney ilk olarak önceden tasarlanmış karışım dizaynına göre (Şekil 2.10 ve Şekil 2.11) karıştırılmış ve uygun olarak numuneler üretilmiştir. Üretilmiş numunelerin belirlenen kür süresi sonunda basınç dayanım değerlerinin belirlenmesi için kür havuzundan 15 dk öncesinde çıkarılarak nemli bez içerisinde muhafaza edilmiştir. Numune kalıp içerisinde üst yüzeyi cihazın karşısında duran kişiye bakacak şekilde cihaza yerleştirilmiş (Şekil 2.20a) ve 2400 (\pm 200) N/sn yükleme hızının ayarlanması ile basınç dayanım değerleri cihaz ekranından okunmuştur (Şekil 2.20b).



Şekil 2.20. Basınç dayanımı; a) numunenin kırılması, b) cihaz göstergesi

2.4.3.2.2. Puzolanik Aktivite Deneyi

Her iki uçucu külün tüm öğütme süreleri için Puzolanik aktivite deneyi, Türkiye Hazır Beton Birliğine TS EN 450-1 (2008) standardına uygun olarak 28 ve 90 günlük kür süresi için yaptırılmıştır. TS EN 450-1 (2008) standardına göre deneyde puzolanik aktivite indeksi değeri; kütlece % 75 çimento ve % 25 uçucu kül ile hazırlanan harçların basınç dayanımları sadece çimento ile hazırlanan standart harç numunesinin basınç dayanımına oranı (% olarak) şeklinde ifade edilmiştir. Puzolanik aktivite indeksi= $(A/B) \times 100$, A: puzolanik harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı, B: Kontrol harçların ortalama basınç dayanımı şeklinde formülize edilmiştir. Bu oran 28 ve 90 günlük olarak sırası ile \geq % 75 ve \geq % 85 olarak belirlenmiştir.

2.4.3.3. Mikro Yapı

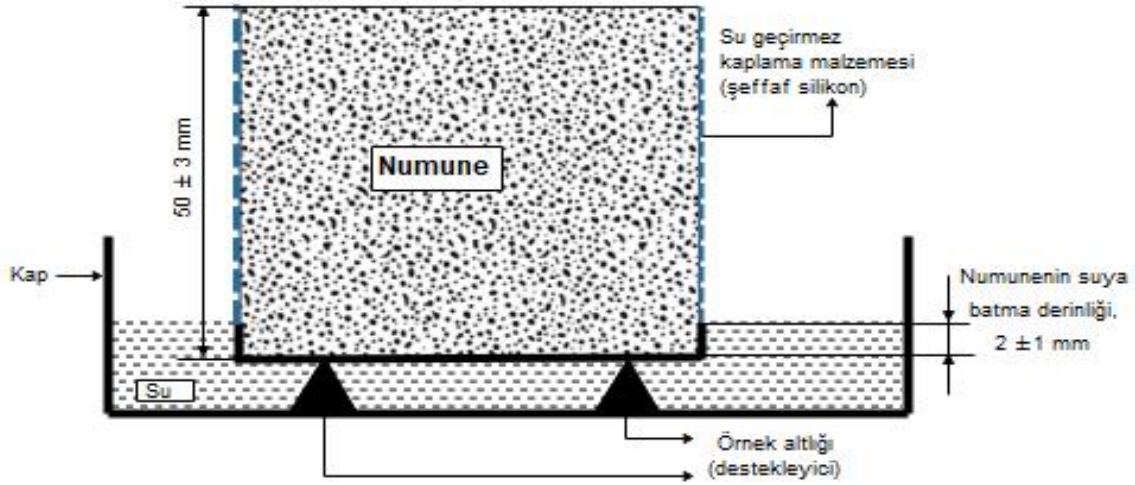
Çalışmada mikro yapı incelemeleri için numunelerin içerisinde oluşan boşluk yapısının belirlenmesi için boşluk tayini, kapiler kanallar yolu ile emmiş oldukları su miktarlarını belirlenmesi için kapilarite deneyi, sıcaklığa bağlı olarak oluşan karışımdaki fazların etkisi ile ağırlık kaybını belirlemek için termal analiz deneyleri yapılmıştır.

2.4.3.3.1. Kılcal (Kapiler) Kanallar Yolu ile Su emme

Kapilarite deneyi ASTM C 1585-04 standardına göre yapılmıştır. Deneyin yapımı için Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarı kullanılmıştır. Deneyde iki farklı uçucu külün değişik öğütme süreleri ve çimento içerisine ikame edilen uçucu kül oranının geçirimsizlik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca numunelerin geçirimsizlik özellikleri üzerine kür süresinin etkisini belirlemek için farklı kür sürelerine ait (28, 56 ve 90 günlük) numuneler üzerine kılcal su emme deneyi yapılmıştır. Deneyde her bir ölçüm için 3 adet numune kullanılmış ve bu numunelerin ortalamaları alınarak sonuçlar hesaplanmıştır.

Deneye ilk olarak kür süresini tamamlamış numuneleri kür havuzundan çıkarıp etüvde 50 ± 2 °C sıcaklıkta 3 gün bekletilmesi ile başlanmıştır. 3. günün sonunda etüvden çıkarılan numuneler soğuması için laboratuvar ortamında bekletilmeye bırakılmıştır. Soğuyan numunelerin tüm yan yüzeyleri sıvı geçirmez kaplama malzemesi (şeffaf silikon)

ile 50 ± 3 mm yüksekliğine kadar kapatılmış ve ilk tartım değeri terazide ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Daha sonra su dolu kap içerisine numunelerin tabanları suya 2 ± 1 mm değecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.21). Bu şekilde yerleştirilen numunelerin 1, 5, 10, 20, 30 dk, 1, 2, 3, 4, 5, 6 saat, 1, 2, 3, 5, 6, 7 ve 8 gün aralıklarla ağırlık değişimleri ölçülmüştür (Şekil 2.22 a ve b). Elde edilen su emme miktarlarına göre kapilarite kat sayısı değerleri Denklem 2.2 ve Denklem 2.3 kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.21. Kılcal su emme (kapilarite) deneyi düzeneyi

Kümülatif olarak hesaplanan kapiler su emme değerleri zamanın kareköküne bağlı olarak grafik haline dönüştürülmüştür. Numunelerin kapiler olarak emdiği su miktarı, yüzey alanı ve geçen zamanın karekökü ile doğru orantılıdır. Orantı sabiti olan ve kapilarite katsayısı adı verilen K sayısı, numunenin boşluklarına bağlı bir özelliktir. Numunelerin başlangıçtaki ağırlıklarına göre, ağırlık farkları hesaplanmıştır.

$$I = \frac{mt}{a/d} \quad (2.2)$$

Bu eşitlikte;

I : Kapiler su emme (mm)

mt : Örneğin zamana bağlı (t) gram olarak kütledeki değişim

a : deneye maruz örneğin alanı (mm^2)

d : suyun yoğunluğu (g/mm^3)

Bu eşitlik kullanılarak denklem 2.3'de verilen değer hesaplanmıştır.

$$K = \frac{Q^2}{A^2 \times t} \text{ cm}^2/\text{sn} \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte;

- K : Kapilarite katsayısı (cm²/s)
 A : Su ile temas eden alan (cm²)
 t : Geçen zaman (s)
 Q : Emilen su miktarı (cm³)



Şekil 2.22. Kapilarite deneyi; a) Afşin Elbistan uçucu kül ikameli numuneler, b) Çayırhan uçucu kül ikameli numuneler

2.4.3.3.2. Termal Analiz

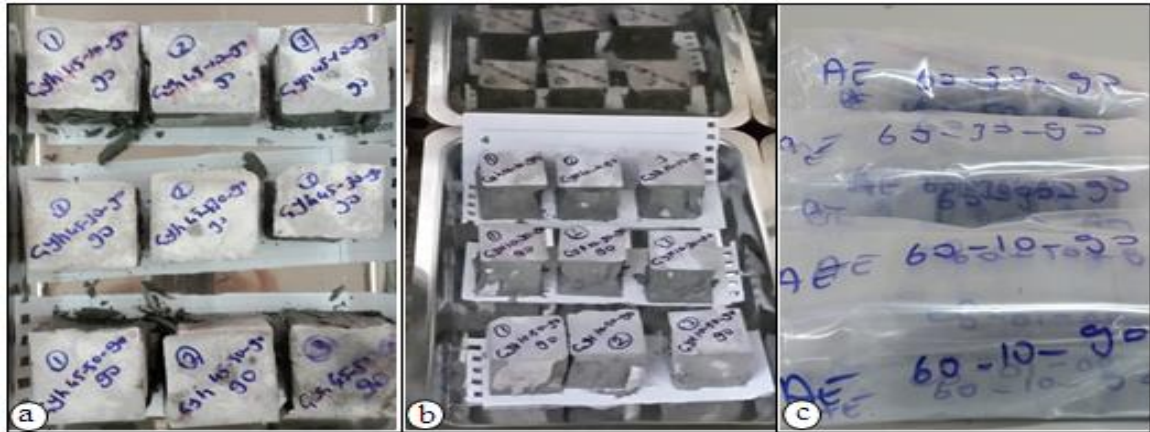
Bu analiz için hazırlanan karışımlarda Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin orijinal ve 60 dk öğütme sürelerine ait malzemeler ile yapılmıştır. Bu malzemeler çimento içerisinde % 30 ikame oranında kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlarda S/B [su/bağlayıcı] oranı 2 olarak kabul edilmiştir (Şekil 2.23). Analiz 20 ml/dakika akış hızında azotlu (N₂) ortamda 10 °C /dakika artış hızında 900 °C kadar yükseltgenerek yapılmıştır. Numunelerin hazırlık aşaması Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında tamamlanmıştır. Numuneler laboratuvar ortamında 90 günlük kür süresini tamamlayana kadar ağızları hava almayacak şekilde kapatılmış ve muhafaza edilmiştir. 90 günlük kür süresini tamamlayan numuneler bekletildikleri kaplardan çıkarılarak kuruması için etüvde 50 °C sıcaklıkta 4 gün bekletilmiştir. Ardından halkalı değirmende öğütülmüştür. Öğütülmüş numunelere termal analiz yapılmak üzere Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarına gönderilmiştir.



Şekil 2.23. Termal analiz için gönderilmeye hazır numuneler

2.4.3.3.3. Boşluk Oranı Tayini

Karışım numuneleri üzerine uygulanan tek eksenli basma dayanım deneyi sonrası kırılan numuneler üzerine boşluk oranı tayini yaptırılmıştır. Analiz, iki farklı uçucu kül ve sadece çimento ile üretilen kontrol numunelerinin 7 ve 90 günlük kür süresine ait seçili numuneler üzerine uygulanmıştır. Analize gönderilmeden önce kırılan numuneler 50 °C'de 2 gün etüvde kurutulmuştur (Şekil 2.24) ve ardından Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarına boşluk tayini analizi için gönderilmiştir.



Şekil 2.24. Boşluk tayini analizi; a) tek eksenli basma cihazında kırılan numunelerin tepsiye dizilmesi, b) etüvde 50 °C'de 2 gün kurutulması, c) kurutulan numunelerin rutubet almaması için poşetlenmesi

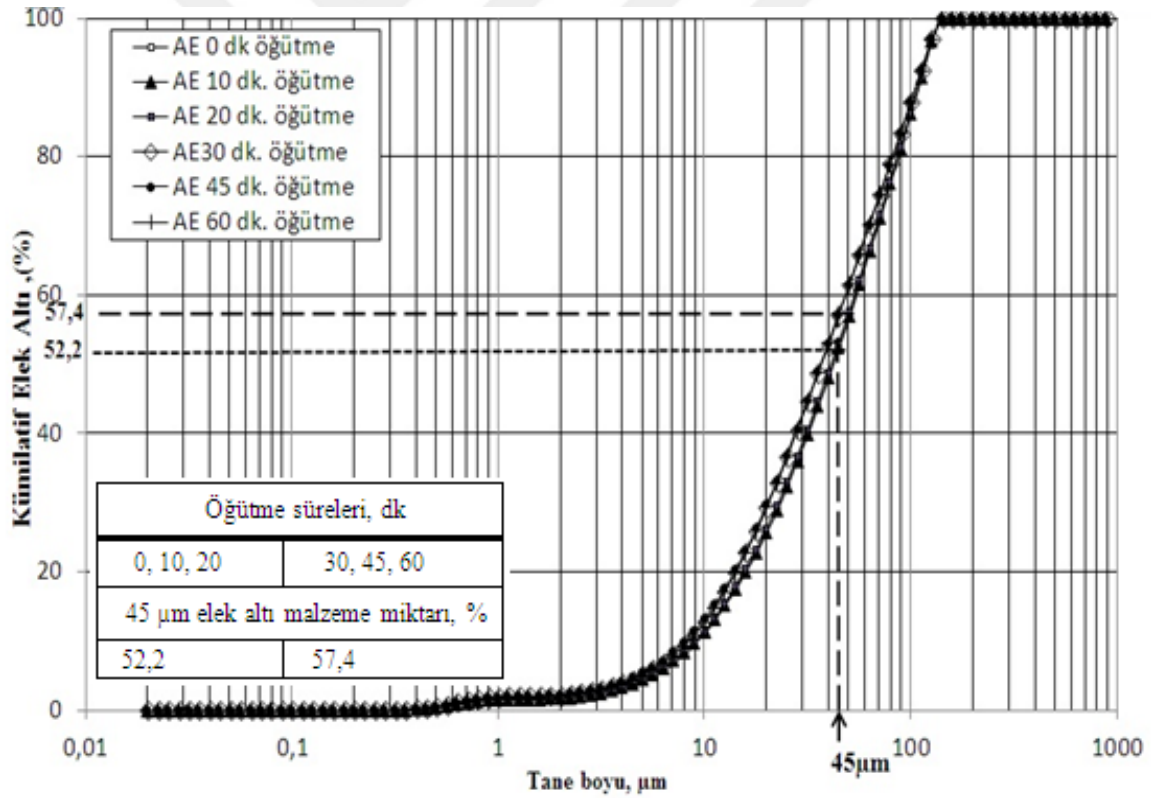
3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

3.1. Malzeme Karakterizasyonu

3.1.1. Fiziksel Özellikler

3.1.1.1. Uçucu Küllerin Tane Boyutu

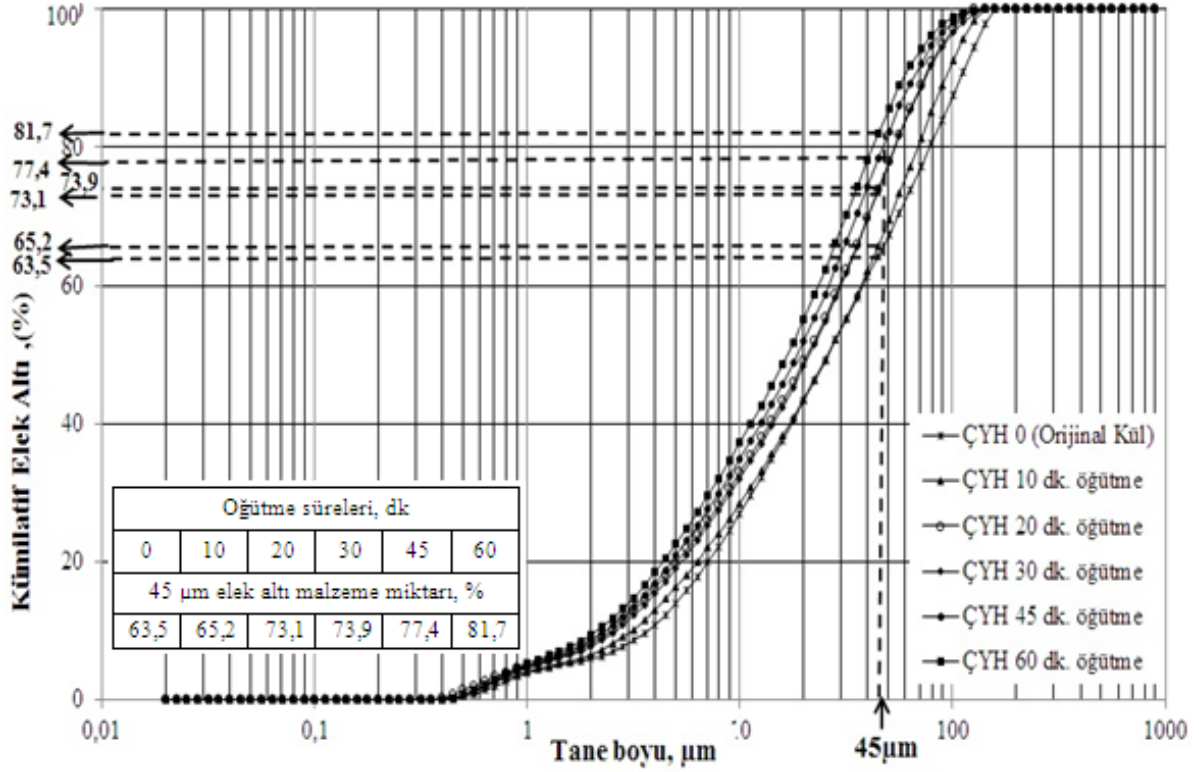
Deneysel çalışmada katkılı çimento üretmek için yapay puzolan olan uçucu küllerin (Afşin Elbistan (AE) ve Çayırhan (ÇYH) orijinal ve farklı zaman aralıklarına (10, 20, 30, 45 ve 60 dk) ait tane boyu analiz sonuçları Şekil 3.1 ile Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Afşin Elbistan uçucu külünün tüm öğütme sürelerine ait tane boyu analizi

Analiz sonucuna göre Afşin Elbistan uçucu külünün tüm öğütme sürelerine ait tane boyu analiz sonuçları bir birine çok yakın değerler almıştır. Şekil 3.1’de tane boyu analiz

grafiğine göre orijinal durumda olan uçucu külün 45 μm elek altına geçen malzeme miktarını yaklaşık % 52,2 iken 60 dk öğütme sonrası yaklaşık % 57,4 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Çayırhan uçucu külünün tüm öğütme sürelerine ait tane boyu analizi

Şekil 3.2'de Çayırhan uçucu külüne ait tane boyutu analiz sonucuna göre 45 μm elek altına geçen malzeme miktarı orijinal kül ile 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme süreleri için sırası ile % 63,5, % 65,2, % 73,1, % 73,9, % 77,4, % 81,7 olarak belirlenmiştir.

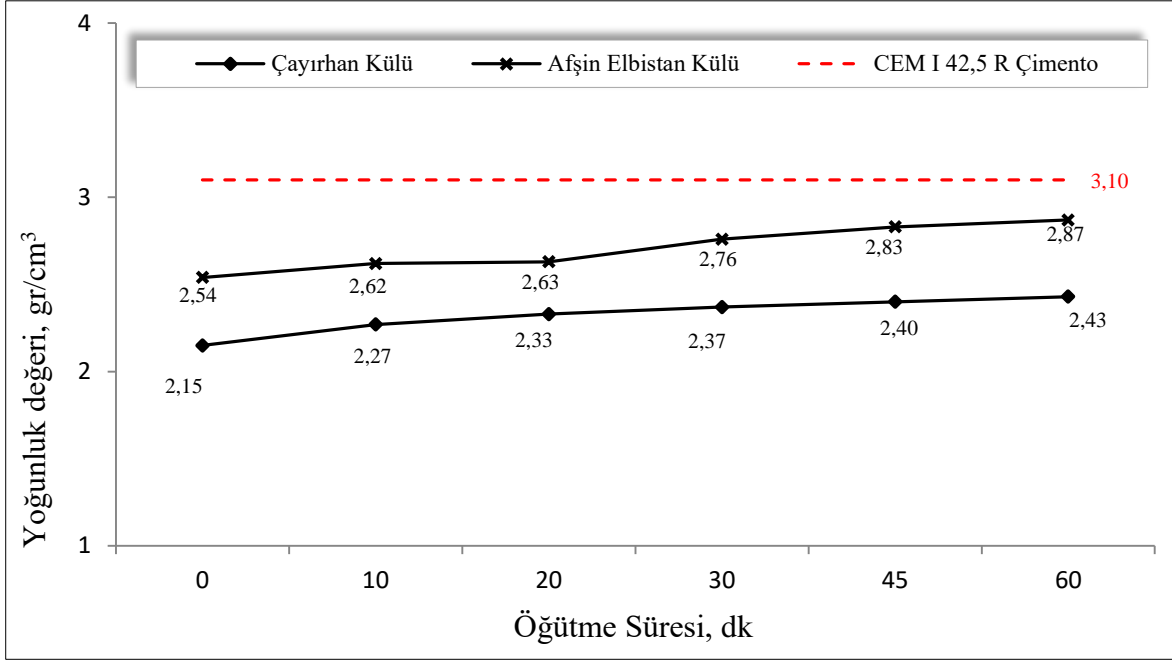
Uçucu küllerin betonda kullanım uygunluğu için TS EN 450-1, (2013) standardında ifade edilen 45 μm altı malzeme miktarı % 60'ın altına ve beyan edilen değere göre ± 10 'dan daha fazla değişmemeli, ASTM C 618-12, (1994) standardına göre ise % 66'ın altına düşmemesi gerektiği belirtilmiştir. Bu standartlara göre Afşin Elbistan uçucu külünün orijinal durumda ve tüm öğütme süreleri için tane boyu analiz sonuçları her iki standartta ifade edilen sınır değerlerin altında değerler almıştır. Ancak TS EN 450-1, (2013) standardında beyan edilen değer ± 10 aralığında yer almıştır.

Çayırhan uçucu külü ise tüm öğütme süreleri için tane boyutlarının TS EN 450-1, (2013) standardında verilen sınır değerden yüksek değerler olarak standartta ifade edilen uygunluğu sağlamıştır. Ancak ASTM C 618-12, (1994) standardına göre ise orijinal uçucu

kül ve 10 dk öğütme süreleri hariç diğer süreler için standartta açıklanan değerlerin üzerinde değerler alması sonucu standarda uygun olduğu belirlenmiştir. Uçucu külleri öğütme ile birlikte tane boyutunun incelenmesi sonucu uçucu külün mekanik aktivasyonu artmaktadır. Öğütme ile boşluklu ve pürüzlü yüzeye sahip parçacıkların azalması ve inceliğin artmasına neden olmaktadır. Pürüzlü yüzey yapısı azalmış ve inceliği artmış uçucu küllerle hazırlanan harçlarda, bu özellikler harcın su ihtiyacını azaltmakta ve dayanımı geliştirmektedir. Ayrıca öğütmeye bağlı olarak uçucu küllerin tane boyutlarının küçülmesi ile daha reaktif parçacıklar elde edilmektedir. Reaktif olmayan küçük parçacıkların ise çimento içerisinde kullanıldığında çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurarak sıkı bir malzeme oluşturmasına katkı sağlamaktadır (Hela ve Orsàkovà, 2013). Öğütmenin etkisi ile ince tane yapısına sahip uçucu kül katkılı örneklerin erken dönem basınç dayanım değerlerinin gelişmesini sağlamaktadır. İlerleyen yaşlarda ise inceliğe bağlı olarak olarak puzolanik aktivitenin artması ile basınç dayanımını geliştirmektedir. Ayrıca öğütülmüş küçük tane boyutuna sahip ancak reaktif olmayan uçucu kül taneleride mikro agrega etkisi yaparak çimento harcı içerisinde boşlukları doldurması ile erken dönemde dayanım değerinin gelişmesine katkı sağlamaktadır (Felekoğlu vd., 2009). Uçucu küllerin tane yapısındaki farklılıklara bağlı olarak bazen öğütme ile dayanım değerlerini geliştirmeyip düşmesine neden olmaktadır. Düşüşün ana nedeni ise öğütme süresine bağlı olarak düzensiz tane yapılarını oluşturmaktadır. Bu yapıya sahip uçucu küller harç içerisinde daha fazla suya ihtiyaç duymaktadır. Bouzoubaâ vd., (1997) çalışmalarında uçucu külleri farklı sürelerde öğüterek su ihtiyacı üzerinde öğütmenin etkisini incelemişlerdir. İlk olarak 2 saat öğütmişler ve taneler içerisinde büyük boşlukların öğütülme ile yok olmasından kaynaklı su ihtiyacını azalttığını görmüşlerdir. Öğütme süresini 2 saatten 4 saate çıkardıklarında su ihtiyacında bir değişiklik olmadığını belirlemişlerdir. Ancak öğütme süresini 4 saatten 10 saate çıkardıklarında düzensiz tanelerin oluşmasına bağlı olarak su ihtiyacını arttırdığını görmüşlerdir.

3.1.1.2. Uçucu Küllerin Yoğunluğu

Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin öğütme süresine bağlı olarak değişen yoğunluk değerleri Şekil 3.3'de verilmiştir.



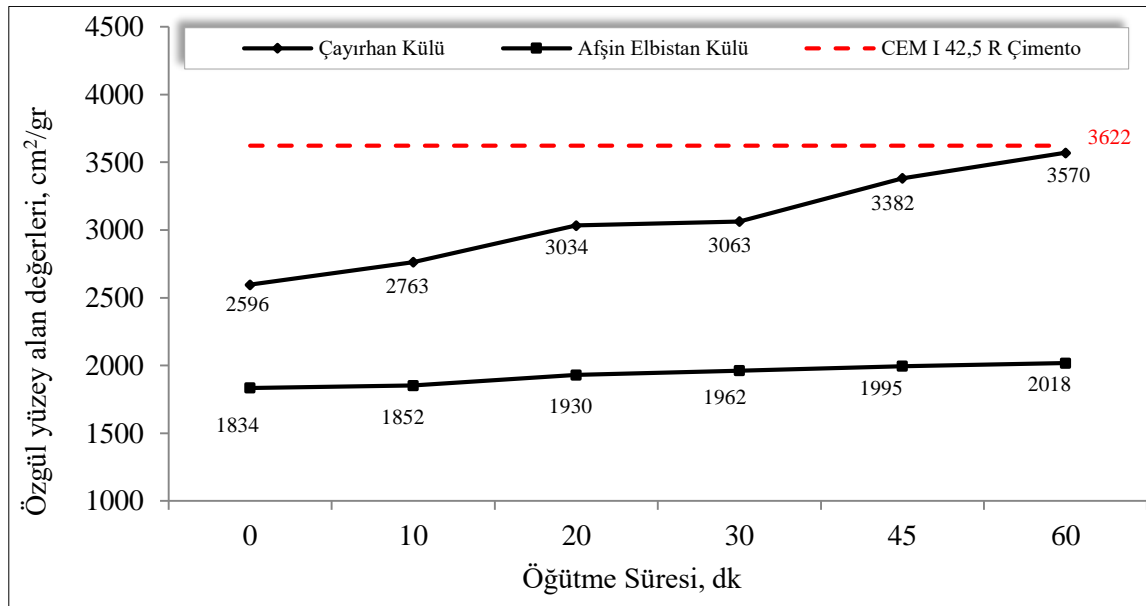
Şekil 3.3. Öğütme ile Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin yoğunluk değişimleri

Yoğunluk analizine göre öğütmenin etkisi ile her iki uçucu külünde yoğunluk değerlerinin arttığı ancak bu artışın yinede çimentonun yoğunluk değerinde düşük olduğu görülmüştür. Öğütme ile uçucu küllerin yoğunluk değerlerindeki artış, öğütmeye bağlı olarak tane içerisinde boşluklu karbon parçacıklarının parçalanmasına ve daha az yer kaplamasından ileri geldiği düşünülmektedir (Paya vd., 1995). Farklı araştırmacılar araştırmalarında öğütme ile malzemenin yoğunluk değerlerini arttırdığı şeklinde sonuçlar elde etmişlerdir. Rukzon vd., (2009) prinç kabuğu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerine öğütmenin etkisini incelemişlerdir. Prinç kabuğu külünün dört farklı incelik değerinde çimento yerine % 20 oranında ağırlıkça yer değiştirerek kullanmışlardır. Malzemenin yoğunluklarını, inceliklerini, kimyasal özellikleri ile harçların basınç dayanımlarını ve porozitesini belirlemişlerdir. Öğütmeye bağlı olarak prinç kabuğu külünün, orijinal durumda $1,98 \text{ gr/cm}^3$ iken 60 dk öğütme süresinde $2,15 \text{ gr/cm}^3$, 120 dk öğütme süresinde $2,21 \text{ gr/cm}^3$, 240 dk öğütme süresinde ise $2,23 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları çimentonun yoğunluğu $3,14 \text{ gr/cm}^3$ hesaplamışlardır. Prinç kabuğu külünün öğütme ile yine de çimentonun yoğunluğundan düşük olduğunu görmüşler. Basirun vd., (2017) beton üzerinde kömürden elde edilen taban külünün öğütme etkisini incelemişlerdir. 1 saat ile 6 saat arasında taban külünü öğüterek tane şeklinin, boyutunun, yoğunluğunun, mikro yapısı ile basınç dayanımı üzerine

inceliğın etkisini incelemişlerdir. Öğütme süresine (0, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 saat) bağlı olarak yoğunluk değerlerini arttığını ve bu değerleri sırası ile 2,0 gr/ cm³, 2,02 gr/ cm³, 2,11 gr/ cm³, 2,14 gr/ cm³, 2,21 gr/ cm³, 2,25 gr/ cm³ bulmuşlardır.

3.1.1.3. Uçucu Kúllerin Özgöl Yüzey Alanı (Blaine)

Uçucu kúllerini öğütme süresine bağlı olarak özgöl yüzey alan değerleri şekil 3.4'de verildiği gibi belirlenmiştir. Uçucu kúllerin özgöl yüzey alan değerleri öğütme süresine bağlı olarak artmıştır. Özgöl yüzey alan değerleri uçucu kúllerde incelik değerinin bir göstergesidir. Afşın Elbistan ve Çayırhan termik santrallerinden alınmış kúllerin orijinal durumları ile 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme süreleri sonrasında özgöl yüzey alan değerleri çimentonun özgöl yüzey alan değerinden düşük çıkmıştır. TS EN 450-1, (2013) standardında beton içerisinde kullanılan uçucu kúlin incelik değeri en az 3000 cm²/gr olarak belirlenmiştir. Afşın Elbistan uçucu kúlinün tüm öğütme süreleri için elde edilen özgöl yüzey alan değerleri standartta belirtilen sınır değerin altında değerler almıştır. Çayırhan uçucu kúlinde ise 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme süreleri sonrasında özgöl yüzey alan değerleri standartta ifade edilen sınır değerden yüksek, orijinal durumda ve 10 dk öğütme süresi ise düşük çıkmıştır.



şekil 3.4. Öğütme ile Afşın Elbistan ve Çayırhan uçucu kúllerinin özgöl yüzey alan değerlerindeki değişimleri

Boşluklu ve büyük parçaçık boyutuna sahip uçucu kül tanelerinin öğütme sonucu tane boyutu küçüldüğünden özgül yüzey alan değerleri artmaktadır. Özgül yüzey alan değerlerinin artması puzolanik aktiviteyi de arttırmaktadır. Öğütme ile kristal yapıya sahip uçucu kül taneleri amorf tane yapısına dönüşmektedir. Amorf tane yapısına sahip uçucu küller çimentonun $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girmesi sonucu puzolanik aktiviteyi geliştirmektedir. Ayrıca Uçucu küllerde puzolanik aktivitenin derecesi reaksiyona giren tanenin yüzey alanının büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Reaksiyon derecesini ise uçucu külü öğütme ile arttırılmaktadır (Hela ve Orsàkovà, 2013). Özgül yüzey alan değerleri yüksek olan uçucu küllerle hazırlanan harçlarda, harçların su ihtiyacını azalttığı, basınç dayanımını ve puzolanik aktiviteyi ise arttırmaktadır (Kiattikomol vd., 2001; Rukzon vd.,2009).

3.1.1.4. Uçucu Küllerin Rutubet (Nem) Durumu

Uçucu küllerin bekletme süresi ile ortamdan alabileceği nemden kaynaklı rutubet tayini yapılmıştır. Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin orijinal durumları ve 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme sürelerine ait malzemeler içerisinde bulunan nem miktarları belirlenmiş ve standartta ifade edilen sınır değerle karşılaştırılmıştır (Tablo 3.1).

Tablo 3.1. Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin rutubet durumu

Numune Adı	Rutubet Değeri, %	Numune Adı	Rutubet Değeri, %	TS 639, %	ASTM C 618, %	
					F	C
AE0	0,14	ÇYH0	0,17	≤ 3	≤ 3	
AE10	0,14	ÇYH10	0,23			
AE20	0,17	ÇYH20	0,25			
AE30	0,21	ÇYH30	0,33			
AE45	0,26	ÇYH45	0,24			
AE60	0,22	ÇYH60	0,27			

AE; Afşin Elbistan uçucu külü, AE0,10, 20, 30, 45 ve 60 olarak verilen sayı külün öğütme süreleri, ÇYH; Çayırhan uçucu külü, ÇYH0,10, 20, 30, 45 ve 60 olarak verilen sayı külün öğütme sürelerini temsil etmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre uçucu küllerin içerisinde dikkate değer nem olmadığı görülmüştür. Uçucu küllerin puzolanik aktivite gösterebilmesi için Tablo 3.1’de verilen standartlarda belirtilen miktarda rutubet değerine sahip olması gereklidir. Ancak yüksek miktarda rutubet değerine sahip uçucu küller ile hazırlanan pasta, harç ve beton

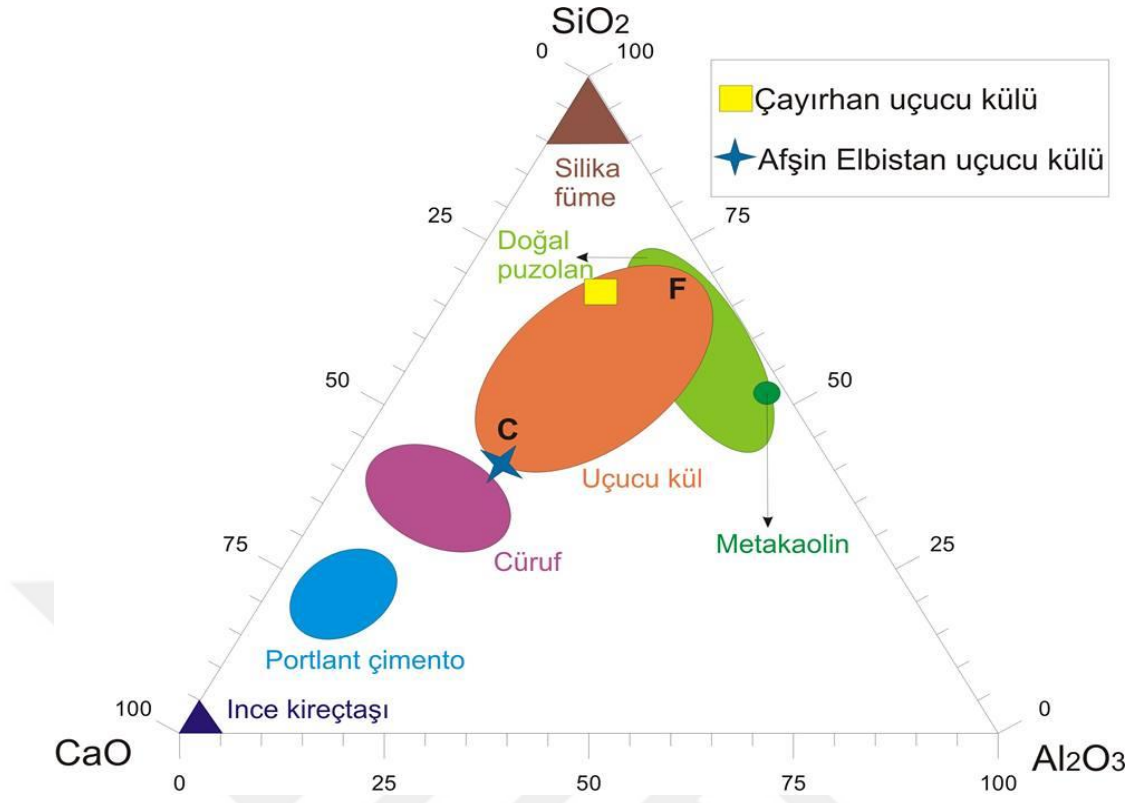
karışımlarında gerekli olan su miktarının belirlemede yüksek rutubet durumu yanıltıcı sonuçlar vermeye neden olmaktadır.

3.1.2. Kimyasal Özellikler

Uçucu küllerin kimyasal özelliklerini belirlemek için XRF, serbest kireç ve kızdırma kaybı analizleri yapılmıştır.

3.1.2.1. XRF (X-Işını Floresans Spektrometresi), Serbest Kireç ve Kızdırma Kaybı Analizleri

AE (Afşin Elbistan) ve ÇYH (Çayırhan) uçucu küllerinin orijinal durumları ve tüm öğütme sürelerine ait kimyasal analiz sonuçları Tablo 3.2’de verilmiştir. Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ile standartlarda belirtilen hangi kül sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. ASTM C 618 standardına göre Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin sınıflandırılması yapılmıştır. Standartta ifade edilen S+A+F ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) toplamı $\geq \% 70$ ve $\text{CaO} < \% 10$ ise F sınıfı (düşük kireçli), S+A+F ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) toplamı $\geq \% 50$ ve $\text{CaO} > \% 10$ ise C sınıfı (Yüksek kireçli) uçucu kül olarak adlandırılmıştır. Buna göre Afşin Elbistan uçucu külü S+A+F: % 47,40, CaO: % 37,84 olup, S+A+F miktarı % 50’den düşük ancak CaO miktarı % 10’dan büyük olduğundan C sınıfı uçucu kül sınıfında yer almıştır. Çayırhan uçucu külü S+A+F: % 71,34, CaO: % 11,25 olup S+A+F değeri % 70’den büyük ancak CaO miktarıda % 10’dan büyük olmasına rağmen F sınıfı uçucu kül grubunda yer almıştır. Türker vd., (2009) yaptıkları çalışmalarda benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Uçucu küllerin kimyasal bileşimine göre sınıflandırılırken standartlarda bazı değerlere uygun olmadığı görülmüş, Şekil 3.5’de verilen CaO-Al₂O₃-SiO₂ standart ternary diyagramında yerleştirilerek hangi sınıf kül grubunda olduğu netleştirilmiştir.



Şekil 3.5. Uçucu külleri ternary diyagramı ile sınıflandırma (Lothenbach vd., 2011).

Tablo 3.2. Uçucu küllerin kimyasal analizi ve standartlarla karşılaştırılması

Bileşen, %	CEM I 42,5 R	AE0	ÇYH0	AE10	ÇYH10	AE20	ÇYH20	AE30	ÇYH30	AE45	ÇYH45	AE60	ÇYH60	ASTM C 618		TS EN 450-1 Standartı, %
														F,%	C, %	
SiO ₂	19,48	29,24	49,07	29,35	49,24	29,18	48,75	29,08	48,81	29,26	49,11	29,11	48,98			
Al ₂ O ₃	4,36	11,49	12,92	11,46	12,83	11,31	12,70	11,35	12,74	11,55	12,77	11,53	12,73			
Fe ₂ O ₃	3,33	6,67	9,35	6,70	9,40	6,62	9,26	6,80	9,30	6,92	9,44	6,91	9,44			
S+A+F	-	47,40	71,34	47,51	71,47	47,11	70,71	47,23	70,85	47,73	71,32	47,55	71,15	> 70	> 50	> 70
CaO	62,71	37,84	11,25	38,07	11,27	38,69	11,23	38,25	11,29	36,91	11,20	36,82	11,28	< 10	> 10	
MgO	0,99	1,86	4,66	1,88	4,66	1,81	4,67	1,84	4,77	1,85	4,57	1,83	4,74	< 5	< 5	< 4
Na ₂ O	0,28	0,38	2,4	0,38	2,45	0,36	2,29	0,36	2,36	0,35	2,43	0,35	2,39	< 1,5	< 1,5	< 5
K ₂ O	1,02	0,69	3,71	0,69	3,77	0,7	3,78	0,71	3,8	0,68	3,71	0,68	3,79	-	-	< 5
SO ₃	2,43	4,70	1,27	5,06	1,11	4,35	1,38	5,22	1,18	5,13	0,94	4,99	0,99	< 5	< 5	< 3
Cr ₂ O ₃	0,006	0,054	0,061	0,053	0,062	0,052	0,065	0,051	0,065	0,054	0,068	0,051	0,067			
Mn ₂ O ₃	0,187	0,059	0,133	0,056	0,134	0,057	0,133	0,059	0,135	0,057	0,135	0,059	0,137			
KK	2,50	2,31	0,82	2,16	0,88	2,02	0,94	2,01	0,97	1,96	0,97	1,98	1,08	≤ 6		< 5-9

AE; Afşin Elbistan uçucu külü, ÇYH; Çayırhan uçucu külü, AE ve ÇYH 0,10, 20, 30, 45 ve 60 olarak verilen sayı küllerin öğütme sürelerini temsil etmiştir.

Şekil 3,5’de Çayırhan uçucu külü F sınıfı, Afşin Elbistan uçucu külü ise C sınıfı kül grubuna yakın olduğu görülmüştür. Thomas vd., (1999) çalışmalarında uçucu külleri içerisindeki kireç miktarına göre 3 sınıfa ayırmışlardır.

1-F sınıfı ($\text{CaO} < \% 8$ ise düşük kireçli)

2-CI sınıf (CaO ; $\% 8-20$ ise orta kireçli)

3-CH sınıfı ($\text{CaO} > \% 20$ ise yüksek kireçli) olup bu sınıflandırmaya göre Afşin Elbistan uçucu külü CaO : $\% 37,84 > \% 20$ büyük olması yüksek kireçli, Çayırhan uçucu külü ise CaO : $\% 11,25$ olup $\% 8-20$ arasında yer aldığından orta kireçli kül olarak değerlendirilmiştir.

Uçucu küllerin kimyasal bileşimi puzolanik özellikleri üzerinde büyük etkisi vardır. Kimyasal bileşimi bakımından yüksek miktarda kireç içeren uçucu küller, sahip olduğu serbest kireç, trikalsiyum aluminat, amorf silis ve alumina gibi bileşenleri içermesinden ve puzolanik özelliğe sahip olmasından dolayı kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özellik göstermektedir. Düşük kireçli uçucu küllerde ise silis ve aluminadan oluşan amorf ya da camsı fazlar ana aktif bileşenlerini oluşturmaktadır. Bu tip uçucu küller, rutubetli ortamda sönmüş kireç $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girdikleri zaman sadece puzolanik özellik gösterebilir ancak bağlayıcılık özellik göstermezler. Beton içerisinde düşük CaO içeren uçucu küllerin katkı olarak kullanılması sayesinde betonun sülfata karşı dayanıklılığını arttırmaya katkı sağlamaktadır (Gürbüz, 2009).

Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bu faktörler, termik santralde yanan kömürün tipine, kömürün içerisinde bulunan yanıcı olmayan madde miktarına, yanmanın etkinliğine ve sürekliliğine, uçucu külün toplanma ve depolanma tekniği bağlı olarak değişmektedir (Ahmaruzzaman, 2010). Beton içerisinde kullanılan uçucu külün kimyasal bileşimi betonun dayanımını ve sülfata maruz kaldığında direncini arttırmaktadır. Uçucu küllerin kimyasal bileşiminin termik santralde yakılan kömürün tipine göre değişmesi sonucu puzolanik özelliğide değişmektedir. Linyit kömüründen elde edilen uçucu küllerin CaO miktarı taş kömüründen elde edilene göre yüksek, Fe_2O_3 miktarı ise düşük değerlerdedir. Ayrıca linyit kömüründen elde edilen uçucu küllerde yanmamış karbon miktarıda düşüktür (Öksüz, 2006).

Uçucu küllerin kimyasal bileşiminden biri olan kızdırma kaybı, TS EN 196-2 (2002) standardında malzeme içerisinde yanmamış karbon ve su miktarı olarak tanımlanmıştır. Tablo 3.2’de her iki uçucu külü orijinal ve tüm öğütme sürelerine ait kızdırma kaybı sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar TS EN 450-1’e ve ASTM C 618 standartlarına göre

karşılaştırılmıştır. Uçucu küllerin tüm öğütme sürelerine ait kızdırma kaybı değerleri Tablo 3.2’de verilmiş olup, her iki standartta belirtilen sınır değerlerin altında değerler almıştır. Ayrıca her iki uçucu külün tüm öğütme süreleri için kızdırma kaybı değerleri çimentonun kızdırma kaybı değerinden düşük çıkmıştır. Türker vd., (2009) çalışmasında Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin kızdırma kaybı değerlerini sırası ile % 2,58 ve % 0,86 olarak belirlemişlerdir. Bu çalışmada da yapılan kızdırma kaybı analiz sonuçlarına göre orijinal durumda Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin kızdırma kaybı değerleri sırası ile % 2,31 ve % 0,82 olarak belirlenmiş ve litaretürde yapılan analizlere göre benzer değerler aldığı tespit edilmiştir. Kızdırma kaybı miktarı beton içerisinde kullanılan uçucu külün betonun donma-çözünme direncini ve kıvamını etkilemektedir. Kızdırma kaybı değeri arttıkça betonun önceden belirlenen sabit kıvamdaki su ihtiyacının artmasına neden olmaktadır. Su ihtiyacının artması ise uçucu kül içerisinde yanmamış karbon tanelerinin boşluklu yapıda olması ve boşluklarda fazlaca su bulundurmasından ileri gelmektedir. Bu yüzden düşük kızdırma kaybı değerine sahip uçucu küller yüksek kızdırma kaybı değerine sahip uçucu küllere göre daha iyi performans göstermektedir (Velandia vd., 2016).

Uçucu küllerin kimyasal bileşimlerinden birisi de içerisinde bulundurduğu serbest kireç miktarıdır. Çayırhan (ÇYH) ve Afşin Elbistan (AE) uçucu küllerinin orijinal durumunda (AE0 ve ÇYH0) çimentoya % 10, % 30 ve % 50 ikame oranları ile hazırlanan karışımların serbest kireç miktarları (SCaO) belirlenmiş ve Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin serbest kireç miktarları

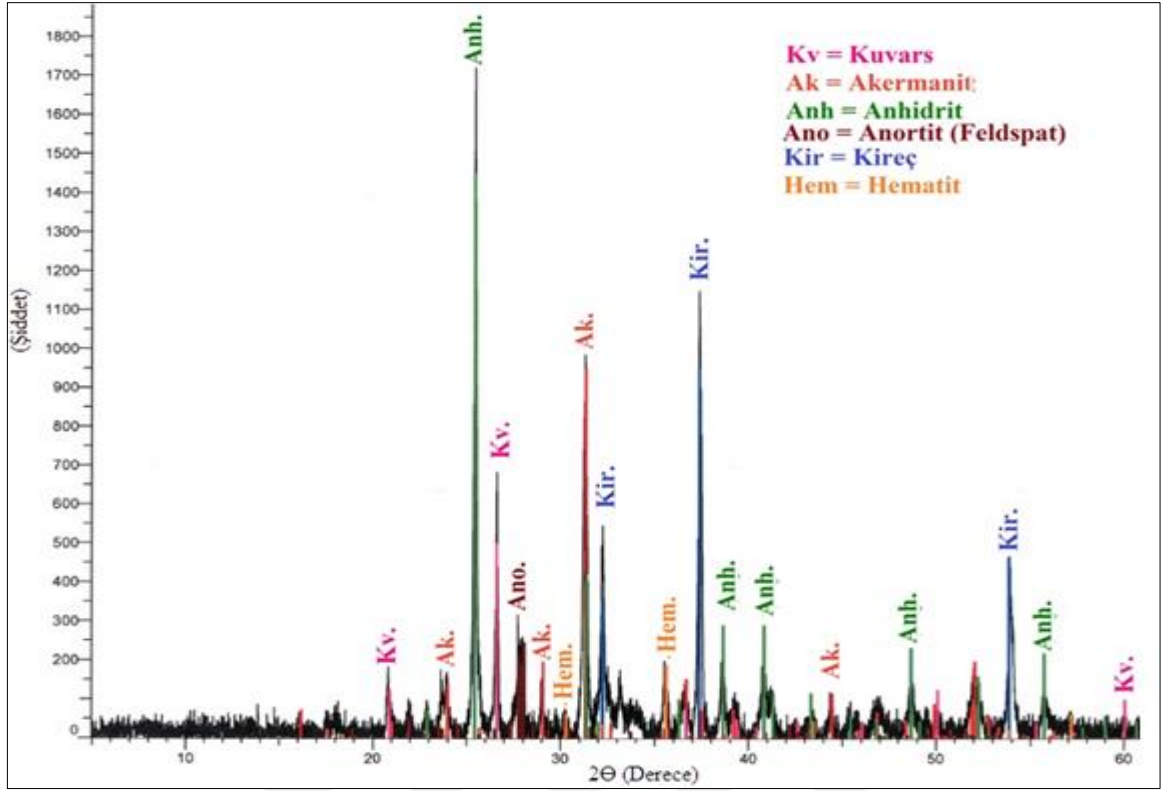
Uçucu küller		Uçucu kül ilaveli karışımların serbest kireç miktarı (SCaO)							TS EN 450-1
AE	ÇYH	CEM I 42,5 R	AE0-10	AE0-30	AE0-50	ÇYH0-10	ÇYH0-30	ÇYH0-50	
4,51	0,33	0,82	1,12	1,90	2,64	1,31	0,63	0,40	< 1,5
AE; Afşin Elbistan uçucu külü, AE0; orijinal durumdaki uçucu kül ve AE0-10, 30 ve 50 ise uçucu külün çimento içerisinde % ikame oranı. ÇYH; Çayırhan uçucu külü, ÇYH0; orijinal durumdaki uçucu kül ve ÇYH0-10,30 ve 50 ise uçucu külün çimento içerisinde % ikame oranı.									

Yapılan deneysel çalışmada uçucu küllerin serbest kireç miktarları TS EN 450-1 standartında ifade edilen değere göre kıyaslanmıştır. Afşin Elbistan uçucu külünün orijinal durumundaki serbest kireç miktarı 4,51 olup 1,5’den büyük olduğundan standartta ifade edilen değerden yüksek çıkmıştır. Çayırhan uçucu külünün serbest kireç miktarı 0,33 olup

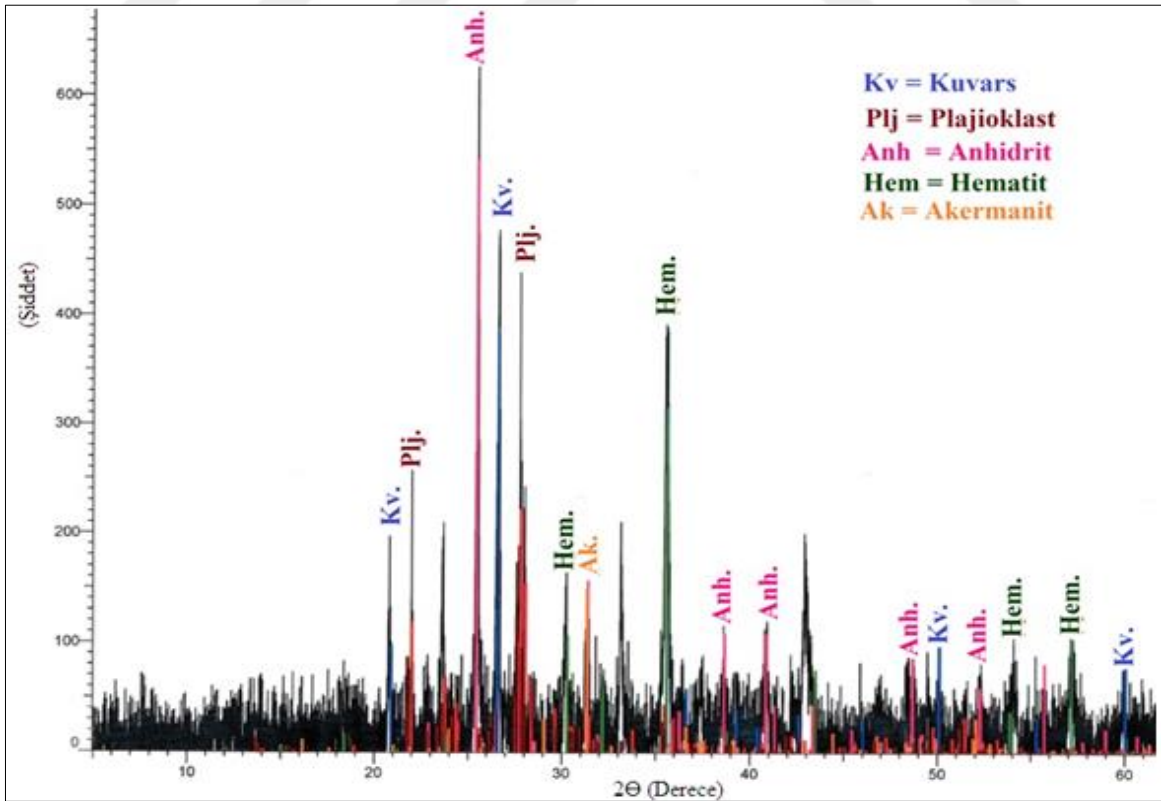
1,5'den küçük olduğundan standartta ifade edilen değerin altında kalmıştır. AE0-30 ve AE0-50 karışımlarının serbest kireç miktarları standartta verilen değerin üzerinde değerler aldığı diğer karışımlar (AE0-10, ÇYH0-10, ÇYH0-30 ve ÇYH0-50) ise altında değerler almıştır. TS EN 450-1 standardına göre uçucu küllerde serbest kireç miktarı kütlece % 1,5'den fazla ise genleşme deneyi yapılmalı ve genleşme miktarı 10 mm'den daha büyük olmaması gereklidir. Çimento içerisinde serbest şekilde CaO ve MgO bileşiklerinin bulunması ve hidrasyon sonucu reaksiyona girmesi ile Ca(OH)_2 ve Mg(OH)_2 yapılarını oluşturmaktadır. Bu bileşiklerin çimento içerisinde fazla olması hacim artışına yol açmaktadır. Ayrıca CaO miktarının belirtilen değerden fazla olması hidrasyon sonucu serbest kirecin (Ca(OH)_2) oluşmasına buda çimentonun suda erimesine neden olmaktadır (Özdemir, 2007). Serbest kireç miktarı fazla olan uçucu küller ile hazırlanan karışımlarda çatlak ve genleşme oluşmasına neden olmaktadır. Bu sorunla mücadele etmek için serbest CaO bileşiminin Ca(OH)_2 'e dönüştürülerek üstesinden gelinmektedir (Çinçin, 2015).

3.1.3. Mineralojik Özellikler

Uçucu küllerin mineralojik bileşimlerinin belirlenmesi için X-ışınları difraktogramı (XRD) analizi yapılmış ve sonuçlar Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de verilmiştir. Analiz 2θ açısında 0-60 şiddet aralığında yapılmıştır. Çalışmada her iki uçucu külünde mineralojik bileşimi yapılan XRD analizine göre değerlendirildiğinde Afşin Elbistan uçucu külünün mineralojik bileşimi anhidrit, kuvars, feldispat grubu minerallerinden anortit, akermanit ve hematit mineralleri ile kireçten oluştuğu gözlemlenmiştir. Çayırhan uçucu külünün ise anhidrit, kuvars, feldispat grubu minerallerinden plajyoklas, akermanit, hematit minerallerinden oluştuğu tespit edilmiştir. İkisi arasında en belirgin fark farklı feldispat grubu minerali bulundurması ve Afşin Elbistan uçucu külü içerisinde kireç olmasıdır. Uçucu küllerin mineralojik bileşimlerinin farklı olması termik santralde yakılan kömürün bileşiminden ileri gelmiştir (Türker vd., 2009).



Şekil 3.6. Afşin Elbistan uçucu külünün mineralojik bileşimi

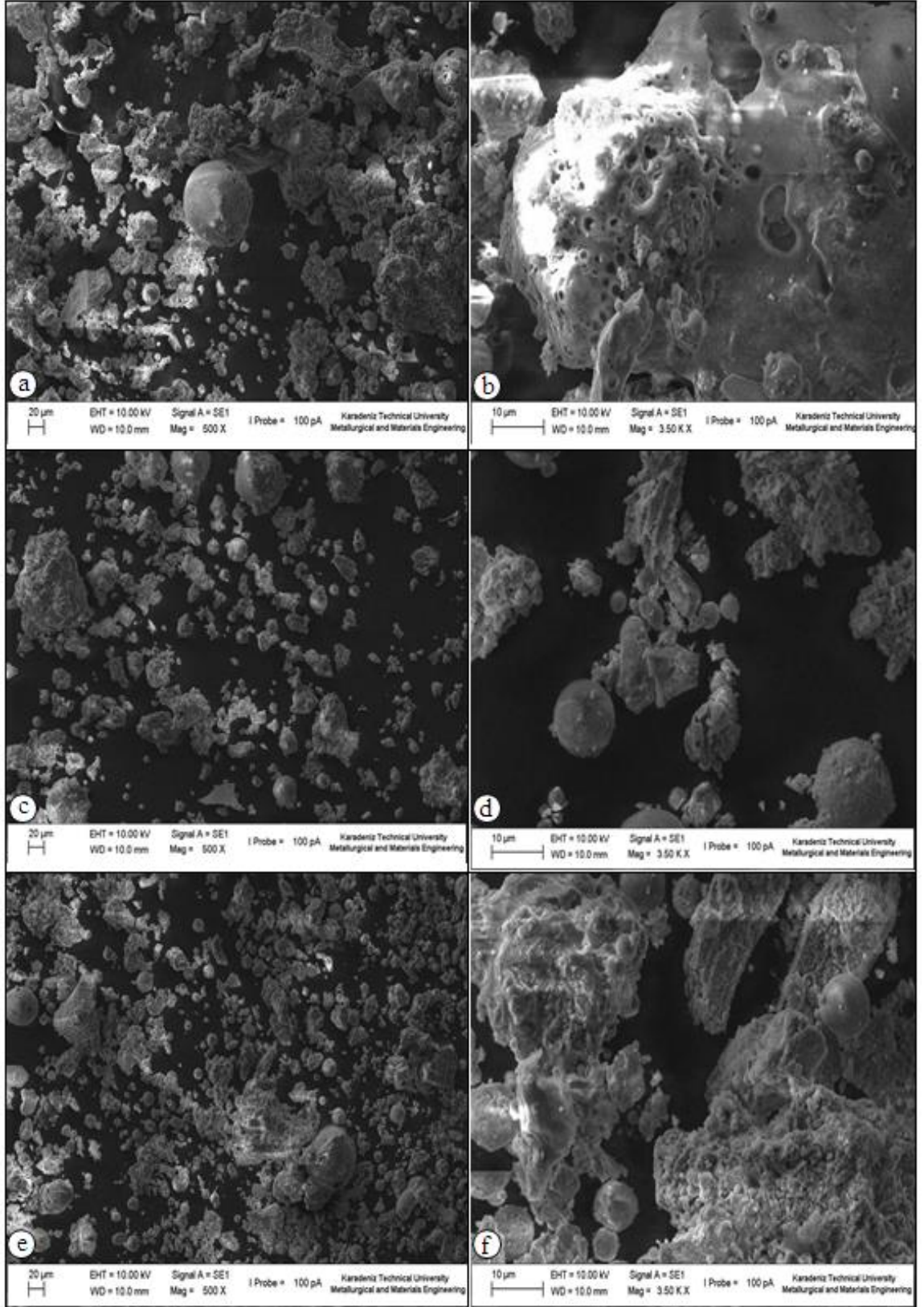


Şekil 3.7. Çayırhan uçucu külünün mineralojik bileşimi

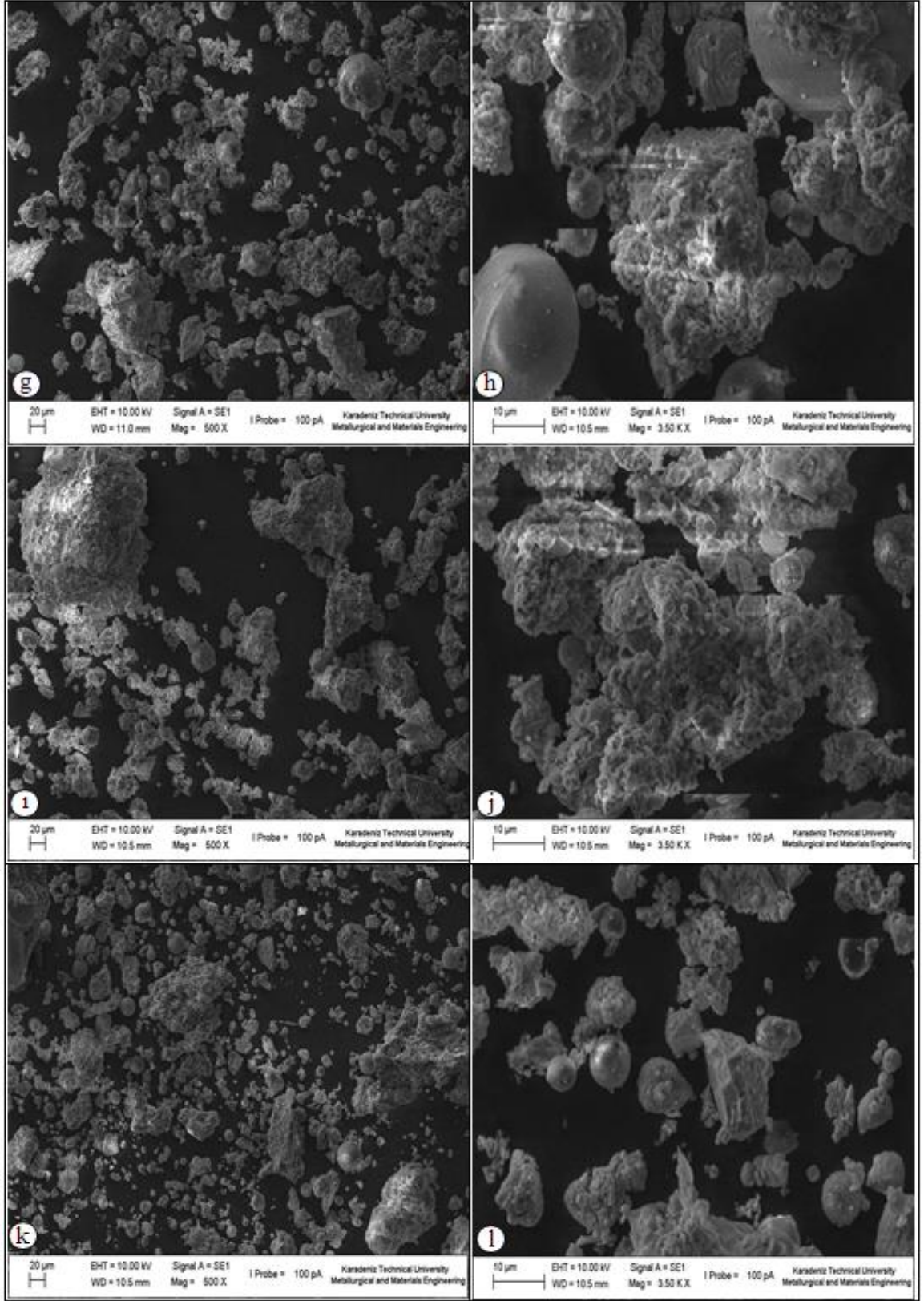
Uçucu küllerin mineralojik bileşimi puzolanik özellikleri ile doğrudan bir ilişkiye sahiptir. Yapılan XRD analizi sonucuna göre her iki külde de kuvars minerali olması uçucu küllerin bütümlü kömür ve linyit kaynaklı olduğu ve SiO₂ içeriğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Uçucu küllerin demir kaynaklı mineral bulundurması sülfür içeriğine sahip kömürlerden elde edilmesine bağlıdır. Özellikle bileşiminde demir oksit bulundurması, piritin bozulması sonucu olup, sistemde SO_x miktarının artmasına ve maghemite (hematit) çekirdeği içinde temel katyonların oluşmasını ve daha sonra hematit mikro şeklinin oluşmasına yol açmaktadır. Kısaca bitümlü kömürlerden elde edilen uçucu küller linyit kömürüne göre kıyaslandığında kimyasal ve mineralojik bileşiminde silisyum ve demirce zengin kaynaklı olmasına neden olmaktadır. Ayrıca uçucu küllerin bileşiminde hematit minerali varsa hematitle birlikte anhidrit minerali bulundurma ihtimali yüksektir. Bunun nedeni, anhidrit (CaSO₄·1/2H₂O) 500 °C'den fazla sıcaklığa maruz kaldığında kalsit ve piritin reaksiyona girmesi sonucu oluşmaktadır. Maghematit minerali ise linyit kömüründe piritin termal olarak bozulması sonucu meydana gelmektedir (Koukouzas vd., 2007).

3.1.4. Morfolojik Özellikler

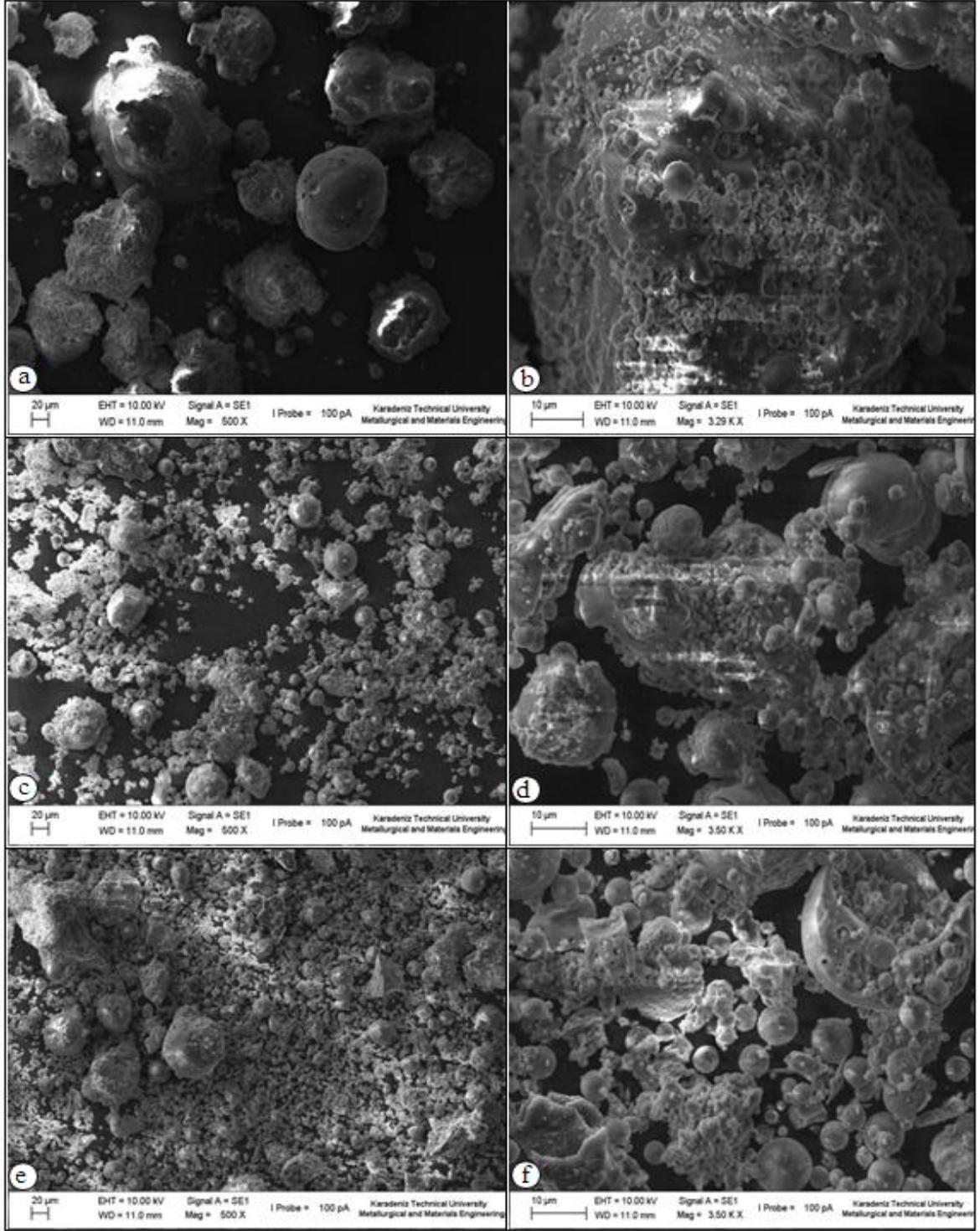
Uçucu küllerin morfolojik özelliklerini belirlemek için Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına ait görüntüler Afşin Elbistan uçucu külü için Şekil 3.8 ve Şekil 3.9, Çayırhan uçucu külü için ise Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de verilmiştir. SEM analizi sonucuna göre her iki uçucu külünde orijinal durumları ile 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme süreleri için 500K ve 3500K büyütme görüntüleri alınarak tanelerin şekilsel ve yüzeysel durumlarında öğütme değişimi belirlenmiştir. Afşin Elbistan uçucu külünün orijinal durumda SEM analizi görüntülerine göre düzensiz, köşeli tanelerin hakim ancak ara ara küresel tanelerin olduğu görülmüştür. Yüzey durumuna göre boşluklu bir yapıdan oluşmuştur. Öğütmeye bağlı olarak ise düzensiz ve köşeli tanelerin arttığı tespit edilmiştir. Çayırhan uçucu külünün orijinal durumdaki SEM görüntüsüne göre küresel tanelerin hakim ancak, köşeli ve düzensiz tane yapısına sahip olduğu görülmüştür. Öğütme süresine bağlı olarak düzensiz tanelerin arttığı belirlenmiştir.



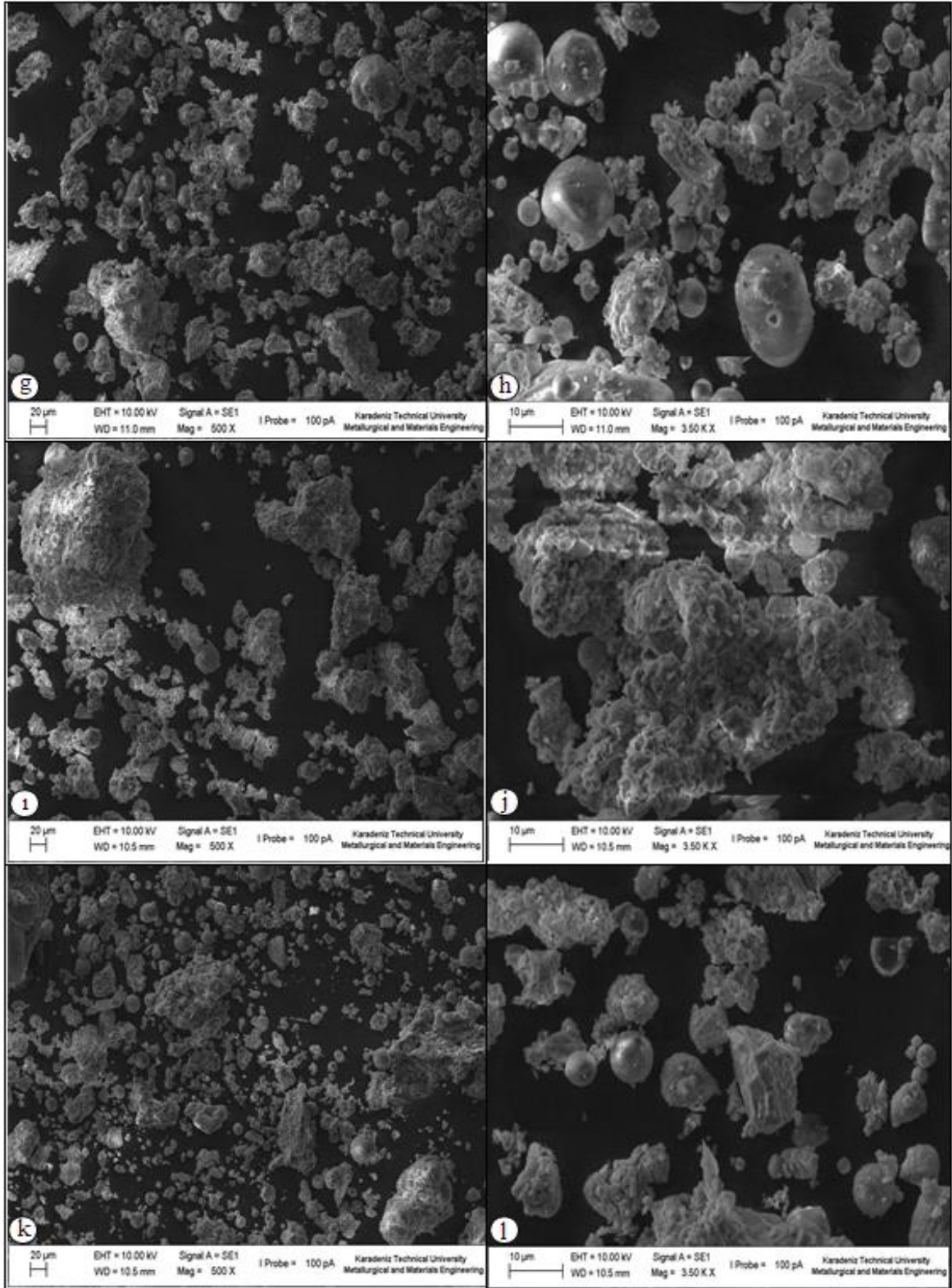
Şekil 3.8. Afşin Elbistan uçucu külüne ait SEM görüntüsü, a) 500K büyütme orijinal kül, b) 3500K büyütme orijinal kül, c) 10 dk öğütülmüş 500K büyütme kül, d) 10 dk öğütülmüş 3500K büyütme kül, e) 20 dk öğütülmüş 500K büyütme kül, f) 20 dk öğütülmüş 3500K büyütme kül



Şekil 3.9. g) 30 dk. öğütülmüş 500K büyütmelik kül, h) 30 dk öğütülmüş 3500K büyütmelik kül, ı) 45dk öğütülmüş 500K büyütmelik kül, j) 45 dk öğütülmüş 3500K büyütmelik kül, k) 60 dk öğütülmüş 500K büyütmelik kül, l) 60 dk öğütülmüş 3500K büyütmelik kül



Şekil 3.10. Çayırhan uçucu külüne ait SEM görüntüsü, a) 500K büyütme orijinal kül, b) 3500K büyütme orijinal kül, c) 10 dk. öğütülmüş 500K büyütme kül, d) 10 dk öğütülmüş 3500K büyütme kül, e) 20 dk öğütülmüş 500K büyütme kül, f) 20 dk öğütülmüş 3500K büyütme kül



Şekil 3.11. g) 30 dk. öğütülmüş 500K büyütmelik kül, h) 30 dk öğütülmüş 3500K büyütmelik kül, ı) 45dk öğütülmüş 500K büyütmelik kül, j) 45 dk. öğütülmüş 3500K büyütmelik kül, k) 60 dk öğütülmüş 500K büyütmelik kül, l) 60 dk öğütülmüş 3500K büyütmelik kül

Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerini öğütme ile tane yapılarında olan değişimler Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4. AE ve ÇYH uçucu küllerinin SEM analizine göre orijinal durumdaki şekil ve yapısının öğütme süresine göre değişimleri.

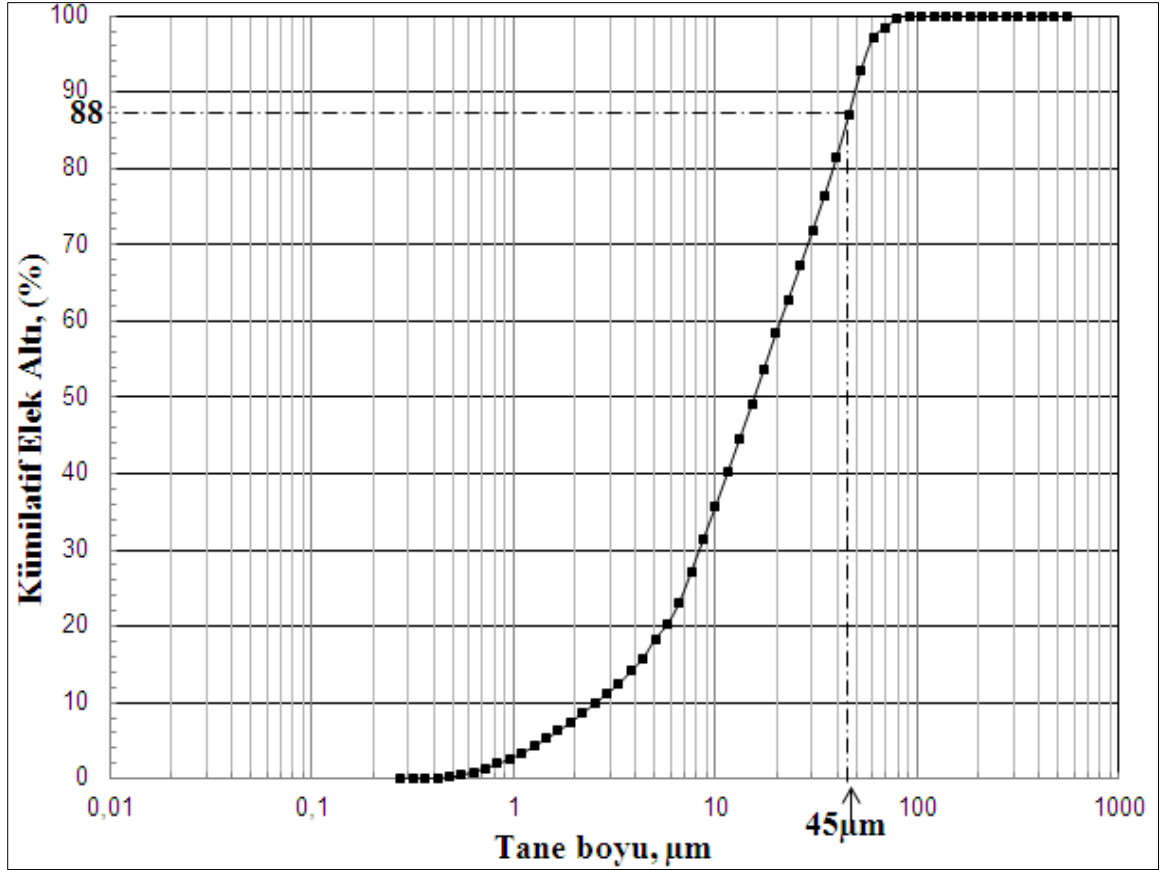
Uçucu Küllerin Tane Şekli ve Yüzey Durumu	Öğütülmemiş Halde		Öğütülmüş Halde	
	AE	ÇYH	AE	ÇYH
Küresel Taneler	Az	Çok	Daha az	Az
Şekilsiz ve Köşeli Taneler	Çok	Az	Daha çok	Çok
Yüzey Pürüzlülüğü	Çok	Az	Az	Daha az
Boşluk Yapısı	Çok	Az	Az	Daha az

Afşin Elbistan uçucu külü tüm öğütme süreleri boyunca uçucu külleri oluşturan tanelerin yüzeyleri boşluklu, pürüzlü, şekilsiz ve köşeli taneler hakim ancak küresel tanelerde bulunmaktadır. Karayiğit vd., (2000) Afşin Elbistan uçucu külü üzerine SEM analizi yaptıklarında şekilsiz büyük parçacık görüntülerini kalsit olarak adlandırmışlar. Türkmenoğlu, (2010) çalışmasında ise Afşin Elbistan uçucu külünün morfolojisini ve yüzey durumunu SEM analizi ile farklı boyutlarla büyütme yapmış olup, külün oldukça büyük yüzey alanına ve poroz bir yapıya sahip olduğunu tespit etmiştir. Felekoğlu vd., (2009) ise çalışmalarında öğütme ile ilk etapta artan tane sayısı yüzey alanından dolayı arttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca içteki parçacık şekli ve yüzey özelliği öğütme ile su isteğini de azaltabileceğine değinmişlerdir. Düzgün olmayan ve pürüzlü iç kısma ait uçucu kül parçacıkları öğütme ile pürüzlü parçacıklar ve kenarların aşınacağını, öğütme devam ettikçe pürüzlü yüzeylerin azalacağını söylemişlerdir. Böylece yüzey pürüzlülüğü ve su isteği azalmakta olup öğütme ile parçacık porozitesi azalacağından sabit kıvam değerinde su isteğinin de azalacağı sonucuna varmışlardır. Çayırhan uçucu külünün morfolojik özellikleri bakımından değerlendirildiğinde orijinal uçucu külün tane şekli genelde küresel ve yüzeyi pürüzsüz şekle sahip olduğu gözlemlenmiştir. Öğütme süresi arttıkça küresel tanelerin azalıp yerine şekilsiz tanelerin aldığını ama 60 dk öğütme süresi sonrasında bile hale küresel tanelerin var olduğunu gözlemlenmiştir. Felekoğlu vd.,(2009) çalışmalarında küresel ve pürüzsüz iç parçacık şekline sahip uçucu küller öğütme ile yüzeylerinin pürüzlü bir şekli alacağını, öğütme ile tanenin küresel şeklini ilk şekline göre aynı olmayacağını ve küresellikten uzaklaşacağını ifade etmişlerdir. Sonuç olarak pürüzlü yüzeyler arttıkça harcın su isteğinin de artacağını açıklamışlardır. Karayiğit vd., (2000) ve Karayiğit vd.,

(2001) yapmış oldukları çalışmalarında Çayırhan uçucu külü için SEM analizi yapmışlardır. Analizlerinde uçucu kül şeklinin küresel olduğunu ve uçucu küllerle birlikte analcime (hidrate olmuş sodyum alümine silikat), Py: pirit gibi mineraller ile C: kömür olduğunu tespit etmişlerdir. Uçucu küllerin yukarıda ifade edilen farklı tane şekline ve yapısına sahip olması birçok etmen tarafından etkilenmektedir. Afşin Elbistan uçucu külü gibi küresel olmayan tane yapısına sahip uçucu küllerin bu şekilde olma sebebini, kömürden gelen ve yanma olayına girmemiş kuvars, feldispat minerallerine, düzensiz şekilli ve gözenekli yapıda olması ise kil ve yanmamış karbon kalıntılarına bağlı olup bu yapılar Şekil 3.8 ve şekli 3.9'da görülmektedir. Afşin Elbistan gibi yüksek kireçli uçucu küllerin hem küresel, hem de köşeli ve düzensiz şekillerde olması homojen olmayan bir tane yapısına sahip olarak nitelendirilmektedir. Ayrıca bu yapıda ki külleri düşük kireçli küllere göre kıyaslandığında yüzey durumlarının düzgün olmadığı görülmüştür. Çayırhan gibi düşük kireçli küllerde, içi boşluksuz tam küresel tanelerin, cenosphere (camsı küresel taneler, boşluklu taneler, içi boş küreler), plerosphere (büyük küre içinde küçük küreler kümesi) tane yapısına sahip uçucu küllerin homojen bir mikro yapıya sahip oldukları Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de görülmektedir. Uçucu küllerin tane yapısı reaktivite derecesini belirleyen faktörlerden biridir. Uçucu külün tanecik şekli ve büyüklük dağılımı betonun işlenebilirlik özelliğini ve su ihtiyacını doğrudan etkilemektedir. Özellikle küresel tanelerin kayganlaştırıcı ve mikro boşlukları doldurma özelliğine sahip olması, şekilsiz ve pürüzlü yüzey özelliğine sahip uçucu küllerin ise su ihtiyacını arttırmaya neden olmaktadır. Ayrıca tane büyüklük dağılımının değişken boyutta olmasında su ihtiyacını arttıran bir başka etmenddir. Uçucu küllerin küresel, pürüzsüz ve ince tane yapısına sahip olması ile yüzey alanlarının büyük olduğundan kireç-silikat reaksiyonu hızlı gelişeceğinden puzolanik aktiviteyi geliştirmesi yönünde olumlu etki yaratmaktadır. Puzolanik aktivite yüksek kireçli küllerde anhidrit ve serbest kireç miktarından, düşük kireçli küllerde ise tanecik şekli, büyüklük dağılımı bakımından etkilenmektedir (Türker vd., 2009)

3.1.5. Çimentonun Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Çalışmada kullanılan CEM I 42,5 R çimentonun tane boyu dağılımının belirlenmesi için tane boyu analizi yapılmış ve Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Çimentonun tane boyu analizi

Çalışma için kullanılan CEM I 42,5 R çimento için yapılan tane boyut dağılımı TS EN 450-1 (2013) ve ASTM C 618-12 (1994) standartlarına göre 45 µm altı malzeme miktarı karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 45 µm altı malzeme TS EN 450-1, (2013) % 60'ın altına ve beyan edilen değere göre ± 10 'dan daha fazla değişmemesi şeklinde ifade edilmiştir. ASTM C 618-12, (1994) göre ise % 66'ın altına düşmemesi şeklinde açıklanmıştır. Çimento için bu değer Şekil 3.12'de verildiği gibi yaklaşık % 88 civarında olup standartlarda verilen sınır değerlerin üzerinde değerler aldığı görülmüştür.

Çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler çimentonun temin edildiği Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası laboratuvarında yapılan deney ve analizler sonuçlarına göre elde edilmiştir. Mekanik özellikler ise Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında yapılan basınç dayanım testi sonucu belirlenmiş ve standartlarda uygunluğu Tablo 3.5'de kıyaslanmıştır.

Tablo 3.5. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Oksit, %	CEM I 42,5 R	TS EN 197-1	Özellikle		TS EN 197-1
			Fiziksel Özellikleri		
SiO ₂	19,48		Yoğunluk, gr/cm ³	3,10	-
Al ₂ O ₃	4,36		Priz başlangıç	02 sa. 35dk.	≥ 60 dk
Fe ₂ O ₃	3,33		Priz sonu	03sa.25dk.	-
CaO	62,71		Blaine yüzey (cm ² /gr)	3622	-
MgO	0,99		Su ihtiyacı (%)	27,7	
Kimyasal Özellikleri					
Na ₂ O	0,28		Genleşme, mm	0	≤ % 10
K ₂ O	1,02		Mekanik Özellikleri [Bas. Day., MPa]		
SO ₃	2,43	≤ % 4	2 günlük	51,9	≥ 20
Cr ₂ O ₃	0,006		7 günlük	55,0	-
Mn ₂ O ₃	0,187		28 günlük	72,59	≥ 42,5- ≤ % 62,5
TiO ₂	0,26				
SCaO	0,82				
KK	2,50	≤ % 5			

3.2. Karışım Numuneleri

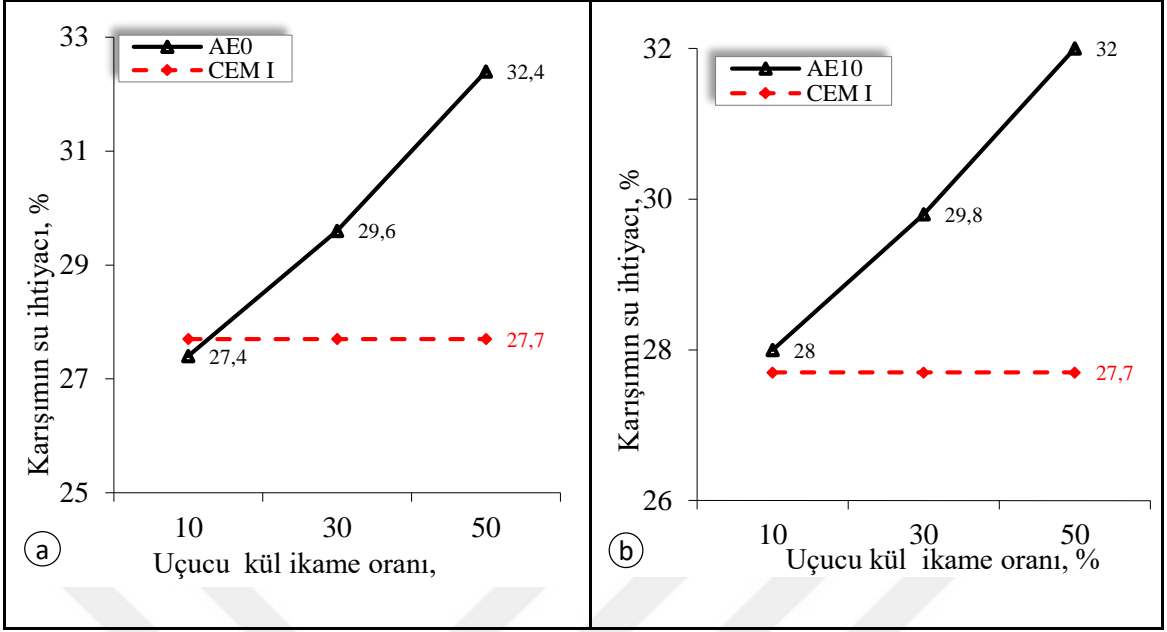
3.2.1. Taze Haldeki Karışım Numuneleri

3.2.1.1. Kıvam Tayini

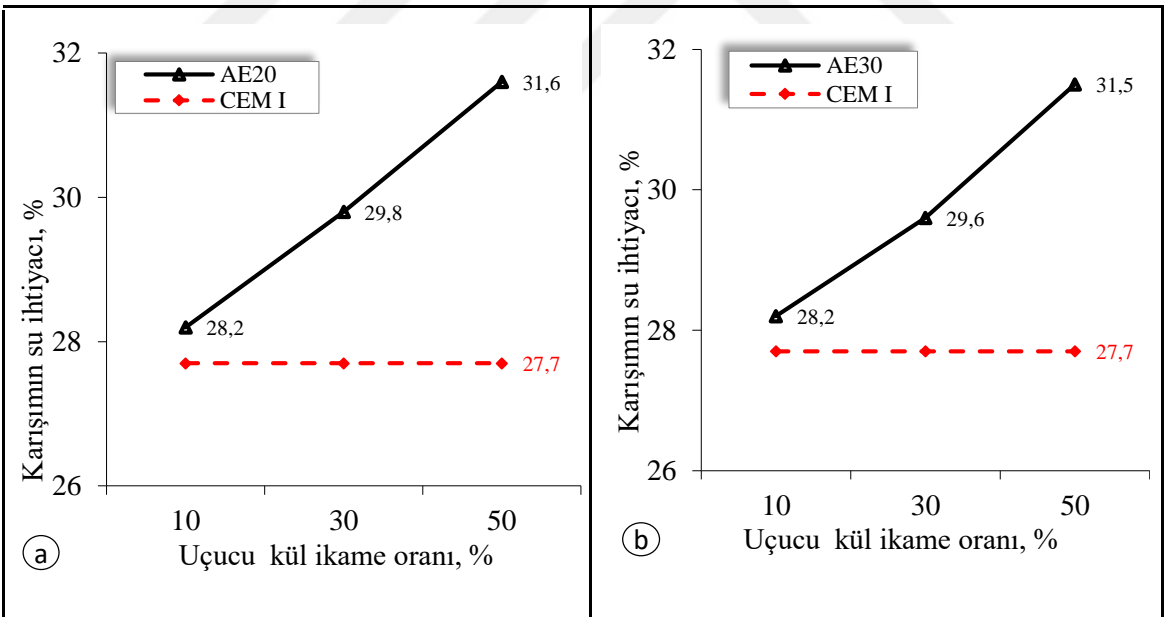
Uçucu küllerin orijinal durumda ve değişik öğütme süreleri sonrasında farklı tane boyutlu uçucu küllerin çimentoya farklı oranda ikame edilmesi ile hazırlanan karışımların su ihtiyaçlarının belirlenmesi için kıvam tayini deneyi yapılmıştır.

3.2.1.1.1. Uçucu Küllerin İnceliğinin Çimento İkame Oranına Göre Kıvam Tayini Üzerine Etkisi

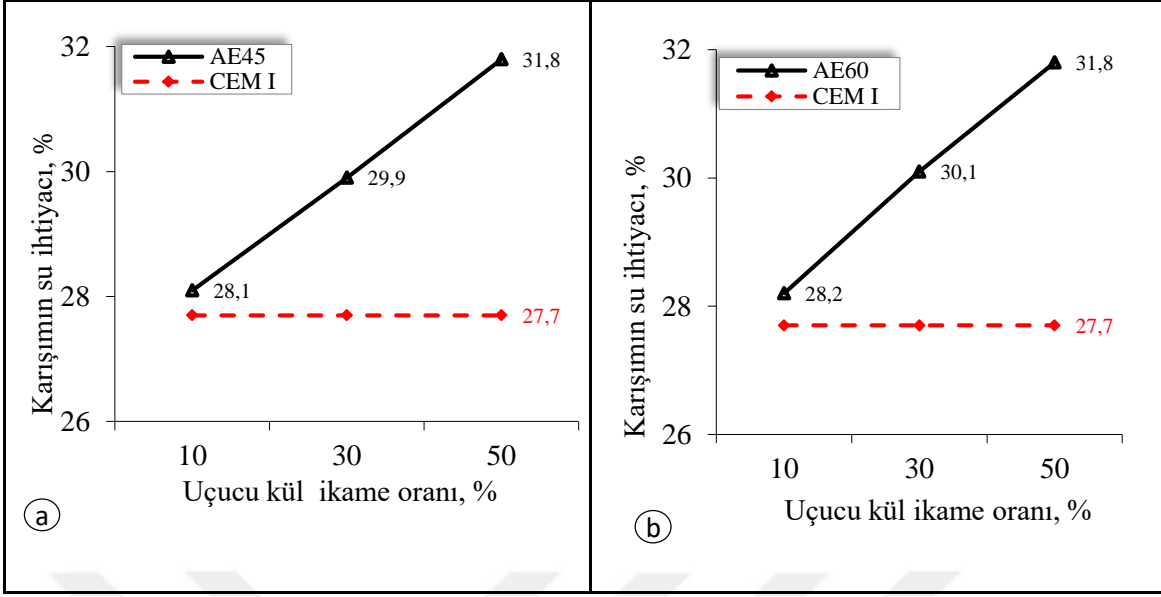
Afşin Elbistan (AE) uçucu küllünün orijinal durumu ve 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme sonrasında çimentoya % 10, % 30 ve % 50 ikame edilmesi ile hazırlanan karışımlar için kıvam tayini deneyi yapılmıştır. Bu deneye ait sonuçlar Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de verilmiştir.



Şekil 3.13. Uçucu küllerde inceliğin ve ikame oranının karışımın su ihtiyacı üzerine etkisi; a) orijinal AE uçucu kül katkıli karışımlar, b) 10 dk öğütme süreli AE uçucu kül katkıli karışımlar



Şekil 3.14. Uçucu küllerde inceliğin ve ikame oranının karışımın su ihtiyacı üzerine etkisi; a) 20 dk öğütülmüş AE uçucu kül katkıli karışımlar, b) 30 dk öğütülmüş AE uçucu kül katkıli karışımlar

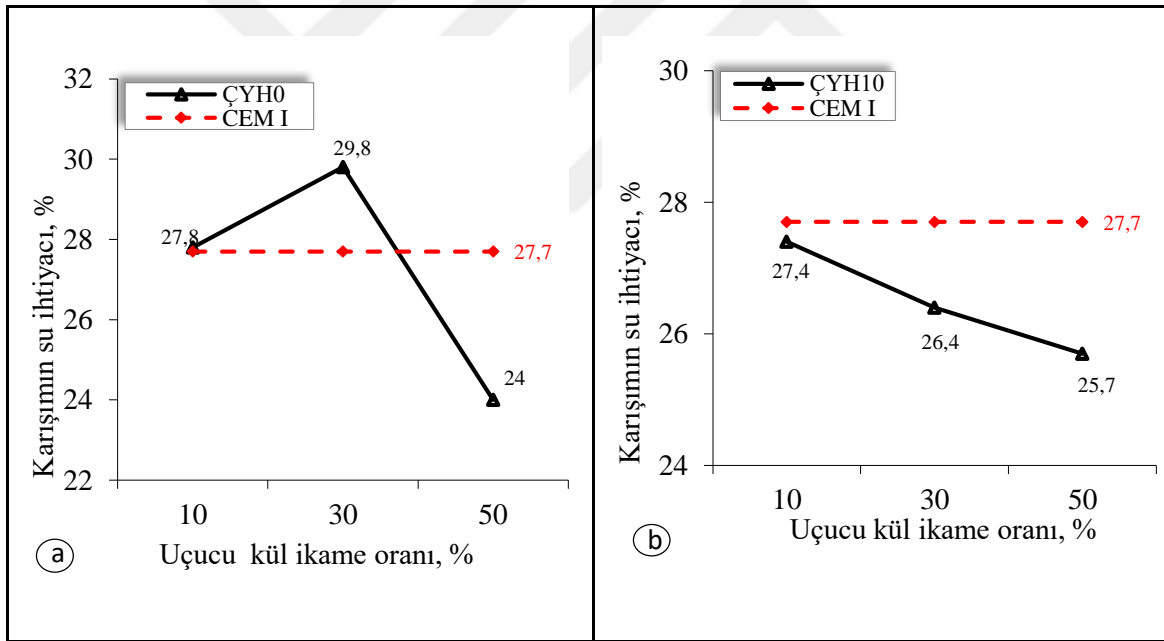


Şekil 3.15. Uçucu küllerde inceliğin ve ikame oranının karışımın su ihtiyacı üzerine etkisi; a) 45 dk öğütülmüş AE uçucu kül katkıli karışımlar, b) 60 dk öğütülmüş AE uçucu kül katkıli karışımlar

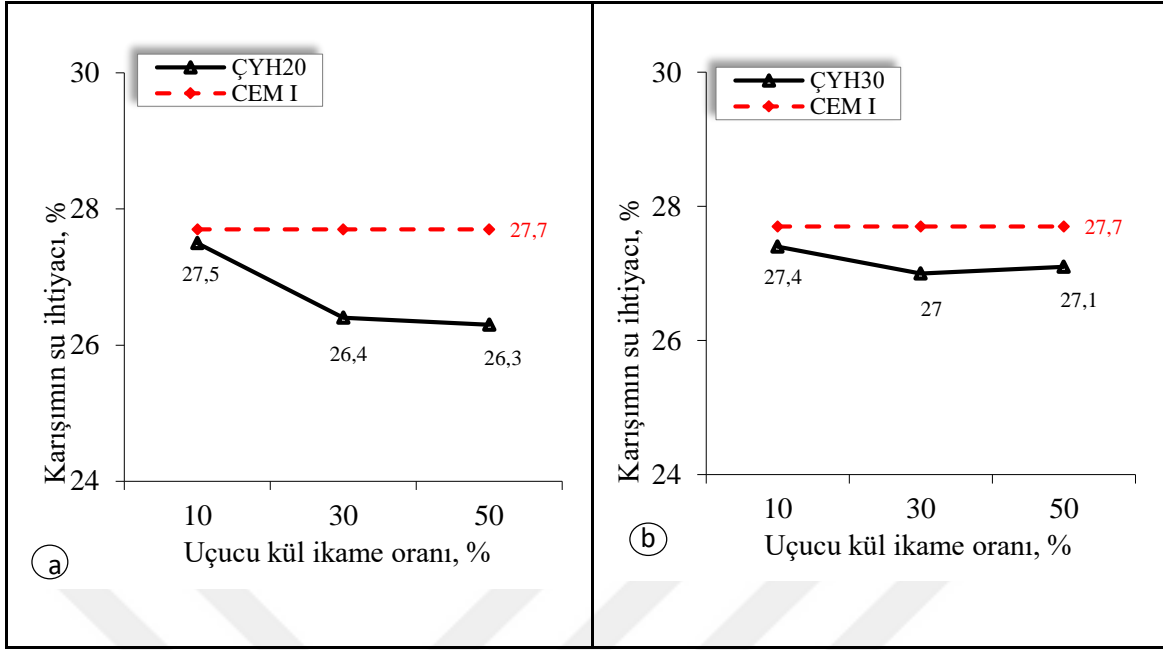
AE uçucu külünün değişik öğütme süreleri ile hazırlanan karışımlarda uçucu külün tane boyutunda çok fazla değişmediğinden karışımın su ihtiyacı üzerinde çok fazla bir etkisi olmamıştır. Ancak çimento içerisinde kullanılan uçucu kül ikame oranı artışına bağlı olarak karışımın su ihtiyacı artmıştır. AE uçucu külünün orijinal durumda ve değişik öğütme süreleri ile çimento içerisine ikame edilen uçucu kül katkıli karışımların su ihtiyacı sadece çimento katkıli referans numunenin su ihtiyacından yüksek değerler almıştır. Orijinal durumda % 10 uçucu kül ikameli karışım ile 60 dk öğütme süreli % 10 ikameli karışımlar arasında su ihtiyacı % 2,9 oranında artış göstermiştir. Orijinal durumda % 30 uçucu kül ikameli karışım ile 60 dk öğütme süreli % 30 ikameli karışımlar arasında su ihtiyacı % 1,7 oranında artmıştır. Orijinal durumda % 50 uçucu kül ikameli karışım ile 60 dk öğütme süreli % 50 ikameli karışımlar arasında su ihtiyacı - % 1,8 oranında azalma göstermiştir. AE uçucu külünün çimentoya ikame oranına göre hazırlanan karışımda en az su ihtiyacından en fazla su ihtiyacına doğru % 10 ikameli, % 30 ikameli ve % 50 ikameli şeklinde sıralanmıştır. Afşin Elbistan uçucu külü ile hazırlanan karışımlarda karışımın su ihtiyacını arttırması uçucu külü oluşturan tanenin içyapısı ile ilişkilendirilmiştir. Afşin Elbistan uçucu külünün iç yapısı Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verildiği gibi boşluklu ve düzensiz tane yapısından oluştuğu görülmüştür. Uçucu külün içyapısındaki parçacıkların fazla miktarda boşluklu yapıda olması karışımın daha fazla su tüketmesine neden olmuştur.

Ancak uçucu külü öğütme ile boşluk miktarının ve yapısının azalması durumunda karışımın su ihtiyacında azaltmıştır (Cheerarot ve Jaturapitakkul, 2004). Öğütme ile boşluklu tane yapısına sahip parçacıkların kırılması sonucu su miktarı azalmakta ancak öğütme süresi ile artan düzensiz şekilli parçacıklardan dolayı karışımın su ihtiyacını arttırmaktadır (Hela ve Orsakovà, 2013). Karışımın su ihtiyacı uçucu külün incelik değeri tarafından da değişmektedir. İnceliğin artması ile karışımın su ihtiyacında artmaktadır (Kiattikomol vd., 2001). İnceliğe bağlı olarak karışımın su ihtiyacının artması uçucu külün yüzey alanının artması ile ilişkilidir (Felekoglu vd., 2009).

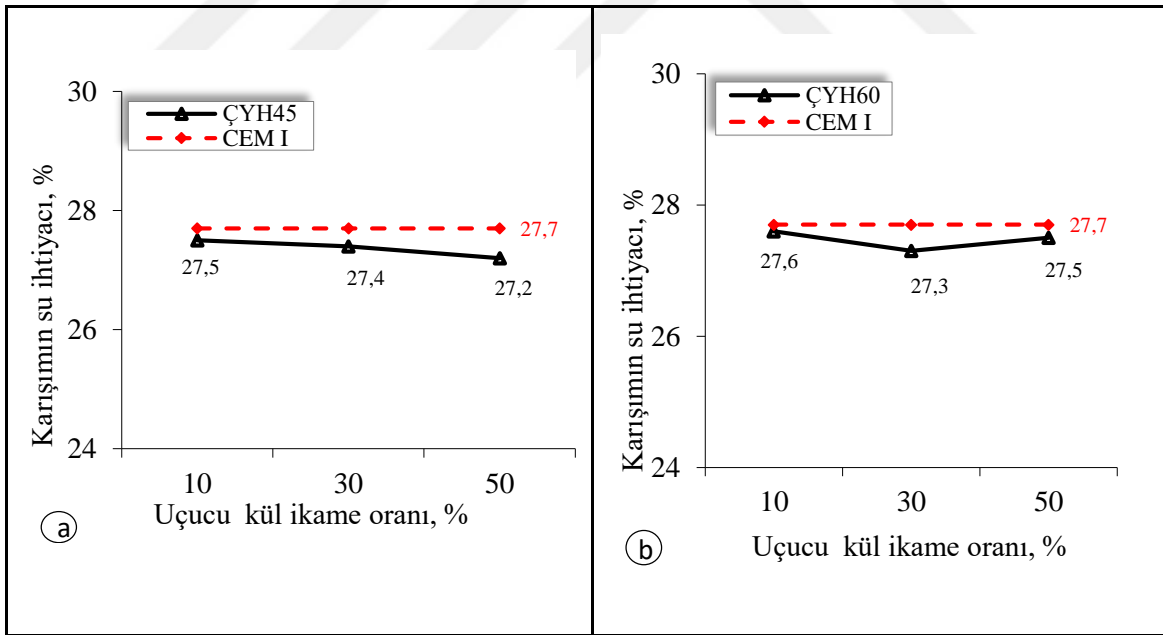
Çayırhan (ÇYH) uçucu küllünün orijinal durumu ve 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme sonrasında çimentoya % 10, % 30 ve % 50 ikame edilmesi ile hazırlanan karışımlar için kıvam tayini deneyi yapılmıştır. Bu deneye ait sonuçlar Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.16. Uçucu küllerde inceliğin ve ikame oranının karışımın su ihtiyacı üzerine etkisi; a) orijinal ÇYH uçucu kül katkı karışımlar, b) 10 dk öğütülmüş ÇYH uçucu kül katkı karışımlar



Şekil 3.17. Uçucu küllerde inceliğin ve ikame oranının karışımın su ihtiyacı üzerine etkisi; a) 20 dk öğütülmüş ÇYH uçucu kül katkıli karışımlar, b) 30 dk öğütülmüş ÇYH uçucu kül katkıli karışımlar



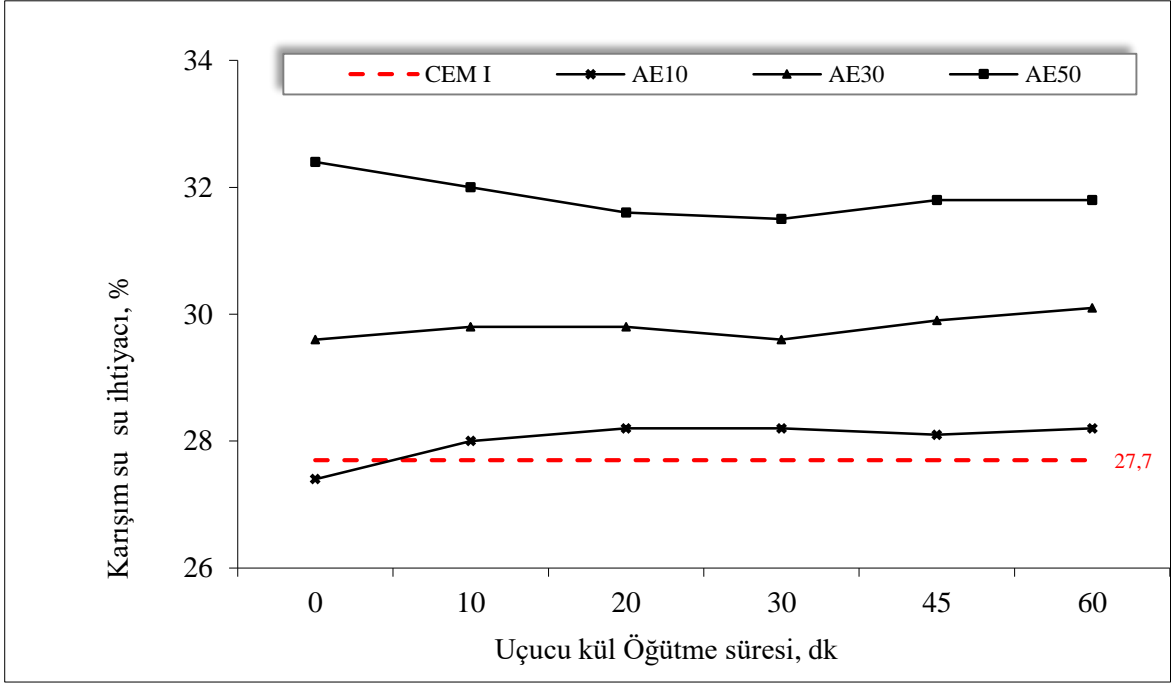
Şekil 3.18. Uçucu küllerde inceliğin ve ikame oranının karışımın su ihtiyacı üzerine etkisi; a) 45 dk öğütülmüş ÇYH uçucu kül katkıli karışımlar, b) 60 dk öğütülmüş ÇYH uçucu kül katkıli karışımlar

Çayırhan uçucu kül katkıli karışımlarda uçucu külün öğütme süresine bağlı olarak karışımın su ihtiyacını arttırdığı görülmüştür. Uçucu külün çimento içerisinde ikame oranı

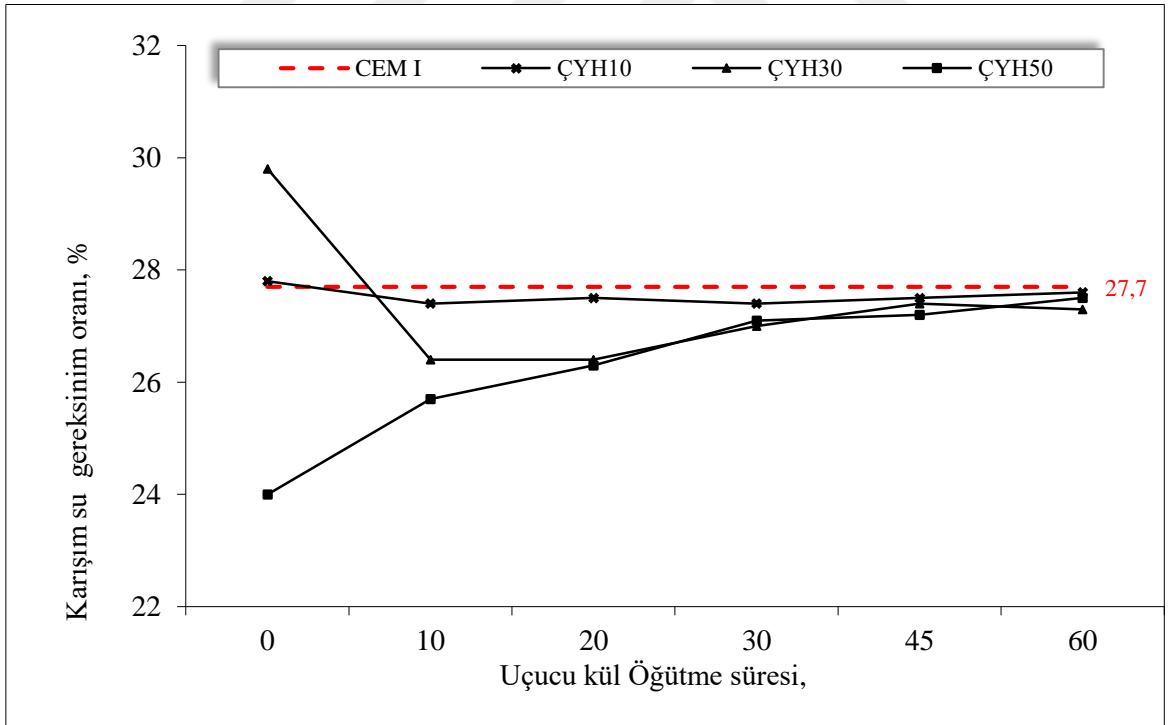
artışına bağlı olarak karışımın su ihtiyacında çok fazla bir değişiklik olmamıştır. Çayırhan uçucu külünün değişik öğütme süreleri ve çimento içerisinde farklı ikame oranları ile hazırlanan karışımların su ihtiyacı orijinal durumda % 10 ve % 30 ikameli karışımlar hariç sadece çimento katkılı karışımdan düşük su ihtiyacı değerleri elde edilmiştir. Çayırhan uçucu külü ile hazırlanan karışımlarda en az su ihtiyacından en çok su ihtiyacına doğru % 50 ikameli, % 30 ikameli, % 10 ikameli karışımlar şeklinde bir sıralama göstermiştir. Çayırhan uçucu külünün öğütme süresine ve çimento içerisinde ikame edilen uçucu kül miktarındaki artışa bağlı olarak karışımın su ihtiyacını azalması uçucu külün küresel tane yapısından ve pürüzsüz yüzey durumundan ileri gelmektedir. Uçucu küle ait tane şekli ve yüzey durumu Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de yapılan SEM analizi ile görüntülenmiştir. Küresel tane yapısına sahip uçucu külün tane yapısına bağlı olarak sürtünmeyi azaltıcı etkisinden dolayı karışımın pompalanması ve ekipman üzerindeki aşınmayı azaltması sonucu karışımın su miktarını azaltmaktadır. Ayrıca uçucu külün 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme sürelerine ait özgül yüzey alan değerleri TS EN 450-1, (2013) standardında belirtilen sınır değer üzerinde değerler aldığından yüksek incelik değerine ve düşük karbon içeriğine sahip olması karışımda daha az su isteğine neden olmaktadır (Thomas, 2007). Uçucu külün inceliğine bağlı olarak karışımdaki su gereksinimini azaltmasını uçucu külün küresel tane yapısında olmasına bağlıdır. Küresel tane yapısına sahip uçucu küllerin hamur içerisinde içsel sürtünmeyi azaltması ile kayganlaştırıcı etki yaparak karışımdaki su miktarını azaltmaktadır (Yijin vd., 2004).

3.2.1.1.2. Uçucu Kül-Çimento İkame Oranı ile Uçucu Kül Öğütme Zamanının Kıvam Üzerine Etkisi

AE ve ÇYH küllerinin tüm ikame oranlarının öğütme süresine göre karışımın su gereksinimleri Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de verilmiştir. Her iki kül ile hazırlanan karışımlarda Afşin Elbistan uçucu kül katkılı karışımların su ihtiyacı Çayırhan uçucu kül katkılı karışımlara göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Afşin Elbistan uçucu kül katkılı karışımlar tamamen çimento katkılı karışıma göre yüksek su ihtiyacına sahipken Çayırhan uçucu kül katkılı karışımlarda ise düşük su ihtiyacına sahiptir. Bu iki uçucu külün su ihtiyacı arasındaki fark uçucu külleri oluşturan tane şeklinden, yüzey durumundan, kimyasal bileşen olarak içerisinde bulunan yanmamış karbon miktarından ve farklı özgül yüzey alan değerlerinden kaynaklanmıştır.



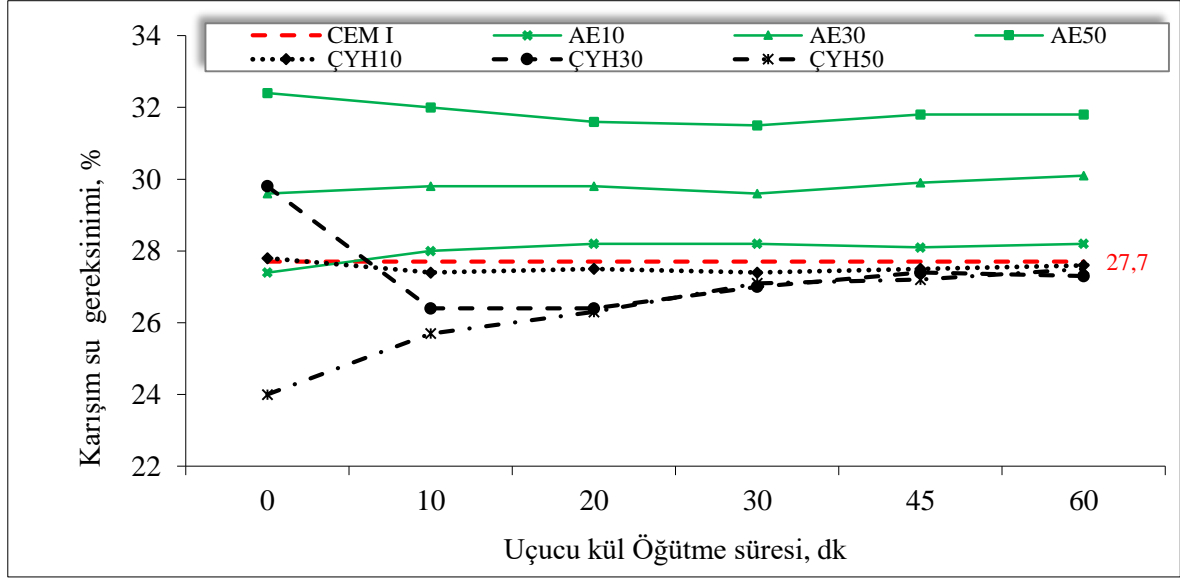
Şekil 3.19. Öğütme süresine göre AE uçucu kül katkıli karışımların su ihtiyacı



Şekil 3.20. Öğütme süresine göre ÇYH uçucu kül katkıli karışımların su ihtiyacı

Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu kül katkıli karışımların su ihtiyaçları kendi aralarında ve referans numuneye göre Şekil 3.21’de verildiği gibi kıyaslanmıştır. Bu

kıyaslamaya göre Afşin Elbistan uçucu kül katkıli karışımlarda öğütme süresine ve ikame oranına göre karışımların su ihtiyacı artışı Çayırhan uçucu kül katkıli karışımlardan ve referans numuneden yüksek değerler almıştır. Afşin Elbistan uçucu kül katkıli karışımlarda çimento içerisinde ikame oranının artması ile karışımların su ihtiyacı artarken Çayırhan uçucu kül katkıli karışımlarda ise azalmıştır.



Şekil 3.21. AE ve ÇYH uçucu kül katkıli karışımların su ihtiyacının referans numuneye göre kıyaslanması

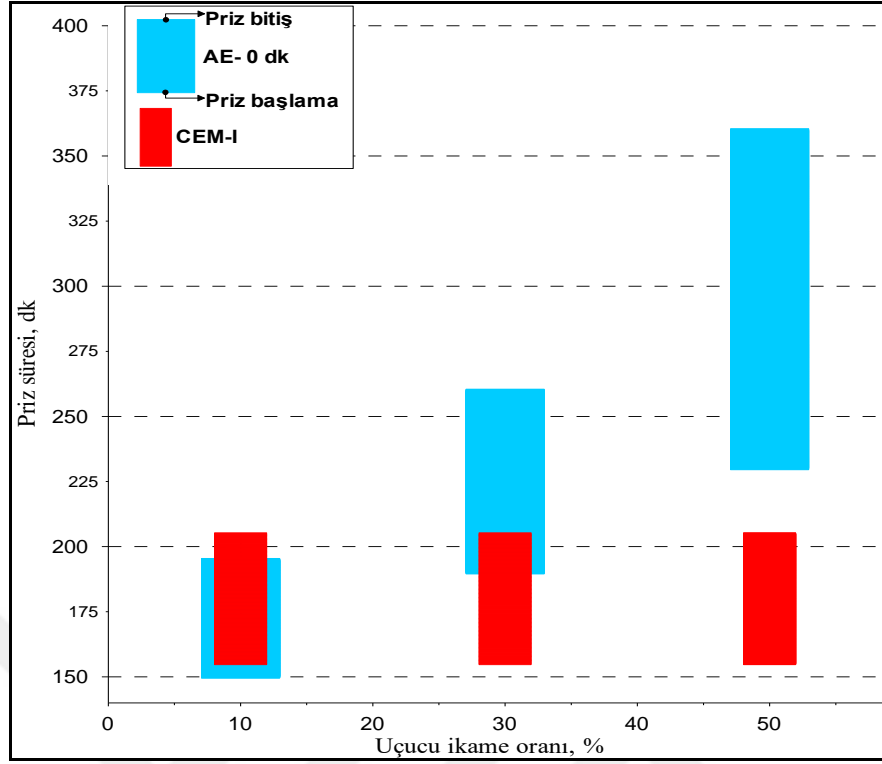
3.2.1.2. Priz Süresi

Afşin Elbistan ve Çayırhan uçucu küllerinin orijinal durumda ve değişik öğütme süreleri ve çimentoya % 10, % 30 ve % 50 ikame edilmesi ile hazırlanan karışımların priz süreleri üzerine etkisinin belirlemek için priz süresi tayini deneyi yapılmıştır.

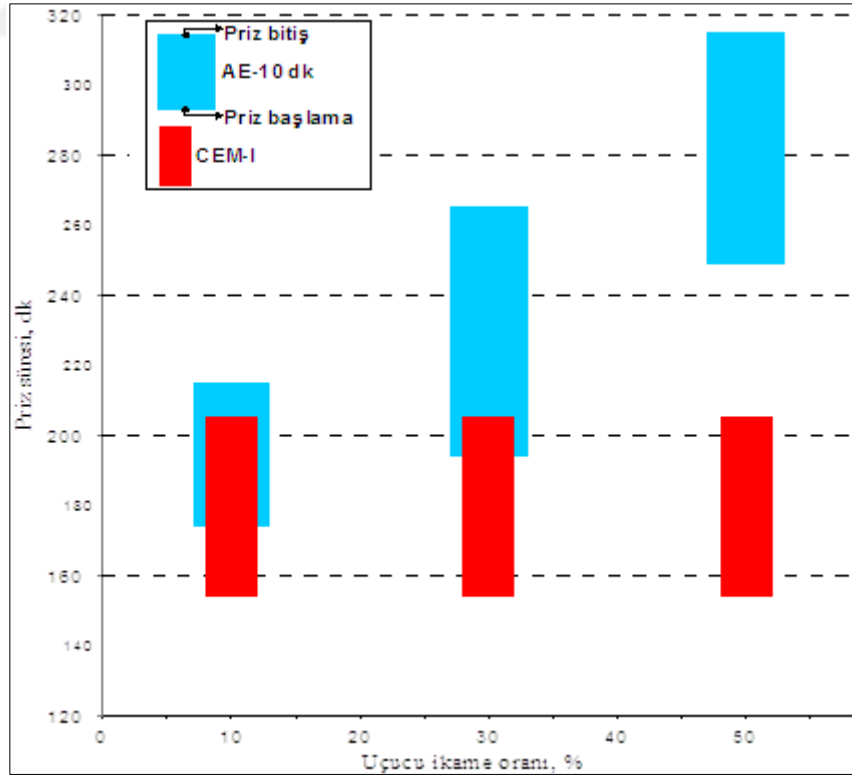
3.2.1.2.1. Uçucu Küllerin İnceliğinin Çimentoya İkame Oranına Göre Priz Süresi Üzerine Etkisi

Yapılan priz süresi deneyi sonuçlarına göre AE uçucu külünün orijinal durumu ve 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme süreleri ile çimento içerisinde farklı ikame oranlarında hazırlanan karışımların priz başlama ve priz sonu süreleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.22, Şekil 3.23, Şekil 3.24, Şekil 3.25, Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de verilmiş

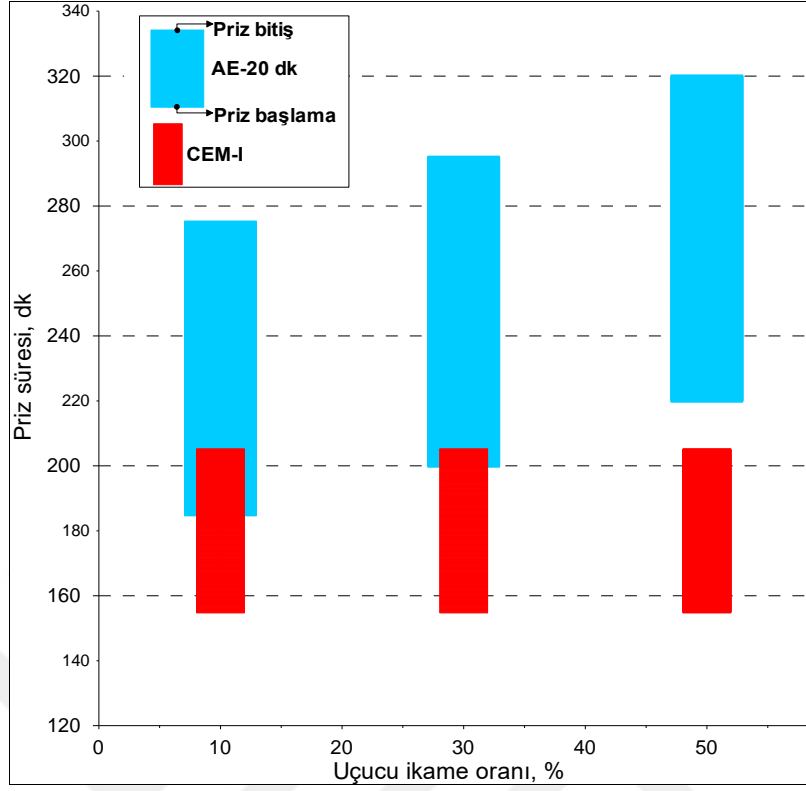
olup referans numunesi ile kıyaslanmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre AE uçucu külünün orijinal durumu ile 60 dk öğütme süresi sonrasında uçucu külün inceliğine bağlı olarak priz başlama ve sonu sürelerini uzattığı görülmüştür. Priz süreleri üzerinde uçucu külün incelik değerlerinin yanı sıra çimento içerisinde ikame edilen kül miktarındaki artışa bağlı olarak priz sürelerini uzattığı görülmüştür. % 10 ikameli orijinal uçucu kül katkıli karışımın priz başlama süresi ile aynı ikame oranlı 60 dk öğütme süreli karışımın priz başlama süresini 20 dk uzattığı, priz sonu süresini ise 25 dk uzattığı hesap edilmiştir. % 10 uçucu kül ikameli orijinal durumda uçucu kül katkıli karışımın priz başlama süresi 150 dk, % 30 uçucu kül orijinal durumda uçucu kül katkıli karışımın priz başlama süresi 190 dk ve % 50 uçucu kül ikameli orijinal durumda uçucu kül katkıli karışımın priz başlama süresi 230 dk olarak belirlenmiştir. İkame oranındaki artışa bağlı olarak % 10 ikame oranından % 30 ikame oranına doğru % 26,6 oranında, % 30 ikame oranından % 50 ikame oranına doğru % 21,1 oranında priz başlama süresini uzattığı belirlenmiştir. % 10 uçucu kül ikameli orijinal durumda uçucu kül katkıli karışımın priz sonu süresi 195 dk, % 30 uçucu kül ikameli orijinal durumda uçucu kül katkıli karışımın priz sonu süresi 260 dk ve % 50 uçucu kül ikameli orijinal durumda uçucu kül katkıli karışımın priz sonu süresi 360 dk olarak belirlenmiştir. İkame oranındaki artışa bağlı olarak % 10 ikame oranından % 30 ikame oranına doğru % 33,3 oranında, % 30 ikame oranından % 50 ikame oranına doğru % 38,5 oranında priz sonu süresini uzatmıştır. % 10 ikameli, % 30 ve % 50 ikameli 60 dk öğütme süresine sahip uçucu kül katkıli karışımların priz başlama süreleri sırası ile 170 dk, 180 dk ve 210 dk olarak belirlenmiştir. İkame oranındaki artışa bağlı olarak % 10 ikame oranından % 30 ikame oranına doğru % 5,8 oranında, % 30 ikame oranından % 50 ikame oranına doğru % 16,6 oranında priz başlama süresini uzattığı görülmüştür. % 10 ikameli, % 30 ve % 50 ikameli 60 dk öğütme süresine sahip uçucu kül katkıli karışımların priz sonu süreleri sırası ile 220 dk, 245 dk ve 315 dk olarak belirlenmiştir. İkame oranındaki artışa bağlı olarak % 10 ikame oranından % 30 ikame oranına doğru % 11,4 oranında, % 30 ikame oranından % 50 ikame oranına doğru % 28,6 oranında priz sonu süresini uzattığı görülmüştür.



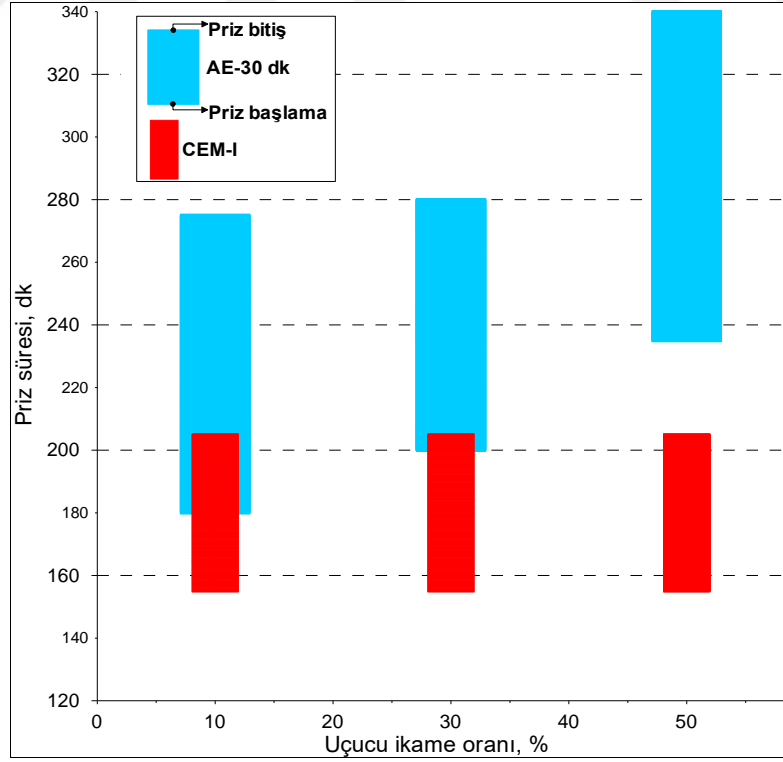
Şekil 3.22. AE orijinal durumda uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri



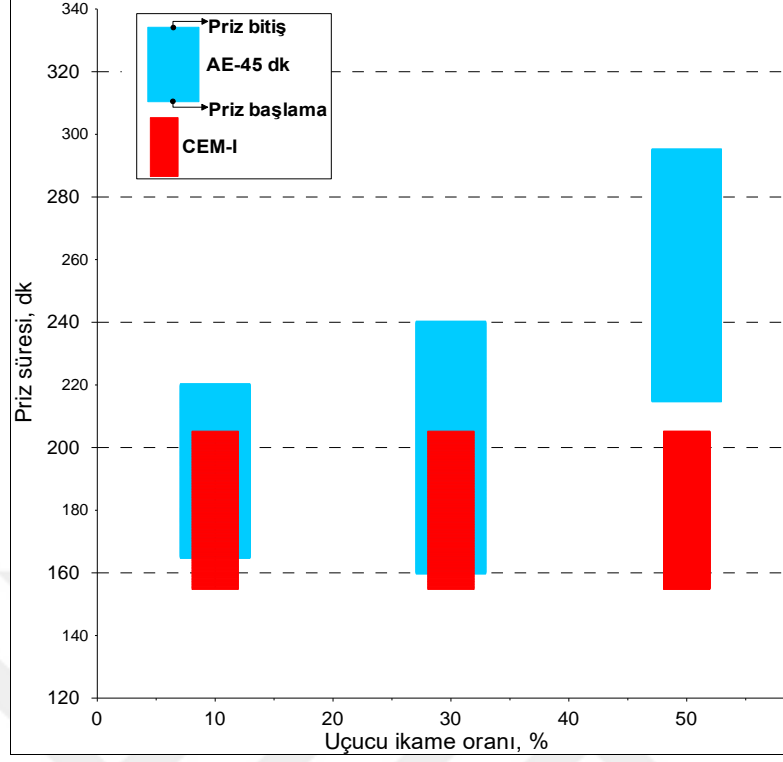
Şekil 3.23. AE 10 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri



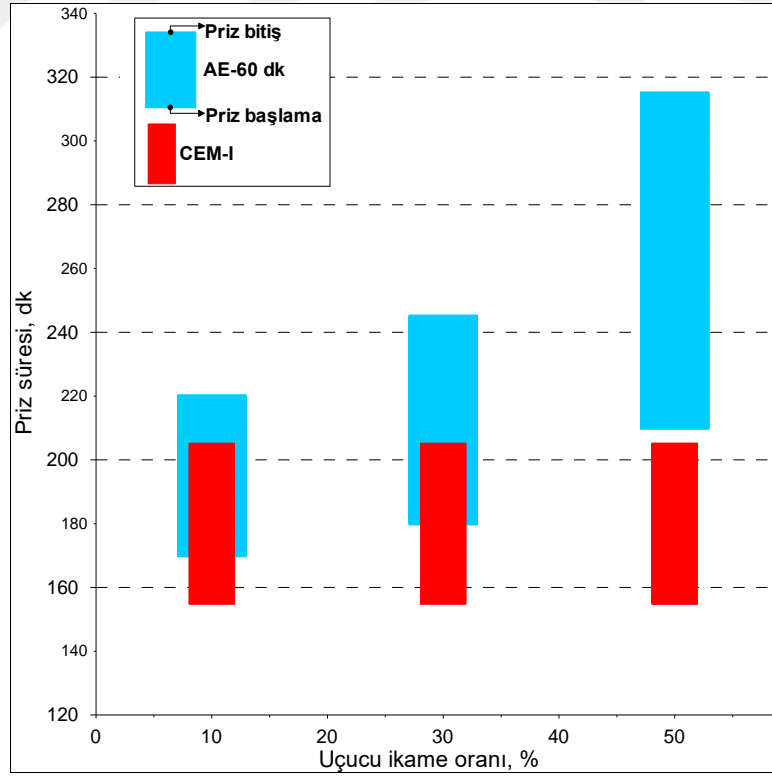
Şekil 3.24. AE 20 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri



Şekil 3.25. AE 30 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri



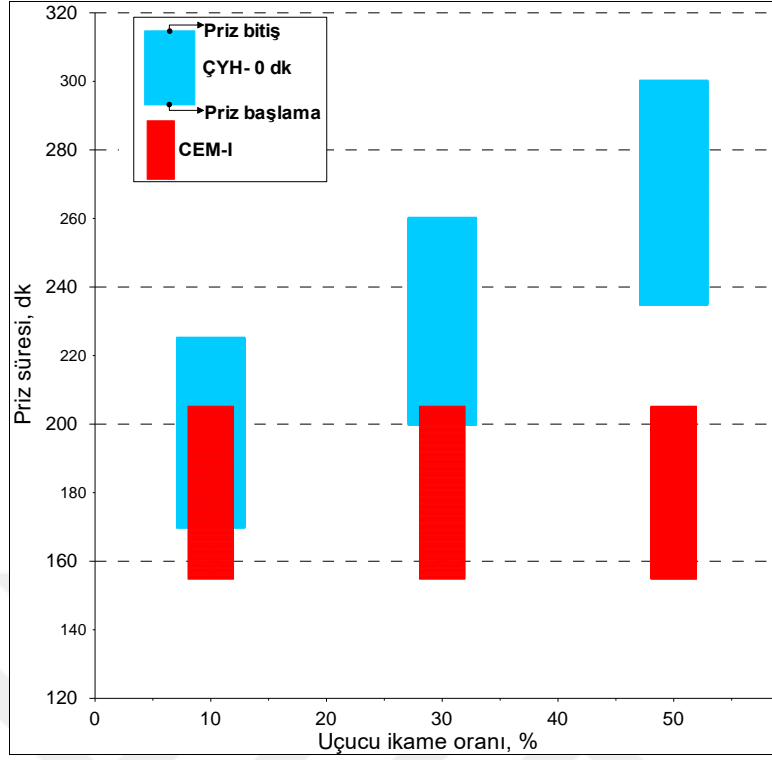
Şekil 3.26. AE 45 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri



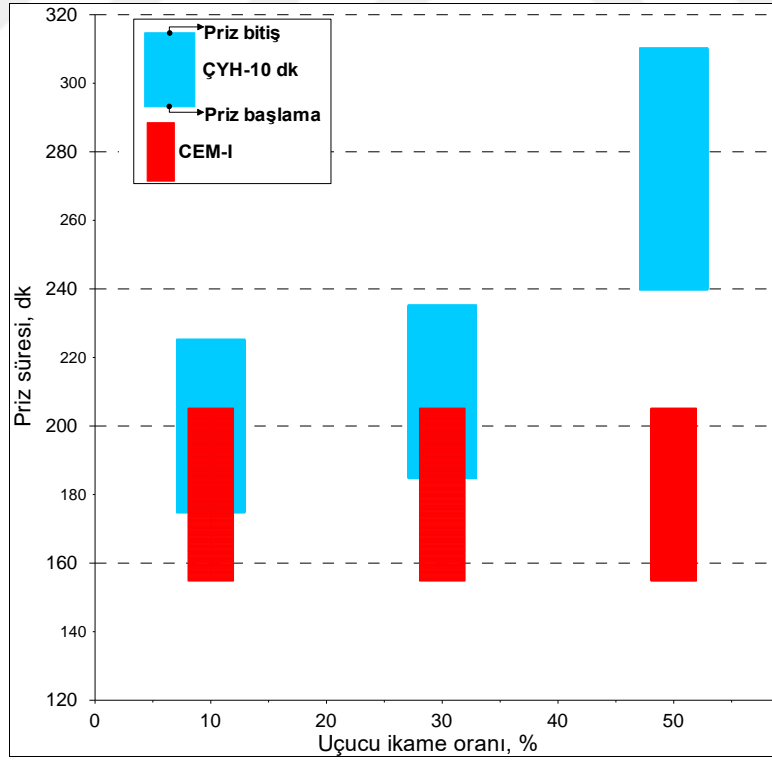
Şekil 3.27. AE 60 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri

AE uçucu külün çimento içerisinde öğütme süresi ve inceliğine göre priz sürelerinde artışa neden olduğunu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, uçucu külün öğütmesi ile incelik değerinde artışın aynı kıvamda karışımın su ihtiyacının artmasına buna bağlı olarakta S/Ç oranının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca su ihtiyacında artışın çimentonun hidrasyon süresi ile birlikte priz süresinide geciktirmeye sebebiyet vermektedir (Çavuşoğlu, 2013). Uçucu küllerin inceliği ve ikame oranının yanı sıra kimyasal bileşimininde priz süresi etkilemektedir. C ve F tipi uçucu küllerin taze betonun priz süresi üzerine etkisi bakıldığında, F tipi uçucu külün priz sürelerini uzattığı, C tipi uçucu küllerin ise hem uzatabilir hem de kısaltabilir şeklinde bir özellik göstermektedir (Taylor vd., 2006; Thomas ve Wilson, 2002; Kosmatka vd., 2002). Uçucu kül katkılı karışımların priz başlama ve sonu sürelerini uzatması belli süreler içerisinde kalması ile beton içerisinde kullanıldığında birçok avantaj sağlamaktadır. Bu süreler priz başlama için minimum 60 dk, priz sonu için maksimum 600 dk olması taze betonun yerleştirilmesi ve taşınmasına, kalıp sökme işleminin uygun zamanlarda yapılmasına, dayanımın istenilen sürelerde elde edilmesinde ve betonun maruz kalabilecek zor iklim koşullarına karşı dayanıklı olmasını sağlamaktadır (Koçak, 2011).

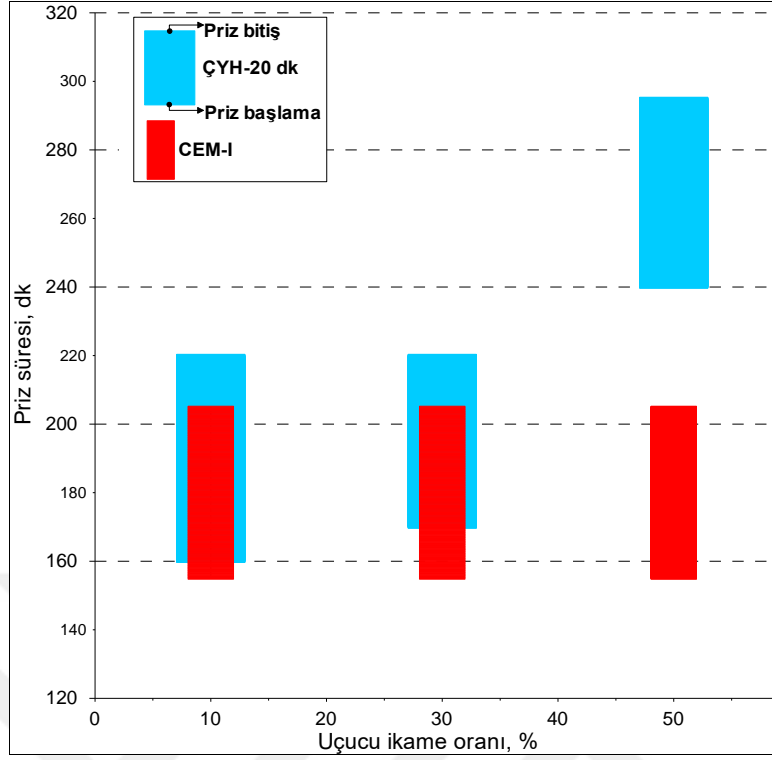
Yapılan priz süresi deneyi sonuçlarına göre ÇYH uçucu külünün orijinal durumu ve 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme süreleri ile çimento içerisinde farklı ikame oranlarında hazırlanan karışımların priz başlama ve priz sonu süreleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.28, Şekil 3.29, Şekil 3.30, Şekil 3.31, Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'de verilmiş olup referans numunesi ile kıyaslanmıştır. ÇYH uçucu kül katkılı karışımlarda öğütme inceliğine ve çimento içerisinde ikame edilen uçucu kül miktarındaki artışa bağlı olarak priz başlama ve sonu sürelerinin uzamasına neden olmaktadır. % 10 ikameli, % 30 ve % 50 ikameli orijinal uçucu kül katkılı karışımların priz başlama süreleri sırası ile 170 dk, 200 dk ve 235 dk olarak belirlenmiştir. İkame oranındaki artışa bağlı olarak % 10 ikame oranından % 30 ikame oranına doğru % 17,6 oranında, % 30 ikame oranından % 50 ikame oranına doğru % 17,5 oranında priz başlama süresini uzattığı görülmüştür. % 10 ikameli, % 30 ve % 50 ikameli orijinal uçucu kül katkılı karışımların priz sonu süreleri sırası ile 195 dk, 260 dk ve 300 dk olarak belirlenmiştir. İkame oranındaki artışa bağlı olarak % 10 ikame oranından % 30 ikame oranına doğru % 33,3 oranında, % 30 ikame oranından % 50 ikame oranına doğru % 15,4 oranında priz sonu süresini uzattığı görülmüştür.



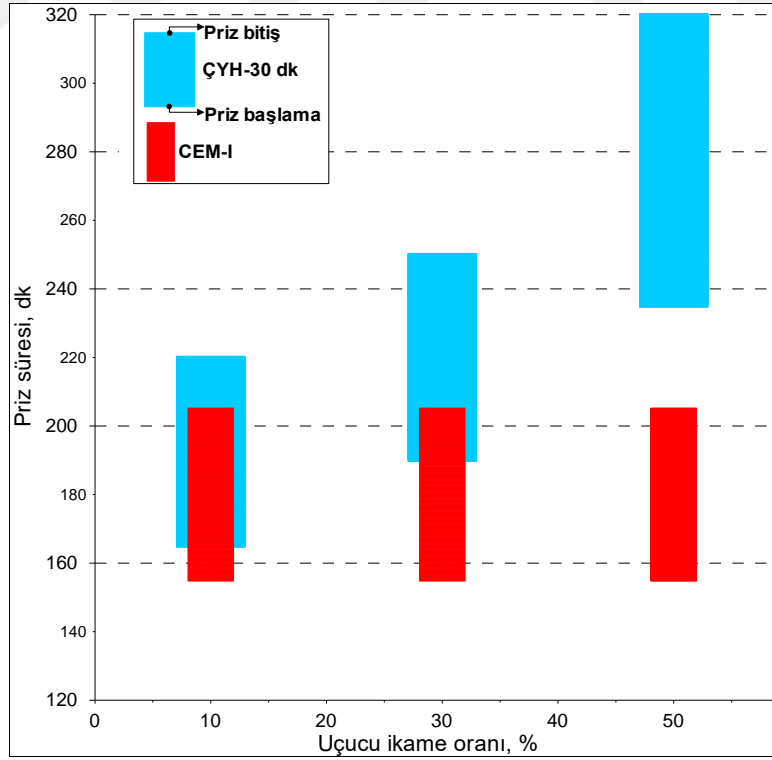
Şekil 3.28. ÇYH orijinal durumda uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri



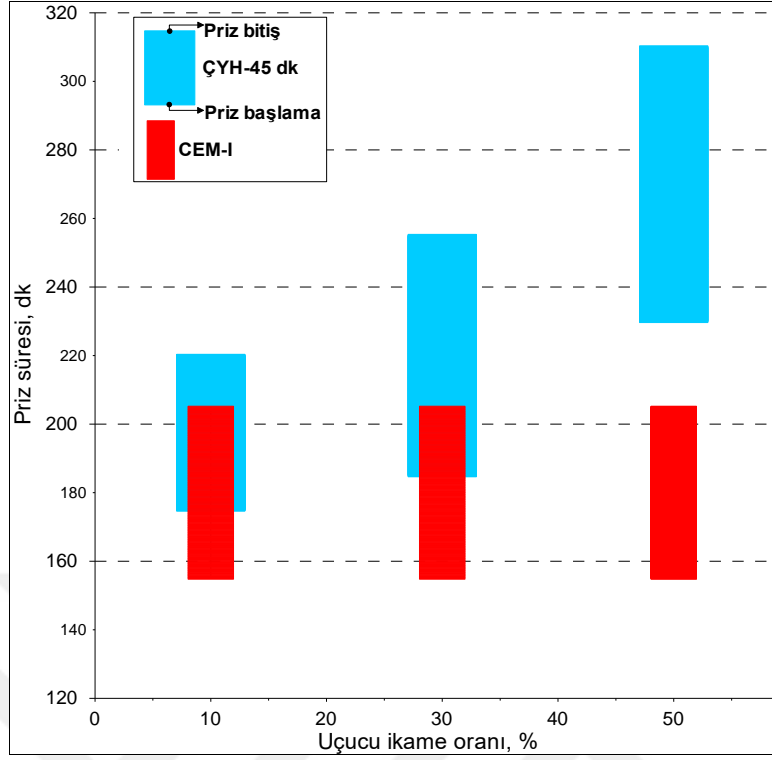
Şekil 3.29. ÇYH 10 dk öğütülmüş uçucu kül ikameli karışımın priz süreleri



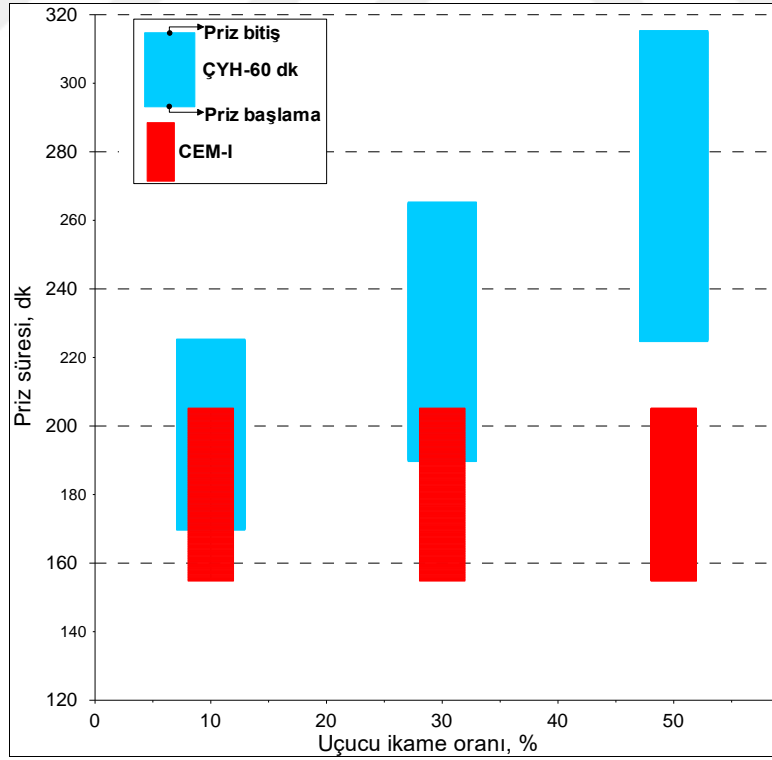
Şekil 3.30. ÇYH 20 dk öğütülmüş uçucu kül ikamelı karışımın priz süreleri



Şekil 3.31. ÇYH 30 dk öğütülmüş uçucu kül ikamelı karışımın priz süreleri



Şekil 3.32. ÇYH 45 dk öğütülmüş uçucu kül ikamelı karışımın priz süreleri



Şekil 3.33. ÇYH 60 dk öğütülmüş uçucu kül ikamelı karışımın priz süreleri

% 10 ikameli, % 30 ve % 50 ikameli 60 dk öğütme süresine sahip ÇYH uçucu kül katkılı karışımların priz başlama süreleri sırası ile 170 dk, 190 dk ve 225 dk olarak belirlenmiştir. İkame oranındaki artışa bağlı olarak % 10 ikame oranından % 30 ikame oranına doğru % 11,7 oranında, % 30 ikame oranından % 50 ikame oranına doğru % 18,4 oranında priz başlama süresini uzatmıştır. % 10 ikameli, % 30 ve % 50 ikameli 60 dk öğütme süresine sahip uçucu kül katkılı karışımların priz sonu süreleri sırası ile 220 dk, 265 dk ve 315 dk olarak belirlenmiştir. İkame oranındaki artışa bağlı olarak % 10 ikame oranından % 30 ikame oranına doğru % 20,5 oranında, % 30 ikame oranından % 50 ikame oranına doğru % 18,8 oranında priz sonu süresini uzattığı belirlenmiştir.

ÇYH uçucu külünün priz süresini uzatması uçucu külü oluşturan tanelerin inceliği ile ilişkilidir. İnce tane yapısına sahip uçucu kül miktarının artmasına bağlı olarak parçacıklarının en dış yüzeylerinin artması ile emilmiş (absorbe) kalsiyum iyonlarının miktarında arttırmaktadır. Bu durum erken hidrasyon sırasında taze hamurda kalsiyum iyonları konsantrasyonunu engellediğini için priz süresinin uzamasına ve hidrasyon ısısının düşmesine neden olmaktadır (Yijin vd.,2004). Uçucu küllerin priz süresini uzatmasında tane inceliğinin etkisi dışında farklı faktörlerde etkin rol oynamaktadır. Bu faktörler aşağıda verilmiştir (Gürbüz, 2009);

- 1- Uçucu külün betonda kullanılması durumunda çimentonun hidrasyonu sonucu açığa çıkan Ca(OH)_2 bileşenine ihtiyaç duyması,
- 2- Uçucu küllerin kimyasal bileşimlerinin farklılığı (F tipi (düşük kireçli) uçucu küller, reaksiyona girmek için çimentodan gelen hidrasyon ürünlerini beklemesi sonucu C tipi uçucu külüne göre priz süresini daha fazla uzatmakta),
- 3- Çimento içerisinde uçucu küllerin sülfatla reaksiyona girerek hidrasyon reaksiyonunu geciktirmesine bağlıdır.

3.2.1.3. Hacim Genleşmesi

Çalışmada AE ve ÇYH uçucu küllerin kimyasal bileşimlerinde bulunan serbest kalsiyum oksit ve magnezyum oksit miktarlarına göre hidrasyon sonucu genleşme riskini belirlemek için hacim genleşme deneyi yapılmıştır. Deney her iki uçucu külün orijinal durumları ve 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme süreleri ile çimento içerisine % 10, % 30 ve % 50 ikame edilmesi ile hazırlanan karışımlar üzerine yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları Tablo 3.6'da verilmiştir. Tablo 3.6'da sadece AE uçucu kül katkılı karışıma ait

genleşme değerleri verilmiş olup ÇYH uçucu kül katkılı karışımlar genleşme oluşturmadığından tabloda yer almamıştır. Çünkü ÇYH uçucu külü içerisinde serbest kireç olmadığından genleşme riski oluşturmamıştır.

Tablo 3.6. AE uçucu kül ikameli karışımların genleşme miktarları

Öğütme Süresi, dk	AE çimento ikame oranı, %			TS EN 450-1
	10	30	50	
Referans (Çimento)	0			≤ 10 mm
0	0	1	3	
10	1	1	1	
20	1	2	1	
30	1	5	2	
45	0	0	0	
60	0	1	0	

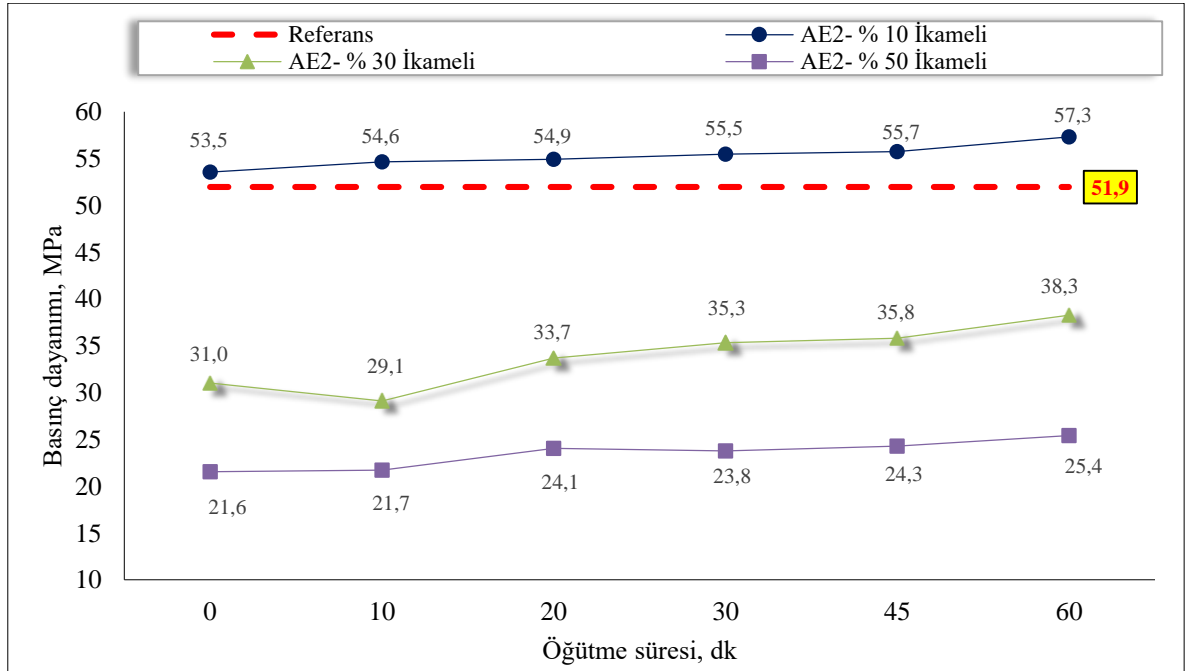
Yapılan genleşme tayini deneyi sonucu her iki uçucu külün tüm öğütme süresi ve ikame oranları ile hazırlanan karışımlar için genleşme değerlerinin standartta belirtilen sınır değerinin altında değerler almıştır. AE uçucu külü için genleşme miktarı değeri ÇYH külüne göre daha yüksek olması kimyasal bileşiminde bulunan serbest kireç miktarının ve tane boyutunun iri olmasından ileri gelmiştir. Uçucu küllerin çimento yerine kullanılması ile çimento miktarının ve buna bağlı olarak trikalsiyum alüminat ana bileşeni ve alkali miktarında da azalma oluşturduğundan karışımın genleşme miktarını azalmaktadır. Uçucu küllerin inceliğinin ve ikame oranının artmasına ile genleşme miktarını azaltmasının nedeni karışımın sülfata karşı direncini azaltmakta ve alkali-agrega reaksiyonu sonucu oluşmuş genleşme miktarını azaltmasına bağlıdır. Ayrıca ince tane yapısına sahip uçucu küller karışımda boşlukları daha iyi doldurduğundan daha az boşluk yapısı oluşturması ile su geçirimsizliğini azaltmasından dolayı genleşme miktarında azaltmaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007; Sinsiri vd., 2006; Baharavaru, 2012). Uçucu külleri öğütme ile tane boyutunun inceltmesi sonucu hacim genleşme riskini azatmayıp bazen de çok fazla bir etkisini bulunmamaktadır. Bu durumun uçucu külün inceliğinin artmasına bağlı olarak incelik değerindeki artışın SO₃, CaO ve MgO gibi bileşiklerin miktarında bir artışa sebep vermediğinden genleşme miktarını üzerinde değişiklik oluşturmadığı şeklinde açıklanmaktadır (Tekin ve Tekin, 2018).

3.2.1.4. Uçucu Kül İnceliğinin Basınç Dayanım Değeri Üzerine Etkisi

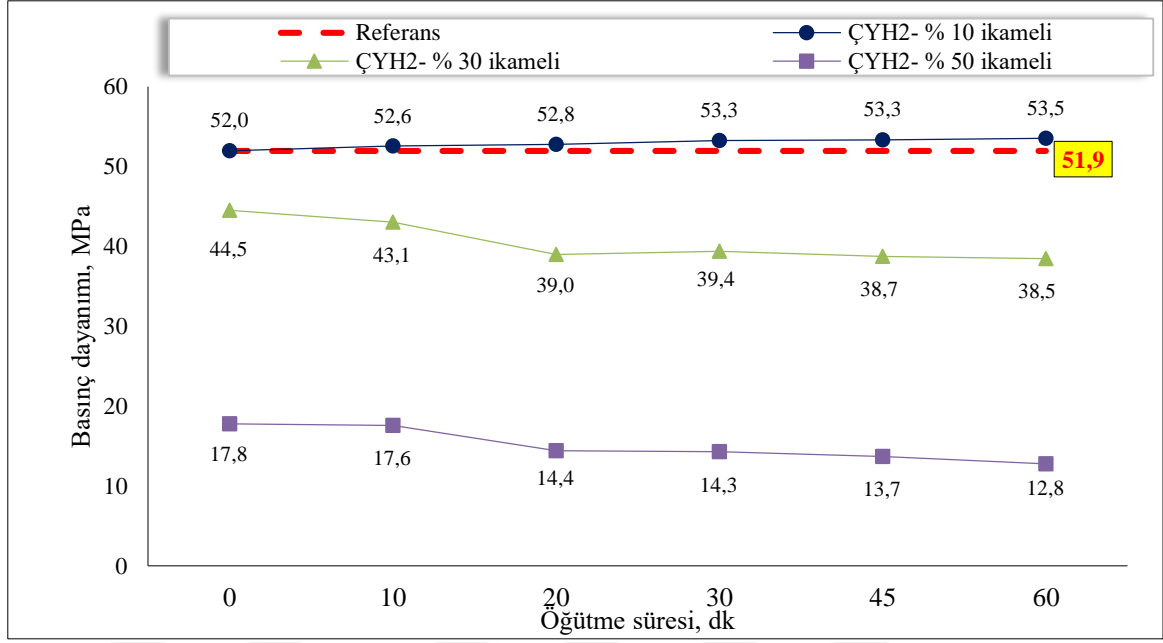
AE ve ÇYH uçucu küllerinin orijinal durumları ile bilyeli değirmende 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme sonucu elde edilen farklı özgül yüzey alan değerlerine sahip malzemelerin çimento yerine % 10, % 30 ve % 50 oranlarında ikame edilmesi ile hazırlanan karışımlar 5x5x5 cm³ boyutunda kalıplara yerleştirilmiştir. Daha sonra 2, 7, 28, 56 ve 90 günlük kür süresi sonunda basınç dayanım değerleri belirlenmiş ve referans (sadece çimento ikameli) numunenin basınç dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır.

3.2.1.4.1. Uçucu Kül İnceliğinin Kısa Dönem Basınç Dayanım Değeri Üzerine Etkisi

Uçucu küllerin çimentoya ikame edilmesi ile hazırlanan karışımların kısa dönem (2 ve 7 günlük) basınç dayanım değerleri numunelerin belirtilen günlerde kür havuzundan çıkarılarak basınç dayanım cihazında kırılması sonucu elde edilmiştir. AE ve ÇYH uçucu küllerinin kısa dönem yani 2 günlük basınç dayanım değerleri Şekil 3.34 ve Şekil 3.35’de, 7 günlük basınç dayanım değerleri ise Şekil 3.36 ve şekil 3.37’de verilmiştir.



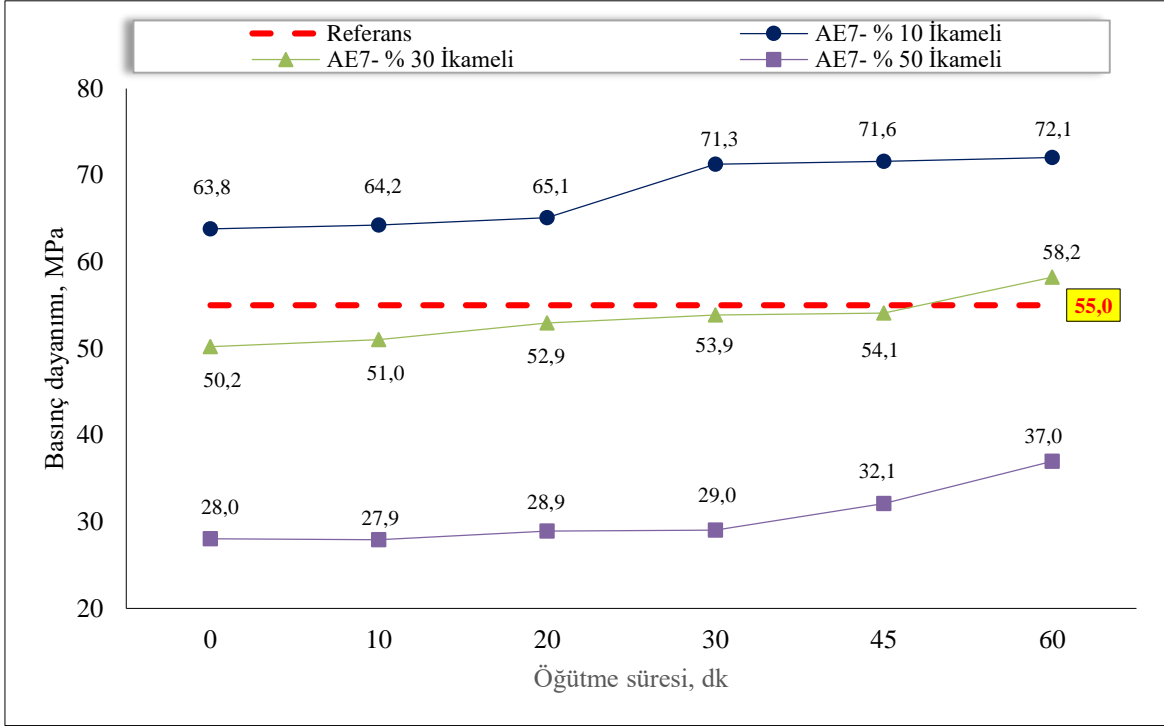
Şekil 3.34. AE uçucu kül katkılı karışımların 2 günlük basınç dayanım değerleri



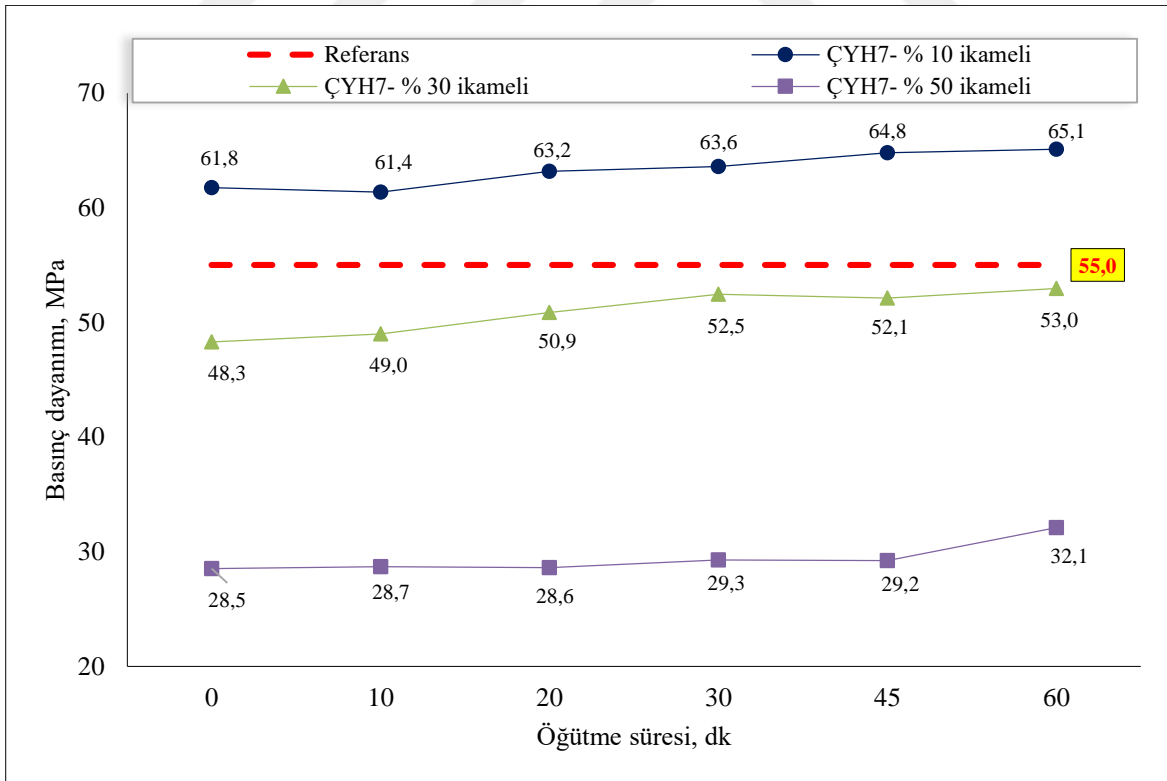
Şekil 3.35. ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 2 günlük basınç dayanım değerleri

AE ve ÇYH uçucu küllerinin 2 günlük farklı öğütme süresinde ve ikame oranlarında basınç dayanım değerleri Şekil 3.34 ve Şekil 3.35’de gösterilmiştir. AE uçucu külünün 2 günlük basınç dayanım değerleri öğütme süresine göre artmıştır. Bu artış en yüksek %10 uçucu kül ikameli karışımlarda olup tüm öğütme süresine ait basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinden yüksek çıkmıştır. %30 ve %50 uçucu kül ikameli karışımlarda ise öğütmeye bağlı basınç dayanım değerleri artmış ancak referans numunenin basınç dayanım değerinden düşük değerler almıştır. Bu düşüş en fazla %50 ikameli karışımlarda görülmüştür. ÇYH uçucu külünün 2 günlük basınç dayanım değerleri ise %10 ikameli karışımlarda öğütmeye göre artmış ve bu artış tüm öğütme süreleri için referans numunenin basınç dayanım değerinden yüksek değerler aldığı belirlenmiştir. %30 ve %50 ikameli karışımlarda ise öğütmeye ve ikame oranındaki artışa göre basınç dayanım değerleri düşmüş ve bu düşüş en fazla %50 ikameli karışımlarda olduğu görülmüştür.

Uçucu küllerin kısa dönem basınç dayanım değerlerinden bir diğeri ise 7 günlük kür süresini tamamlamış numuneler üzerine yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Uçucu küllerin kısa dönem olan 7 günlük basınç dayanım değerleri AE uçucu kül katkılı karışımlar için Şekil 3.36 ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımlar için ise Şekil 3.37’de verilmiştir.



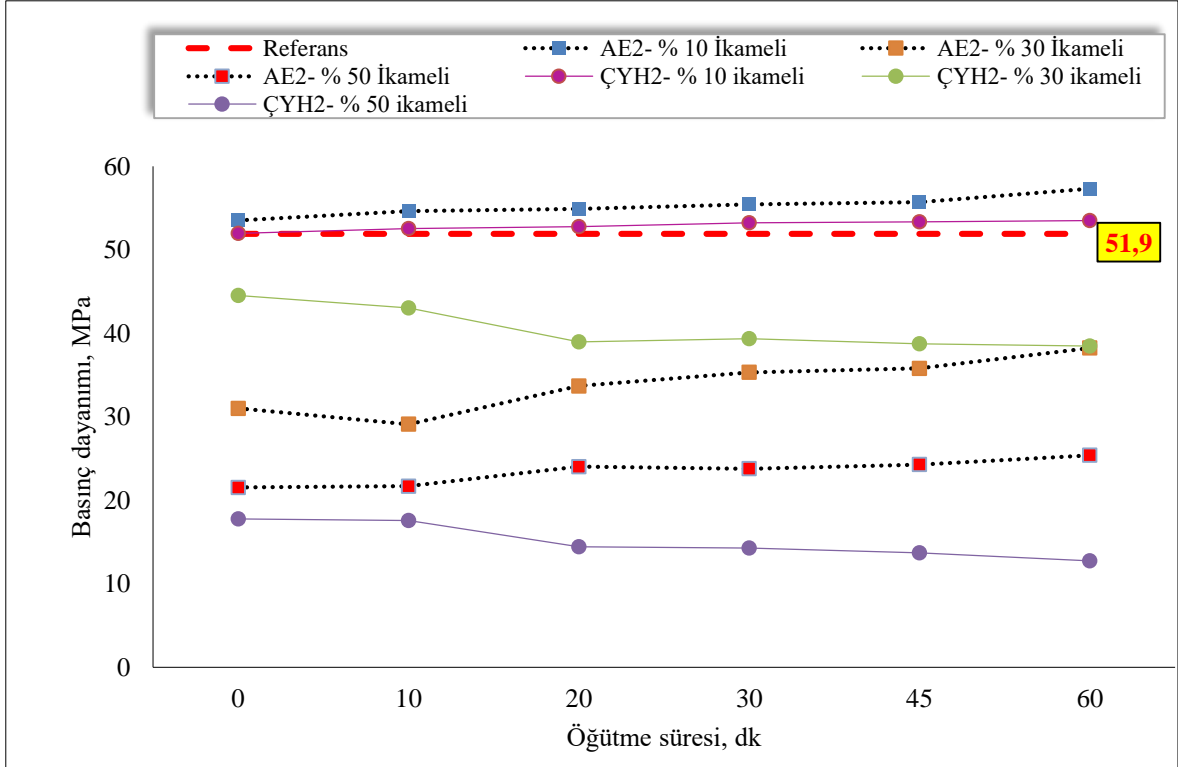
Şekil 3.36. AE uçucu kül katkılı karışımların 7 günlük basınç dayanım değerleri



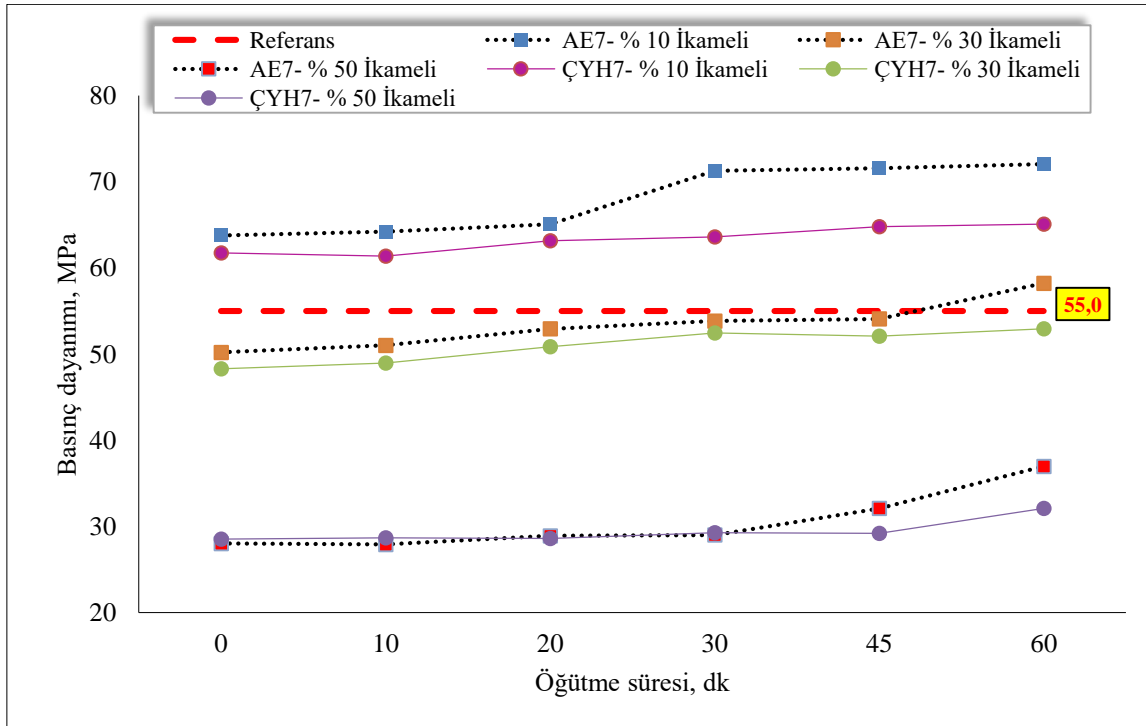
Şekil 3.37. ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 7 günlük basınç dayanım değerleri

AE uçucu külüne ait %10 ikameli karışımların 7 günlük basınç dayanım değerleri 2 günlük basınç dayanım değerlerine benzer sonuçlar vermiştir. AE külünün %10 ikameli 7 günlük tüm öğütme sürelerine ait basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinden yüksek çıkmıştır. Aynı külün %30 ikameli karışımlarında 60 dk öğütme süresine sahip karışım hariç diğer tüm öğütme sürelerine ait karışımların basınç dayanım değerleri ve %50 ikameli tüm öğütme sürelerine ait karışımların basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinden düşük değerler aldığı belirlenmiştir. ÇYH uçucu külünün 7 günlük basınç dayanım değerleri ise %10 ikameli değişik öğütme sürelerine ait karışımlar referans numunenin basınç dayanım değerinden yüksek değerler aldığı görülmüştür. %30 ve %50 ikameli değişik öğütme sürelerine sahip karışımların basınç dayanım değerleri ise referans numunenin basınç dayanım değerinden düşük değerler almıştır.

AE ve ÇYH uçucu küllerininin 2 ve 7 günlük basınç dayanım değerlerini kendi arasında kıyaslanmış ve Şekil 3.38 ve Şekil 3.39'da verilmiştir. Her iki külün değişik öğütme sürelerinde ve çimento içerisindeki ikame oranlarına göre 2 ve 7 günlük basınç dayanım değerlerinde, AE kül katkılı karışımlardan ÇYH kül katkılı karışımlara göre daha yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Her iki uçucu külün 2 ve 7 günlük çimento içerisinde %10 ikamesi ile hazırlanan orijinal durumda ve değişik öğütme sürelerine ait karışımların basınç dayanım değerleri en yüksek değerlerden düşük değerlere doğru AE uçucu kül katkılı karışımlar, ÇYH uçucu kül katkılı karışımlar ve referans numune şeklinde bir sıralama göstermiştir. Ancak her iki uçucu külün çimento içerisinde % 30 ikamesi ile hazırlanan orijinal durumları ve farklı öğütme sürelerine ait basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinden düşük değerler aldığı belirlenmiştir. Bu ikame oranına ait 2 günlük basınç dayanım değerleri en yüksek referans numunesi, ÇYH uçucu kül katkılı karışımlar ve AE uçucu kül katkılı karışımlar şeklinden oluşmuştur. Aynı ikame oranına ait 7 günlük basınç dayanım değerlerindeki sıralama referans numunesi, AE uçucu kül katkılı karışımlar ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımlar şeklinde belirlenmiştir. Her iki külün değişik öğütme sürelerine ait 2 ve 7 günlük %50 ikameli karışımların basınç dayanım değerlerini ise en yüksek referans numunesi, AE uçucu kül katkılı karışımlar ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımlar olarak sıralanmıştır.



Şekil 3.38. AE ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 2 günlük basınç dayanım değerlerinin kıyaslanması

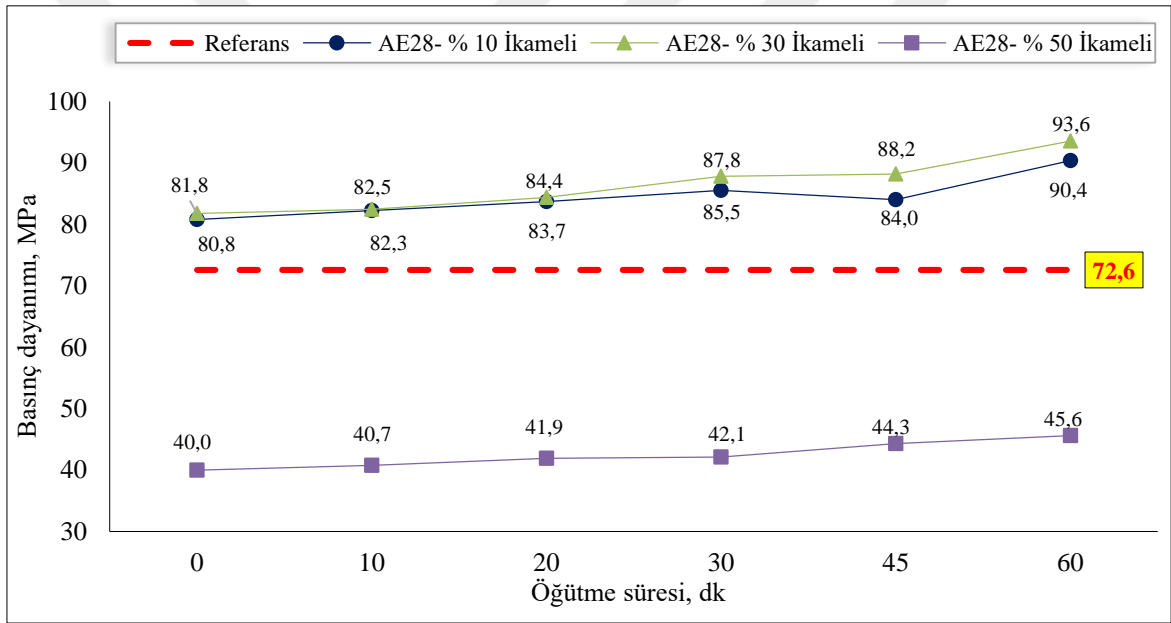


Şekil 3.39. AE ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 7 günlük basınç dayanım değerlerinin kıyaslanması

Her iki külün farklı öğütme sürelerine ait 2 ve 7 günlük %10 ikameli karışımlarda basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinden yüksek çıkması birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler, çimento miktarı, su/çimento oranı, uçucu külün çeşiti, kimyasal içeriği, tane çapı, sıcaklık ve kür koşullarından oluşmaktadır. Kimyasal bileşimi bakımından AE külü C tipi (CaO miktarı; %37,84), ÇYH uçucu külü F tipi (CaO; 11,25) bileşime sahiptir. AE uçucu kül katkılı karışımların basınç dayanım değerleri ÇYH uçucu kül katkılı karışımlara göre yüksek değerler alması puzolanik aktivitenin gelişmesi için bileşiminde fazladan CaO bileşiği olmasına bağlıdır. Uçucu küllerin dayanım kazanımı üzerine genel olarak etkisini erken yaşlarda dayanımı düşürdüğü ilerleyen yaşlarda ise giderek arttırdığı şeklinde bir eğilim göstermektedir. Bunun sebebini ise çimento hidrasyonunun oluşmasını bekleyip reaksiyon sonucu oluşan kireç ile uçucu külün reaksiyona girmesi ile zamanla dayanım kazanmasına bağlıdır. Ancak uçucu kül tipine göre F tipi uçucu kül katkılı karışımların kısa dönem basınç dayanımlarında düşüş görülürken, C tipi uçucu küllerde ise referans numune ile hemen hemen aynı dayanım değerleri vermektedir. Düşük kireçli uçucu kül katkılı karışımların erken yaşlarda dayanım kazanımı referans ve C tipi uçucu kül katkılı karışımlara göre daha düşük ancak ilerleyen yaşlarda her ikisinden de daha yüksek değerler almaktadır. Uçucu küllerin basınç dayanımını geliştirmesi üzerine kimyasal bileşiminin yanı sıra tane inceliğinin önemli etkisi vardır. Tane inceliğinin basınç dayanımı üzerine öğütme ile uçucu kül inceliğinin arttığını buna bağlı olarakta basınç dayanımını geliştirmeye katkı sağlamaktadır. Uçucu külde inceliğin artması özellikle F tipi uçucu küllerde daha önemli olduğunu, çimento ile daha kolay reaksiyona girerek dayanımı geliştirmesi üzerine daha olumlu etkisi oluşturmaktadır (Gürbüz, 2009). Ancak uçucu külün ikame oranı ve incelik değerinin artması bazen erken dayanım değerlerinde düşmeye neden olmaktadır. Bu düşüşü ÇYH uçucu kül katkılı 2 günlük % 30 ve % 50 ikameli karışımlarda belirgin olarak görülmüştür. Bu durum, uçucu kül ikamesinin artması ile karışımın hidrasyon ısısını ve çimento içerisindeki C₃S (tirikalsiyum silikat) miktarını düşürmesi sonucu basınç dayanımında düşmesine neden olmaktadır. Uçucu külün incelik ve ikame oranı çimento içerisinde artması ile ilerleyen günlerde basınç dayanım değerleri sadece çimento ve iri taneli uçucu kül katkılı karışımlara göre yüksek değerler alabilmektedir. Bu durumu ise uçucu külün inceliğinin artması ile daha küçük parçacık boyutu ve daha büyük yüzey alanına sahip olması, hidrasyon ve puzolanik reaksiyon üzerinde olumlu etkisi ile dayanımın artması şeklinde açıklanmaktadır (Naganathan ve Linda, 2013).

3.2.1.4.2. Uçucu Kül İnceliğinin Uzun Dönem Basınç Dayanım Değerleri Üzerine Etkisi

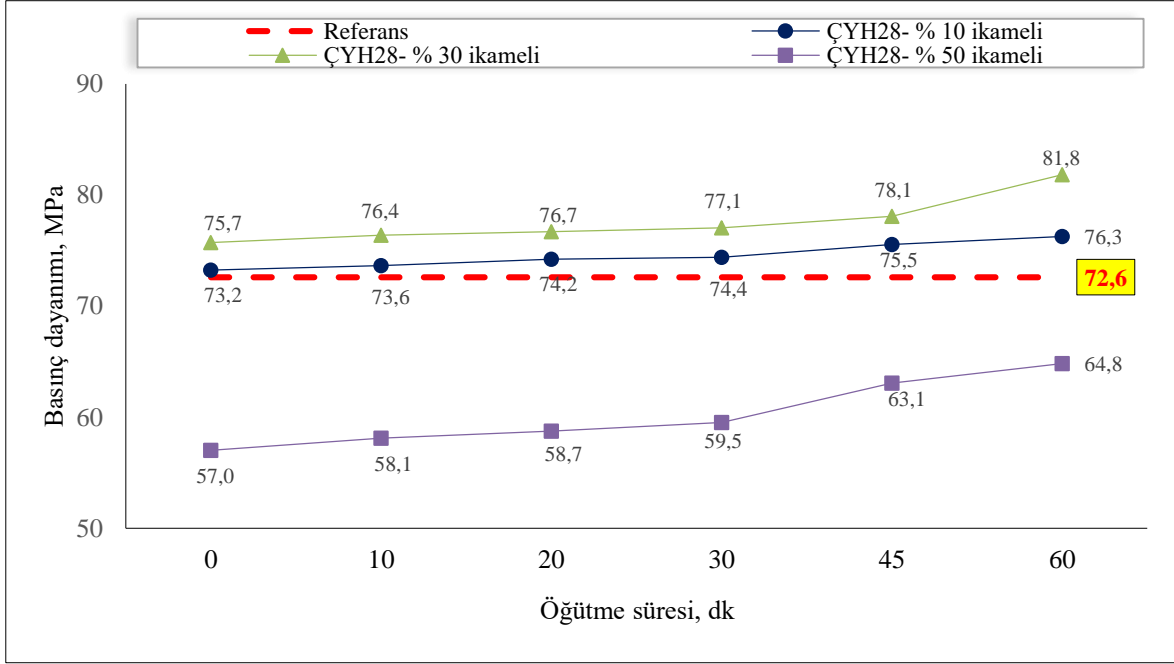
Orijinal durumda ve farklı öğütme sürelerine sahip AE ve ÇYH uçucu küllerinin çimento içerisinde % 10, % 30 ve % 50 ikame edilmesi ile hazırlanan karışımların uzun dönem basınç dayanım değerlerinin belirlenmesi için tek eksenli basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Uzun dönem basınç dayanım deneyi oluşturulan numunelerin 28, 56 ve 90 gün kür havuzunda bekletilmesi sonrasında basınç dayanım testi uygulanması ile elde edilmiştir. AE ve ÇYH uçucu küllerinin 28 günlük basınç dayanım değerleri Şekil 3.40 ve Şekil 3.41’de verilmiştir.



Şekil 3.40. AE uçucu kül katkılı karışımların 28 günlük basınç dayanım değerleri

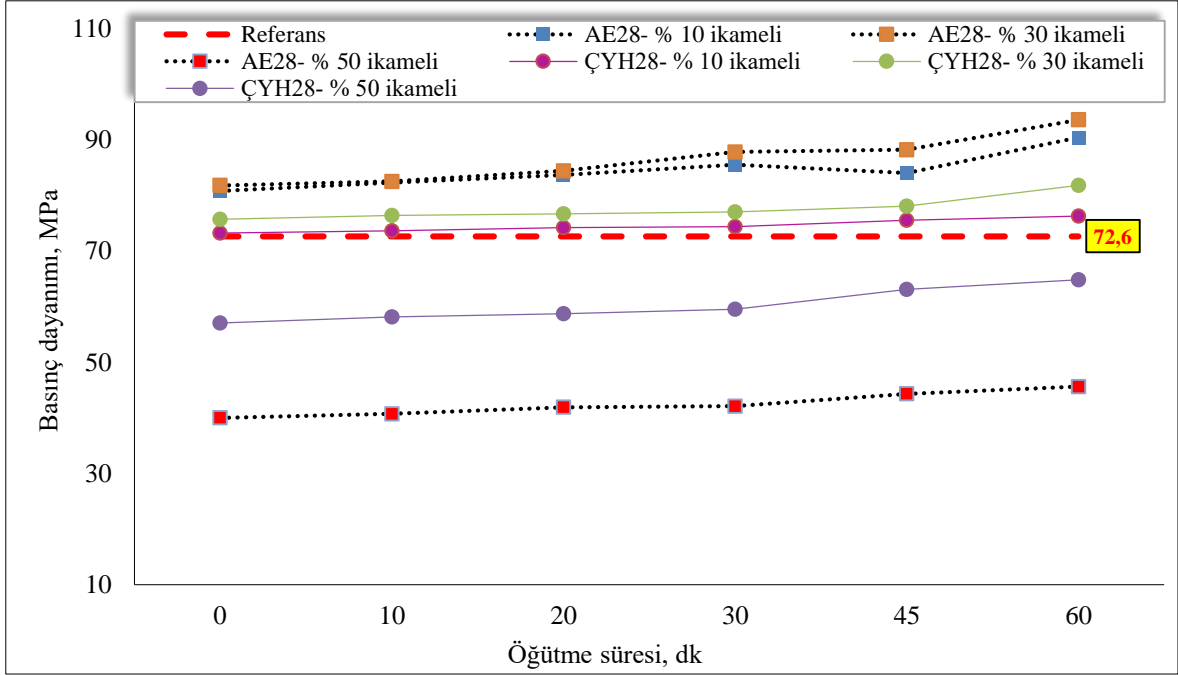
AE ve ÇYH uçucu külünün 28 günlük basınç dayanım değerlerinden % 10 ve % 30 uçucu kül ikame edilmesi ile hazırlanan karışımların öğütmeye bağlı incelik artışına göre 28 günlük basınç dayanım değerleri artmıştır. Her iki ikame oranlı karışımların basınç değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinden yüksek çıkmıştır. Çimento içerisinde % 50 AE ve ÇYH uçucu külü ikame edilmesi ile elde edilen karışımların basınç dayanım değerleri ise öğütme inceliğine göre artmış ancak referans numunesine ait basınç dayanım değerinden yine de düşük değerler almıştır. AE uçucu kül ikameli % 10 ve % 30 karışımların basınç dayanım değerleri ÇYH uçucu kül ikameli karışımların basınç dayanım

değerlerine göre yüksek ancak % 50 ikameli karışımlarda ise düşük çıkmıştır. Ayrıca AE uçucu kül % 10 ve % 30 ilaveli karışımların basınç dayanım değerleri bir birine çok yakın değerler aldığı görülmüştür. ÇYH uçucu külüne ait aynı ikame oranlı karışımların basınç dayanım değerleri arasındaki fark AE uçucu kül katkılı karışımların basınç dayanım değerlerinden daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



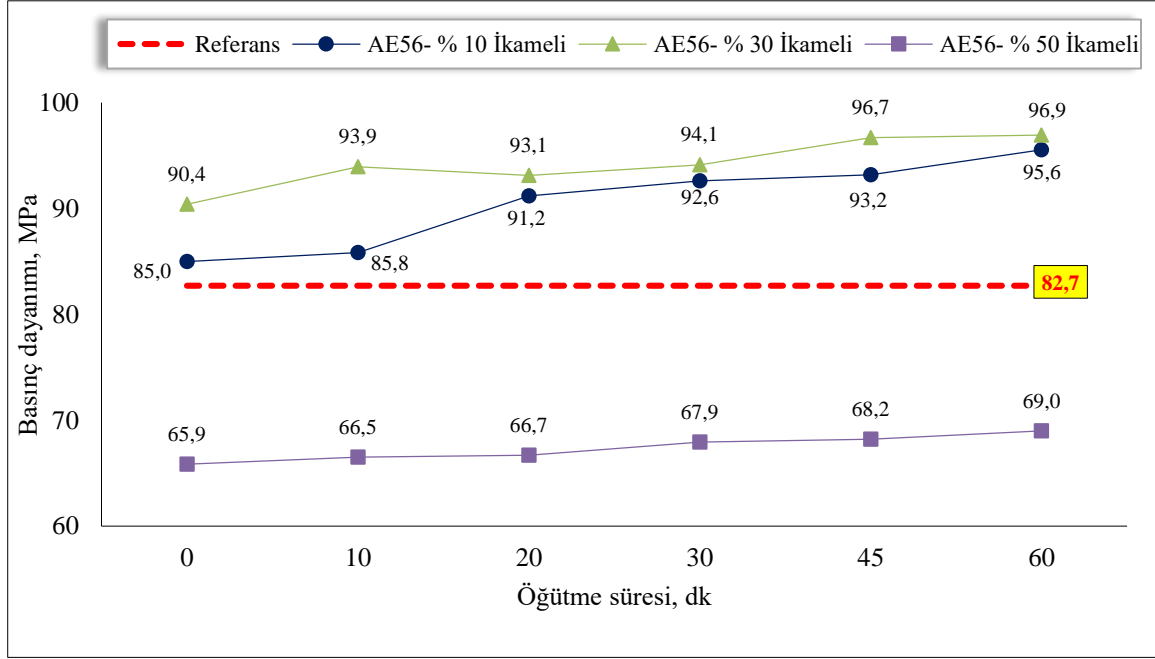
Şekil 3.41. ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 28 günlük basınç dayanım değerleri

AE ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 28 günlük basınç dayanım değerleri birbiri ve referans numunenin basınç dayanım değerine göre kıyaslanmış ve Şekil 3.42’de gösterilmiştir. Her iki uçucu kül katkılı karışımların 28 günlük basınç dayanım değerleri içerisinde en yüksek değerleri % 30 ikameli AE uçucu kül katkılı karışımlar almıştır. Bu sıralamayı yine aynı külün % 10 ikameli karışımları izlemiştir. Daha sonra ÇYH uçucu kül katkılı % 30 ikameli ve % 10 ikameli karışımlar takip etmiştir. Bu iki küle ait 28 günlük % 50 ikameli karışımların basınç dayanım değerlerinde ise ilk sıralamayı ÇYH uçucu kül katkılı karışımlar daha sonrasında AE uçucu kül katkılı karışımlar almıştır. Genel olarak her iki uçucu kül katkılı karışımların % 30 ve % 10 ikameli karışımların basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinden yüksek ancak % 50 ikameli karışımlarda ise referans numunenin basınç dayanım değerinden düşük değerler almıştır.

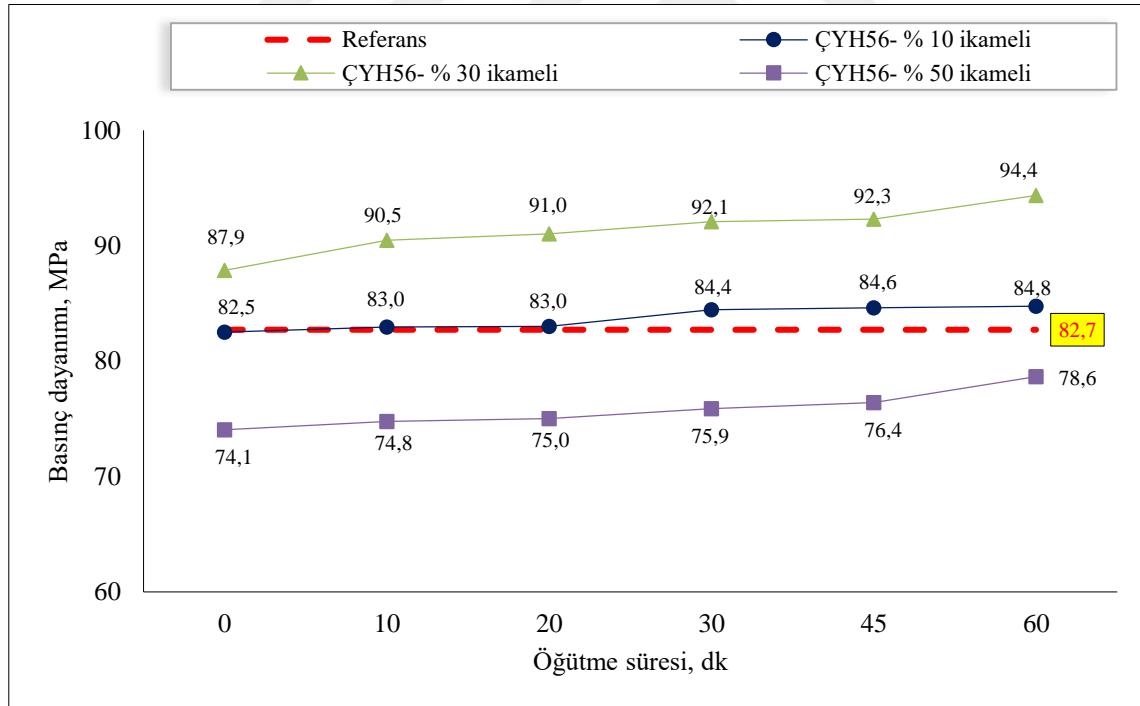


Şekil 3.42. AE ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 28 günlük basınç dayanım değerlerinin kıyaslanması

AE ve ÇYH uçucu kül ikameli karışımların uzun dönem basınç dayanımlarından bir diğeri ise 56 günlük kür süresini tamamlamış numunelerin tek eksenli basma dayanım cihazında kırılması sonucu elde edilmiştir. Bu değerler AE uçucu kül ikameli karışımlar için Şekil 3.43'de, ÇYH uçucu kül ikameli karışımlar için ise Şekil 3.44'de verilmiştir. AE uçucu kül ikameli karışımlarda öğütme süresine bağlı olarak 56 günlük basınç dayanım değerleri artmıştır. Basınç dayanım değerleri en yüksek % 30 ikameli sonrasında % 10 ikameli karışımlar olup bu karışımlara ait basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinden yüksek değerler almıştır. En düşük basınç dayanım değerleri ise % 50 ikameli karışımlara ait olup referans numunenin basınç dayanım değerinden düşük değerler aldığı belirlenmiştir. ÇYH uçucu kül ikameli karışımların 56 günlük basınç dayanım değerleri öğütme süresine bağlı olarak artmıştır. Bu uçucu küle ait basınç dayanım değerleri ise en yüksek değerlerden en düşük değerlere doğru % 30 ikameli, % 10 ikameli, referans numunesi ve % 50 ikameli karışımlar şeklinde bir sıralama göstermiştir.

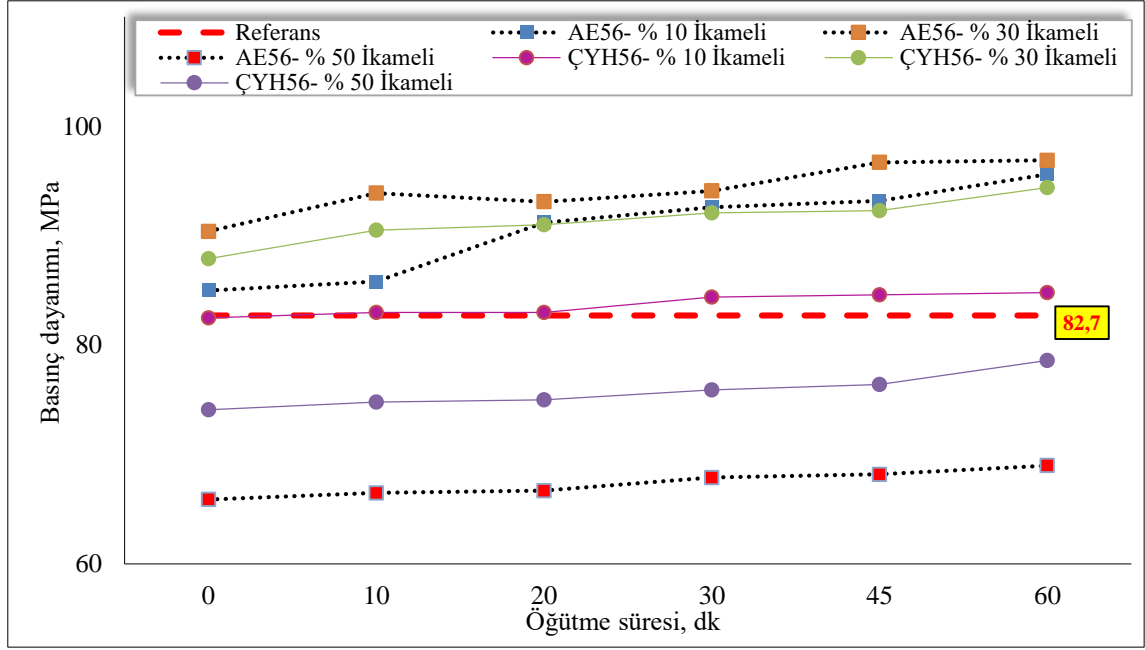


Şekil 3.43. AE uçucu kül katkıli karışımların 56 günlük basınç dayanım değerleri



Şekil 3.44. ÇYH uçucu kül katkıli karışımların 56 günlük basınç dayanım değerleri

Her iki uçucu külün çimentoya ikame edilmesi ile hazırlanan karışımların 56 günlük basınç dayanım değerleri birbiri ile kıyaslanmış ve Şekil 3.45’de verilmiştir.

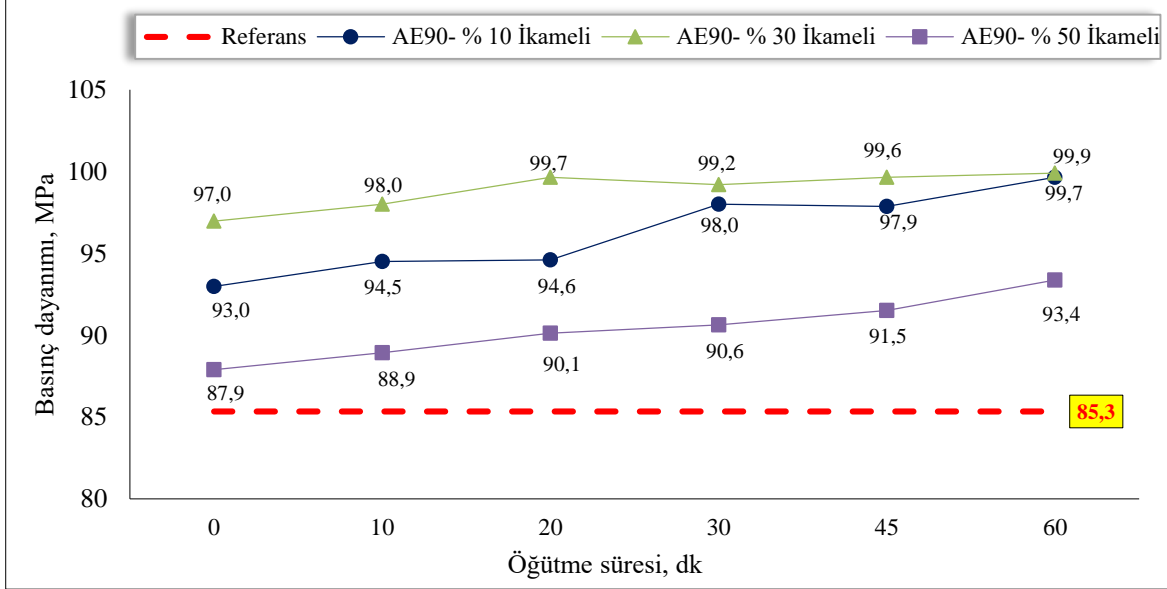


Şekil 3.45. AE ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 56 günlük basınç dayanım değerlerinin kıyaslanması

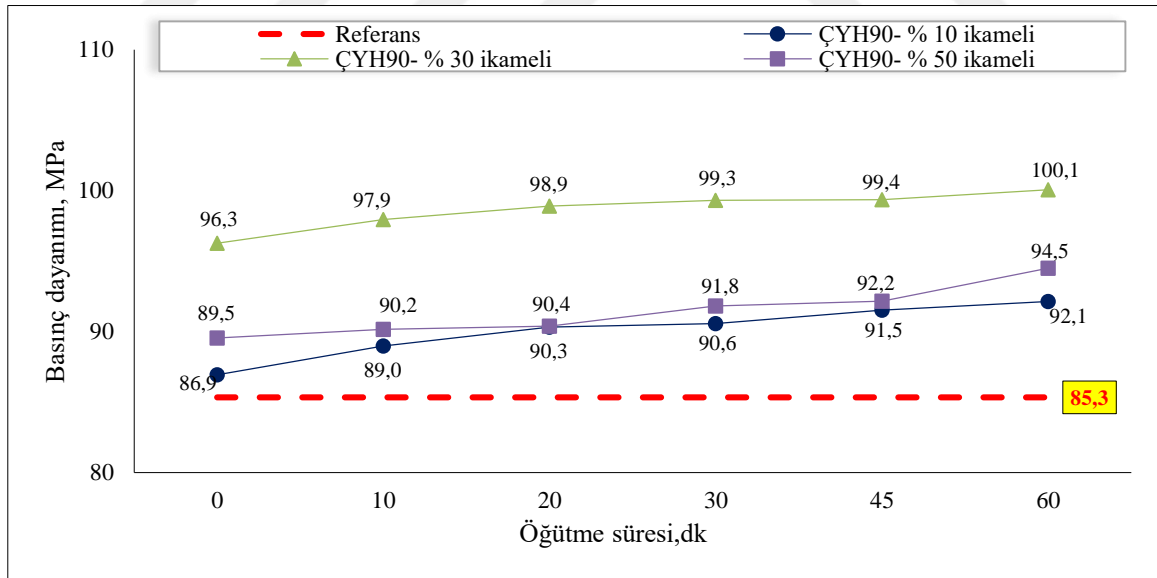
AE ve ÇYH uçucu kül ikameli karışımların 56 günlük basınç dayanım değerleri 28 günlük basınç dayanım değerleri gibi benzer davranış göstermişlerdir. Her iki uçucu külün % 10 ve % 30 ikameli karışımlarına ait basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinden yüksek değerler almıştır. % 50 ikameli karışımlarda ise ÇYH uçucu kül ikameli karışımlar AE kül ikameli karışımlara göre daha yüksek basınç dayanım değerlerine sahip olup her iki uçucu kül ikameli karışımlarında basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinin altında değerler aldığı belirlenmiştir. ÇYH uçucu külün % 30 ikameli karışımları AE uçucu külünün % 10 ikameli karışımlarına göre kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamada % 30 ÇYH uçucu kül katkılı karışımlar AE uçucu külünün orijinal durumu ve 10 dk öğütme süresine sahip karışımların basınç dayanım değerlerinden yüksek, 20-60 dk öğütme aralıklarına sahip uçucu kül katkılı karışımların basınç dayanım değerleri arasında ise çok fazla bir fark olmadığı görülmüştür. Ayrıca iki uçucu külün % 50 ikameli karışımlarının 56 günlük basınç dayanım değerleri arasındaki fark kür süresinin artmasına bağlı olarak giderek azaldığı belirlenmiştir.

Çimento içerisine AE ve ÇYH uçucu küllerinin ikame edilmesi ile hazırlanan farklı öğütme süresine sahip karışımların uzun dönem basınç dayanım değerlerinin en sonuncusu 90 günlük kür süresini tamamlamış numunelere ait basınç dayanım değerinden oluşmuştur.

Her iki uçucu külün 90 günlük kür süresine ait basınç dayanım değerleri Şekil 3.46 ve Şekil 3.47’de verilmiştir.



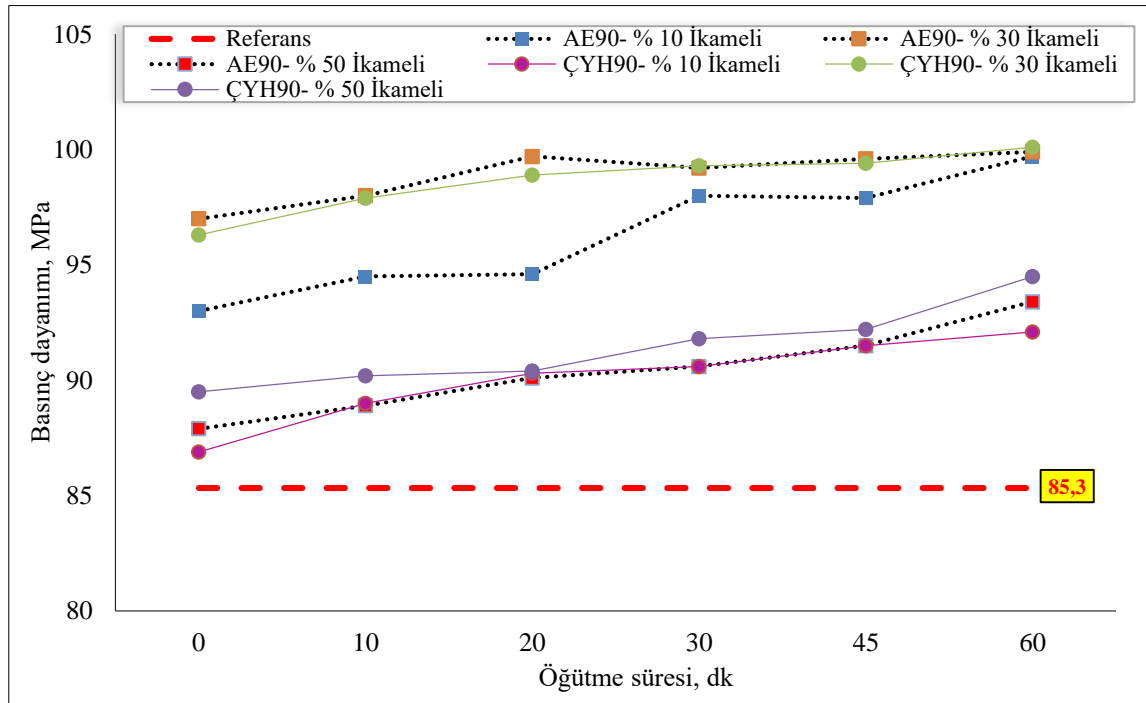
Şekil 3.46. AE uçucu kül katkılı karışımların 90 günlük basınç dayanım değerleri



Şekil 3.47. ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 90 günlük basınç dayanım değerleri

90 günlük kür süresi sonunda AE uçucu kül ikameli karışımlarda öğütme süresine göre basınç dayanım değerleri artmıştır. En yüksek basınç dayanım değerlerini % 30 ikameli karışımlardan elde edilmiştir. Sonrasında bu sıralama % 10 ve en son olarak % 50

ikameli karışımlar izlemiştir. Öğütme süresindeki artışa bağlı olarak % 10 ve % 30 ikameli karışımlara ait basınç dayanım değerleri arasındaki fark giderek azalmıştır. ÇYH uçucu kül ikameli karışımların 90 günlük basınç dayanım değerleri ise Şekil 3.48’de verildiği gibi öğütme süresine bağlı olarak tüm ikame oranları için arttığı belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanım değerleri % 30 ikameli karışımlarda görülmüştür. Daha sonra % 50 ikameli ve en son olarak % 10 ikameli karışımlar şeklinde bir sıralama oluşturmuştur. ÇYH uçucu külünün % 50 ikameli karışımları ile % 10 ikameli karışımlarına ait basınç dayanım değerleri birbirlerine çok yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Uçucu küllerin 90 günlük basınç dayanım değerlerinin bir biri ile kıyaslanması Şekil 3.48’de verilmiştir.



Şekil 3.48. AE ve ÇYH uçucu kül katkıli karışımların 90 günlük basınç dayanım değerlerinin kıyaslanması

Her iki külün çimento içerisinde % 10, % 30 ve % 50 ikame edilmesi ile hazırlanan karışımların 90 günlük basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinden yüksek olduğu görülmüştür. AE uçucu külüne ait 90 günlük basınç dayanım değerleri en yüksekten % 30, % 10 ve % 50 ikameli karışımlar şeklindeken ÇYH uçucu külüne ait 90 günlük basınç dayanım değerleri ise en yüksekten % 30, % 50 ve % 10 ikameli karışımlar şeklinde sıralanmıştır. 90 günlük basınç dayanım değerleri içerisinde

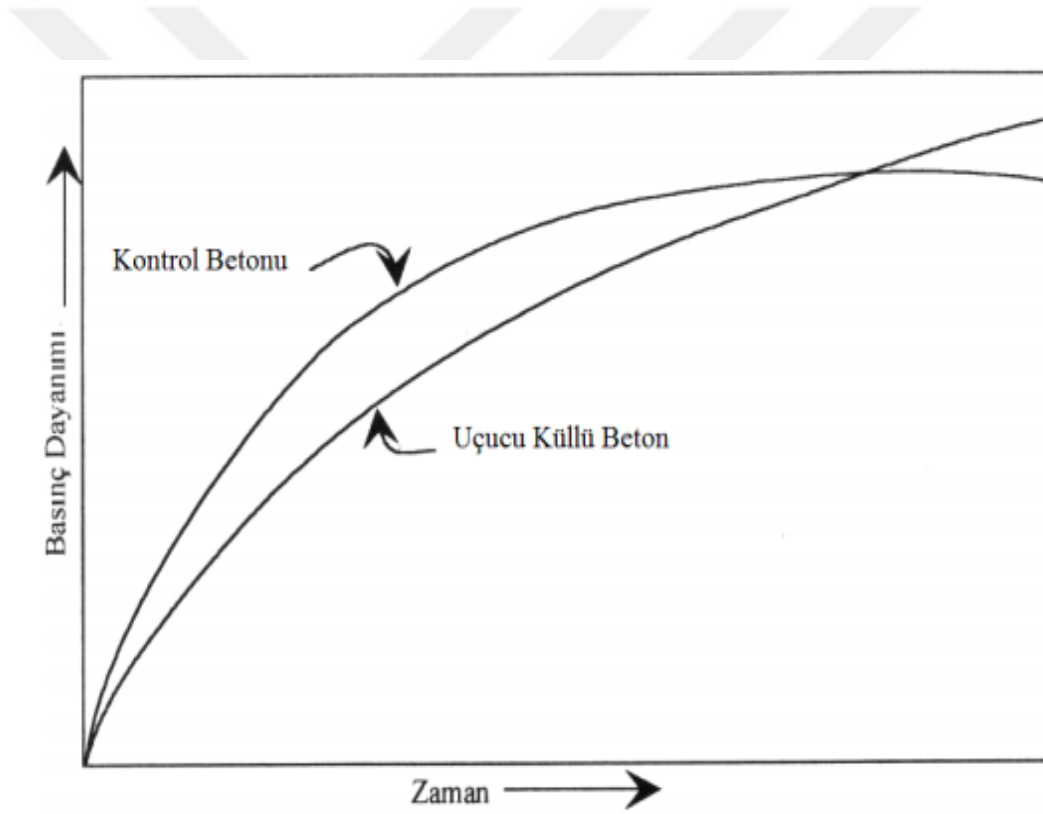
her iki uçucu kül ikameli karışımlar için en yüksek basınç dayanım değerleri % 30 ikame karışımlara ait olması ile en ideal uçucu kül ikame oranı % 30 olarak belirlenmiştir.

AE ve ÇYH uçucu külleri ile hazırlanan karışımların 2, 7, 28, 56 ve 90 günlük kür süresine ait farklı öğütme süreli ve ikame oranlı karışımların basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerine göre % olarak değişim miktarı Tablo 3.7 ve Tablo 3.8'de verilmiştir. AE uçucu külünün öğütme süresi ve ikame oranına göre 2 ve 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesinin basınç dayanım değerine göre en fazla artış miktarı % 10 uçucu kül ikameli karışımlarda görülmüştür. AE uçucu kül ikameli karışımların her iki kür süresi için dayanım değerlerinin referans numunenin dayanım değerine göre artış miktarları en fazla 60 dk öğütme süreli karışımlarda görülmüş olup bu değerler sırası ile % 10,3 ve % 31 olarak belirlenmiştir. ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 2 ve 7 günlük kür sürelerine ait basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerine göre artış miktarı en fazla % 10 ikameli ve 60 dk öğütme süreli karışımda elde edilmiştir. Elde edilen bu artış miktarları % 3 ve % 18,4 değerlerinde bulunmuştur. ÇYH uçucu külünün % 10 ikameli karışımlarda artış miktarları AE uçucu külüne göre daha düşük değerler aldığı görülmüştür. Uçucu kül ikamesinin % 30 ve % 50 miktarında arttırılması ile AE uçucu külüne ait 2 ve 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerine göre azaldığı belirlenmiştir. En fazla azalma değeri 2 günlük % 50 ikameli orijinal uçucu kül katkılı karışımlarda olup bu oran -% 58,5 olarak hesaplanmıştır. ÇYH uçucu külünde ise en fazla azalma 2 günlük % 50 ikameli 60 dk öğütme süresine ait olup -% 58,5 oranında belirlenmiştir.

Her iki uçucu külün 28 günlük basınç dayanım değerleri içerisinde referans numunesinin basınç dayanım değerine göre en fazla artış AE uçucu külü için % 30 ikameli karışımlarda görülmüştür. Aynı ikame oranına sahip ÇYH uçucu kül katkılı karışımların tüm öğütme süresi için elde edilen basınç dayanım değerleri AE uçucu kül ikameli karışımlara göre artış miktarları yaklaşık 3 kat daha az olduğu belirlenmiştir. Yine 56 günlük basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerine göre kıyaslandığında en fazla artış oranı % 30 ikameli AE uçucu kül karışımlarında görülmüştür. Her iki uçucu kül katkılı karışımların 90 günlük basınç dayanım değerlerini referans numunenin basınç dayanım değerine göre kıyaslandığında % 10 ikameli karışımlarda tüm öğütme süreleri için AE uçucu külünün ÇYH göre yaklaşık 2 kat fazla olduğu görülmüştür. Yine AE uçucu kül % 30 ikameli karışımlarda artış en fazla olduğu belirlenmiştir. Ancak iki kül arasında çok belirgin bir fark olmadığı anlaşılmıştır. 90

günlük basınç dayanım değerleri içerisinde her iki uçucu kül için % 50 ikameli karışımların basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinden yüksek olup sıralama ÇYH uçucu kül katkılı, AE uçucu kül katkılı ve referans numune olarak belirlenmiştir.

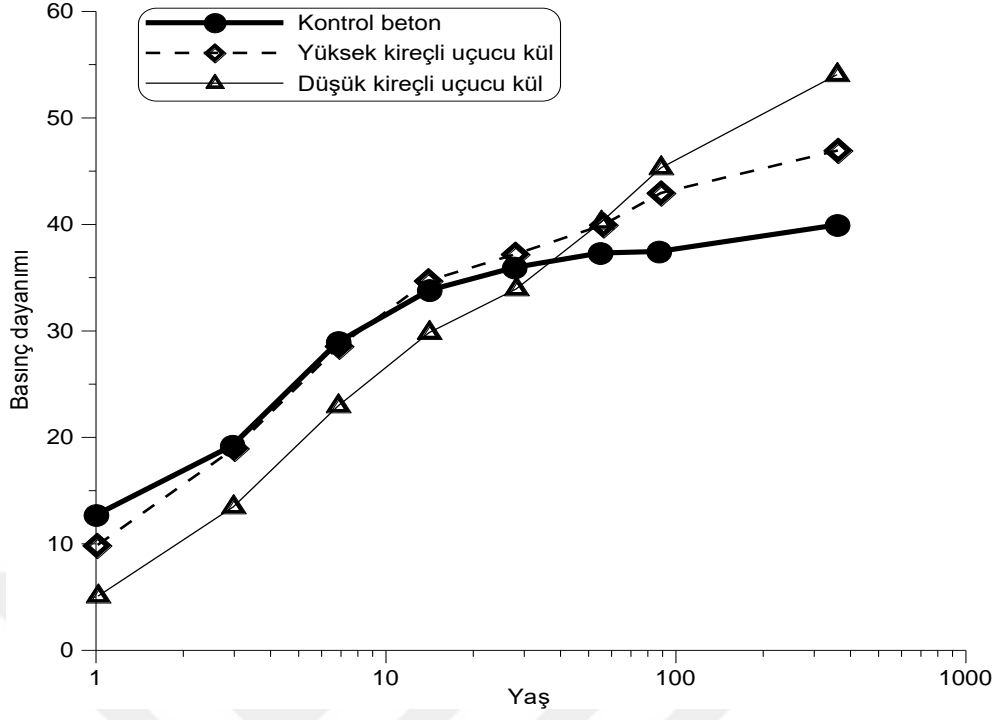
Basınç dayanım deneyi sonuçlarına göre uçucu küllerin puzolanik özelliklere sahip olması ve genel olarak bu özelliğin uzun dönemde oluşması sonucu üretilen numunelerin uzun dönem basınç dayanım değerlerinin artırıcı yönünde etki yarattığı görülmüştür. Bu tez çalışması için elde edilen basınç dayanım sonuçları literatürle benzerlik arz etmiş olup elde edilen basınç dayanım sonuçları Şekil 3.49'da verildiği gibi bir eğilim göstermiştir (Gürbüz, 2009).



Şekil 3.49. Uçucu küllerin basınç dayanımının zamana göre değişimi (Gürbüz, 2009).

AE ve ÇYH uçucu külünün çimento içerisinde % 30 ve % 50 ikame oranlarında kullanılması ile üretilen numunelerin erken yaşlarda (2 ve 7 günlük) basınç dayanım değerleri referansın basınç dayanım değerinden düşük (% 10 ikameli karışımların basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinden yüksek) çıkmıştır. Ancak ilerleyen yaşlarda % 10, % 30 ve % 50 ikame oranlarına ait basınç dayanım

değerleri (28, 56 ve 90 günlük) referans numunenin basınç dayanım değerine yakın ya da yüksek çıktığı görülmüştür. Her iki uçucu külün kısa dönem basınç dayanım değerleri (özellikle 2 günlük) öğütme süresi ve ikame oranına göre referans numunenin basınç dayanımına göre değişimi farklı olmuştur. Ancak her iki uçucu kül katkılı karışımların uzun dönem basınç dayanım değerleri öğütme süresi ve ikame oranına göre referans numunesinin basınç dayanımına göre değişimi benzer şekilde olmuştur. Kısa dönem ve uzun dönem basınç dayanım değerleri arasındaki değişim farklı uçucu küllerin kimyasal bileşiminden kaynaklıdır. AE uçucu külü gibi yüksek kireçli kül (C tipi uçucu kül) sınıfına ait olan uçucu küllerle hazırlanan karışımların erken yaşlarda basınç dayanım değerleri referansla aynı ya da yakın değerler aldığı belirlenmiştir. İlerleyen yaşlarda ise basınç dayanım değerleri en yüksekten en düşüğe doğru, düşük kireçli (F tipi uçucu kül) uçucu kül katkılı karışımlar, yüksek kireçli (C tipi uçucu kül) uçucu kül katkılı karışımlar ve referans (sadece çimento katkılı) olmak üzere bir değişim göstermektedir. Ayrıca AE külünün 28 ve 56 günlük % 30 ve % 10 ikameli karışımlarının basınç dayanım değerleri aynı ikame oranlarına sahip ÇYH uçucu kül katkılı karışımların basınç dayanım değerlerinden yüksek olması yine yüksek kireçli (C tipi uçucu kül) uçucu kül sınıfında olmasından ileri gelmiştir. Çünkü yüksek kireçli (C tipi uçucu kül) uçucu küller içerisindeki CaO miktarının fazla olmasına bağlı puzolanik aktiviteyi geliştirerek dayanımın gelişmesine büyük oranda katkı sağlamaktadır. Üstelik AE külünün tane boyutu ÇYH ve çimentoya göre iri tane boyutuna sahip olmasına rağmen yinede yüksek kireçli kül sınıfında olması basınç dayanımı üzerinde büyük etkiye sahip olmuştur. 90 günlük basınç dayanım değerlerinde ise ÇYH uçucu külünün daha ince tane boyutuna ve küresel tane yapısına bağlı olarak % 30 ikameli karışımları AE külüne göre daha yüksek değerler aldığı belirlenmiştir. Ayrıca uçucu küllerde incelik değeri F tipi uçucu küller için daha etkili bir parametre olduğunu ve incelik artışına bağlı olarak çimento ile reaksiyona girme hızına arttırarak basınç dayanım değerlerini arttırdığı yönünde bir değişim göstermiştir. AE ve ÇYH uçucu küllerine ait basınç dayanım değerleri onların kimyasal bileşimleri ve incelik değerleri ile doğrudan etkili olup bu tez çalışmasında bu etki belirgin olarak gözlemlenmiştir. Her iki uçucu kül katkılı karışımların kısa ve uzun dönem basınç dayanım değerleri değişimi Şekil 3.50'deki grafiğe göre literatürde ifade edildiği gibi benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.50. Uçucu kül tipinin basınç dayanımının gelişmesi üzerine etkisi (Gürbüz, 2009).

Tablo 3.7. AE uçucu külünün farklı öğütme süresi ve ikame oranlarında 2, 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanım değerlerinin referans numunenin basınç dayanım değerine göre % değişim miktarları

Kül çeşiti	Uçucu kül katkı oranı, %	Öğütme süresi, dk	Kür süreleri, Gün														
			2			7			28			56			90		
			Referans numuneye göre dayanım değerinin durum Dayanımı MPa, (↑ :Yüksek; ↓ : Düşük), Referansa göre değişim, %														
Basınç, MPa	Referansa göre değişim	Artış, %	Basınç, MPa	Referansa göre değişim	Artış, %	Basınç, MPa	Referansa göre değişim	Artış, %	Basınç, MPa	Referansa göre değişim	Artış, %	Basınç, MPa	Referansa göre değişim	Artış, %	Basınç, MPa	Referansa göre değişim	Artış, %
Afşin Elbistan (AE)	10	0	53,5	↑	3,1	63,8	↑	16,0	80,8	↑	11,3	85,0	↑	2,8	93,0	↑	9,0
		10	54,6	↑	5,2	64,2	↑	16,8	82,3	↑	13,4	85,8	↑	3,7	94,5	↑	10,8
		20	54,9	↑	5,7	65,1	↑	18,3	83,7	↑	15,3	91,2	↑	10,3	94,6	↑	10,9
		30	55,5	↑	6,8	71,3	↑	26,9	85,5	↑	17,8	92,6	↑	12,0	98,0	↑	14,9
		45	55,7	↑	7,3	71,6	↑	30,2	84,0	↑	15,7	93,2	↑	12,7	97,9	↑	14,8
		60	57,3	↑	10,3	72,1	↑	31,0	90,4	↑	24,5	95,6	↑	15,6	99,7	↑	16,9
	30	0	31,0	↓	-40,3	50,2	↓	-8,7	81,8	↑	12,7	90,4	↑	9,3	97,0	↑	13,7
		10	29,1	↓	-43,9	51,0	↓	-7,2	82,5	↑	13,6	93,9	↑	13,5	98,0	↑	14,9
		20	33,7	↓	-35,1	52,9	↓	-3,8	84,4	↑	16,3	93,1	↑	12,6	99,7	↑	16,9
		30	35,3	↓	-32,0	53,9	↓	-2,1	87,8	↑	20,9	94,1	↑	13,8	99,2	↑	16,3
		45	35,8	↓	-31,1	54,1	↓	-1,7	88,2	↑	21,5	96,7	↑	16,9	99,6	↑	16,8
		60	38,3	↓	-26,4	58,2	↑	5,9	93,6	↑	28,9	96,9	↑	17,2	99,9	↑	17,1
	50	0	21,6	↓	-58,5	28,0	↓	-49,1	40,0	↓	-44,9	65,9	↓	-20,3	87,9	↑	3,0
		10	21,7	↓	-58,2	27,9	↓	-49,3	40,7	↓	-43,9	66,5	↓	-19,6	88,9	↑	4,2
		20	24,1	↓	-53,7	28,9	↓	-47,4	41,9	↓	-42,3	66,7	↓	-19,3	90,1	↑	5,6
		30	23,8	↓	-54,2	29,0	↓	-47,2	42,1	↓	-42,0	67,9	↓	-17,9	90,6	↑	6,2
		45	24,3	↓	-53,2	32,1	↓	-41,7	44,3	↓	-39,0	68,2	↓	-17,5	91,5	↑	7,3
		60	25,4	↓	-51,1	37,0	↓	-32,8	45,6	↓	-37,2	69,0	↓	-16,6	93,4	↑	9,5
Referans Numune	Katkısız [0]	-	Dayanım, MPa														
		-	51.9			55			72.6			82.7			85.3		

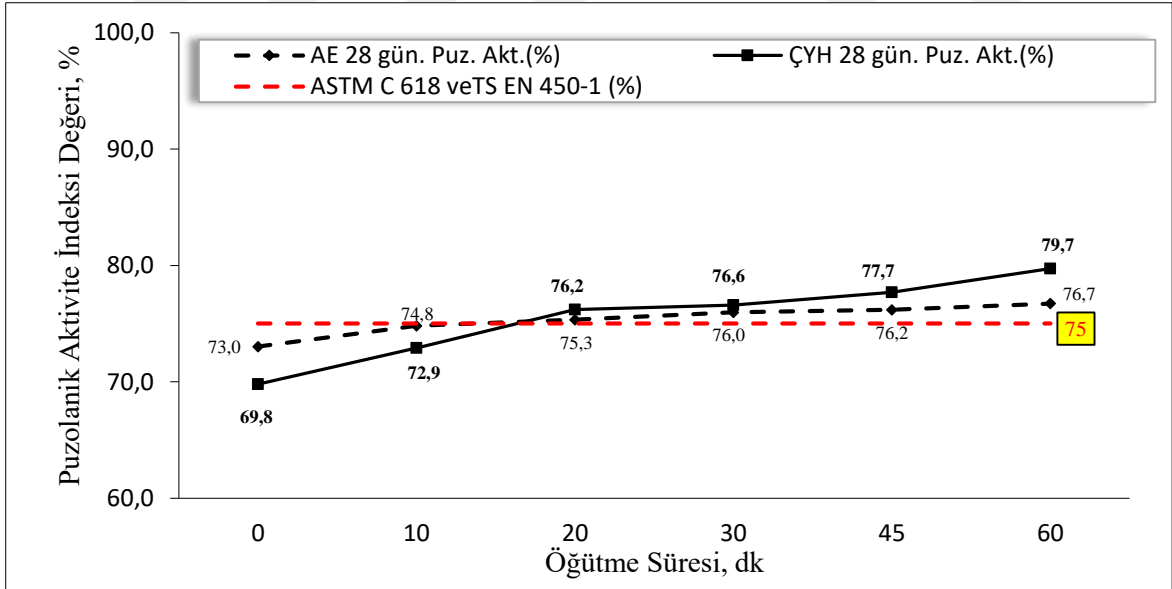
Tablo 3.8. ÇYH uçucu külünün farklı öğütme süresi ve ikame oranlarında 2, 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanım değerlerinin referans numunenin basınç dayanım değerine göre % değişim miktarları

Kül çeşiti	Uçucu kül katkı oranı, %	Öğütme süresi, dk	Kür süreleri, Gün														
			2			7			28			56			90		
			Referans numuneye göre dayanım değerinin durumu Dayanımı MPa, (↑ :Yüksek; ↓ : Düşük), Referansa göre değişim, %														
Basınç, MPa	Referansa göre değişim	Artış, %	Basınç, MPa	Referansa göre değişim	Artış, %	Basınç, MPa	Referansa göre değişim	Artış, %	Basınç, MPa	Referansa göre değişim	Artış, %	Basınç, MPa	Referansa göre değişim	Artış, %	Basınç, MPa	Referansa göre değişim	Artış, %
Çayırhan (ÇYH)	10	0	52,0	↑	0,1	61,8	↑	12,3	73,2	↑	0,8	82,5	↓	-0,2	86,9	↑	1,9
		10	52,6	↑	1,2	61,4	↑	11,6	73,6	↑	1,4	83,0	↑	0,4	89,0	↑	4,3
		20	52,8	↑	1,6	63,2	↑	14,9	74,2	↑	2,2	83,0	↑	0,4	90,3	↑	5,9
		30	53,3	↑	2,5	63,6	↑	15,6	74,4	↑	2,5	84,4	↑	2,1	90,6	↑	6,2
		45	53,3	↑	2,7	64,8	↑	17,8	75,5	↑	4,0	84,6	↑	2,3	91,5	↑	7,3
		60	53,5	↑	3,0	65,1	↑	18,4	76,3	↑	5,1	84,8	↑	2,5	92,1	↑	8,0
	30	0	44,5	↓	-14,3	48,3	↓	-12,2	75,7	↑	4,3	87,9	↑	6,3	96,3	↑	12,9
		10	43,1	↓	-17,1	49,0	↓	-10,9	76,4	↑	5,2	90,5	↑	9,4	97,9	↑	14,8
		20	39,0	↓	-24,9	50,9	↓	-7,5	76,7	↑	5,6	91,0	↑	10,0	98,9	↑	15,9
		30	39,4	↓	-24,2	52,5	↓	-4,6	77,1	↑	6,2	92,1	↑	11,4	99,3	↑	16,4
		45	38,7	↓	-25,4	52,1	↓	-5,3	78,1	↑	7,6	92,3	↑	11,6	99,4	↑	16,5
		60	38,5	↓	-25,9	53,0	↓	-3,7	81,8	↑	12,7	94,4	↑	14,1	100,1	↑	17,4
	50	0	17,8	↓	-65,8	28,5	↓	-48,2	57,0	↓	-21,5	74,1	↓	-10,4	86,9	↑	4,9
		10	17,6	↓	-66,1	28,7	↓	-47,8	58,1	↓	-20,0	74,8	↓	-9,6	89,0	↑	5,7
		20	14,4	↓	-72,2	28,6	↓	-48,0	58,7	↓	-19,1	75,0	↓	-9,3	90,3	↑	6,0
		30	14,3	↓	-72,5	29,3	↓	-46,8	59,5	↓	-18,0	75,9	↓	-8,2	90,6	↑	7,6
		45	13,7	↓	-73,6	29,2	↓	-46,9	63,1	↓	-13,1	76,4	↓	-7,6	91,5	↑	8,1
		60	12,8	↓	-75,4	32,1	↓	-41,6	64,8	↓	-10,7	78,6	↓	-5,0	92,0	↑	10,8
Referans Numune	Katkısız	-	Dayanım, MPa														
		-	51.9			55			72.6			82.7			85.3		

3.2.1.5. Uçucu Kül İnceliğinin Puzolanik Aktivite İndeksi Üzerine Etkisi

AE ve ÇYH küllerinin orijinal durumları ve farklı öğütme (10, 20, 30, 45 ve 60 dk) sürelerine sahip malzemelerden % 25 ve referans çimentodan da % 75 kullanılmak şartı ile 4x4x16 cm boyutunda kiriş numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin dayanım değerlerinin sadece referans numunenin basınç dayanım değerine oranının yüzdesel olarak ifade edilmesi ile her iki uçucu külün değişik öğütme sürelerine ait 28 ve 90 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçları Şekil 3.51 ve Şekil 3.52’de verilmiştir.

Uçucu küllerin 28 günlük puzolanik aktivite indeks değerleri öğütmeye bağlı olarak artmıştır. Orijinal durumda ve 10 dk öğütme süresinde AE külünün puzolanik aktivite değerleri ÇYH göre yüksek ancak 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme sürelerinde ise ÇYH uçucu külünün puzolanik aktivite değerleri AE külünden daha yüksek değerler aldığı görülmüştür. Ayrıca her iki kül içinde öğütme süresine bağlı olarak 28 günlük puzolanik aktivite değerlerinin 20 dk öğütme süresinden sonra birbirine yakın değerler aldığı tespit edilmiştir.

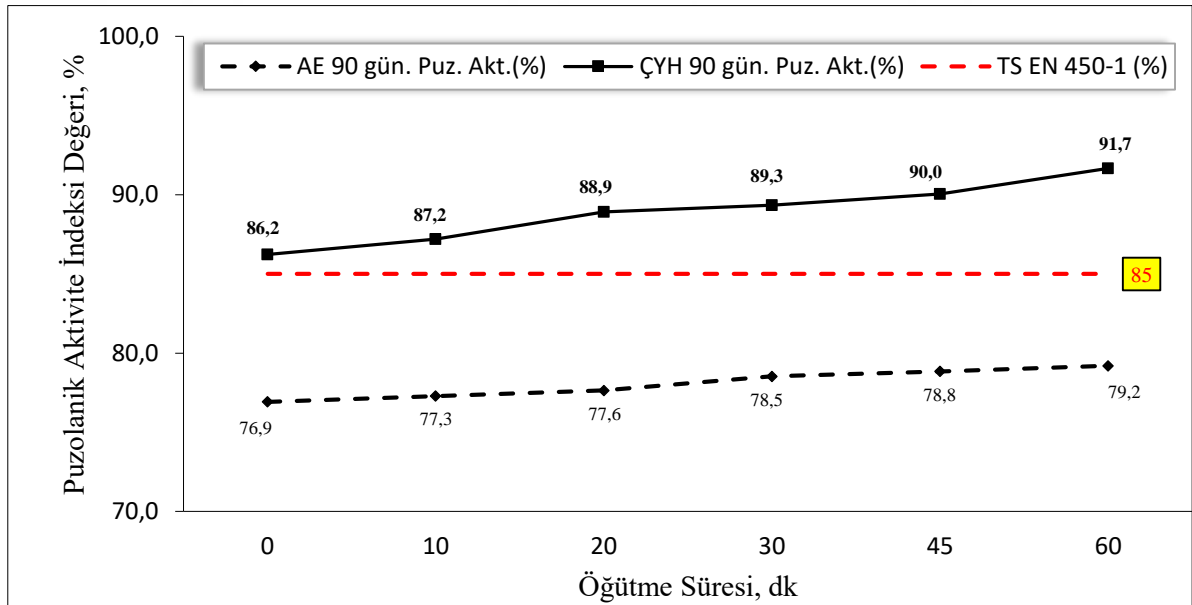


Şekil 3.51. AE ve ÇYH uçucu küllerinin 28 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri

AE uçucu külünün değişik öğütme sürelerine ait 28 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri TS EN 450-1 ve ASTM C 618 standartlarına göre karşılaştırılmıştır. Belirtilen standartlarda ifade edilen sınır değer \geq % 75 ve üzeri olarak kabul edilmiştir. Orijinal

durumda uçucu kül ve 10 dk öğütme süresi haricinde 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme süresi için elde edilen puzolanik aktivite indeksi değerleri standartlarda ifade edilen sınır değer üzerinde değerler almıştır. 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme sürelerine ait tane boyutları puzolanik aktivite göstermesi için yeterli incelikte olduğu görülmüştür.

90 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri her iki uçucu külün öğütme süresine göre arttığı belirlenmiştir. 90 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri kıyaslandığında ÇYH uçucu külünün değişik öğütme sürelerine ait puzolanik aktivite indeksi değerleri AE uçucu külünün değişik öğütme sürelerine ait puzolanik aktivite indeksi değerlerinden yüksek olduğu belirlenmiştir.

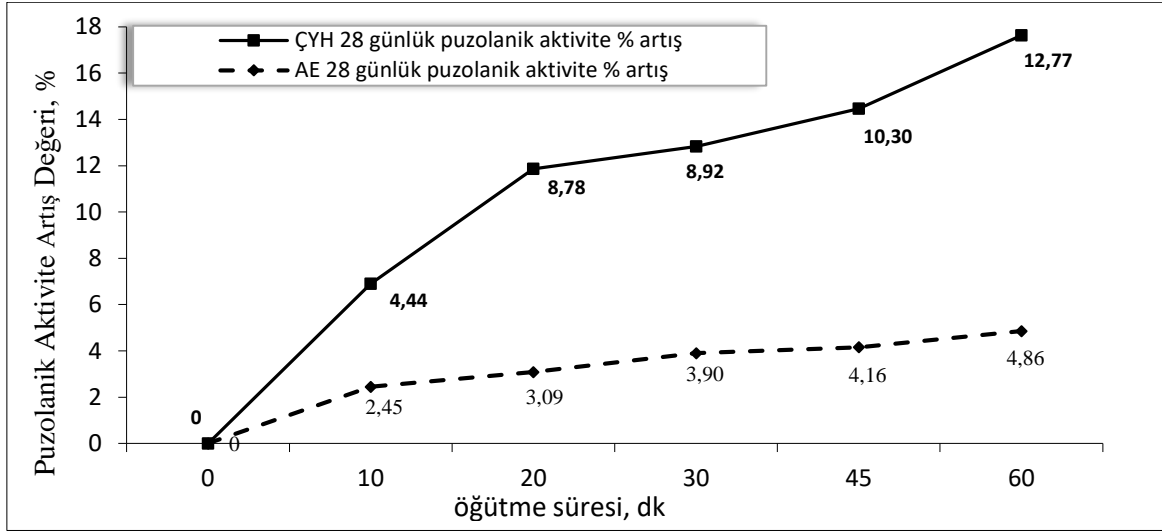


Şekil 3.52. AE ve ÇYH uçucu küllerinin 90 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri

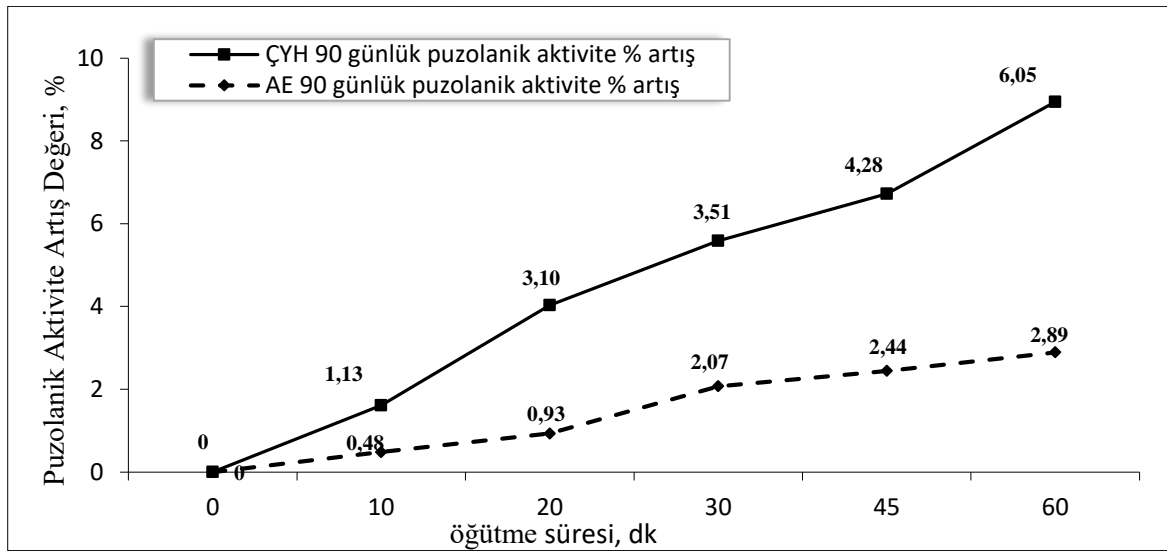
90 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri TS EN 450-1 standardına göre ifade edilen sınır değer \geq % 85 ve üzerinde olması gereklidir. Her iki uçucu külün farklı öğütme sürelerine ait 90 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri standartta ifade edilen sınır değere göre karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ÇYH uçucu külünün orijinal durumda ve tüm öğütme sürelerine ait puzolanik aktivite indeksi değeri standartta ifade edilen sınır değerden yüksek değerlerde, AE uçucu külü için ise düşük değerlerde olduğu belirlenmiştir.

İki farklı uçucu külün orijinal durumlarına göre öğütme süresi arttıkça 28 ve 90 günlük puzolanik aktive değerlerinin değişimi % olarak belirlenmiştir. AE ve ÇYH uçucu

küllerinin 28 günlük puzolanik aktivite indeksi değerlerinin öğütme süresine göre değişimi Şekil 3.53'de, 90 günlük puzolanik aktivite indeksi değişimleri ise Şekil 3.54'de verilmiştir.



Şekil 3.53. AE ve ÇYH uçucu küllerinin orijinal durumlarının öğütme süresine göre 28 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri değişimleri



Şekil 3.54. AE ve ÇYH uçucu küllerinin orijinal durumlarının öğütme süresine göre 90 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri değişimleri

Uçucu küllerin puzolanik aktivitesi uçucu külün kimyasal bileşimi, tanenin inceliği ve numunenin kür süresi tarafından değişmektedir. Puzolanik aktivite, çimento ve suyun

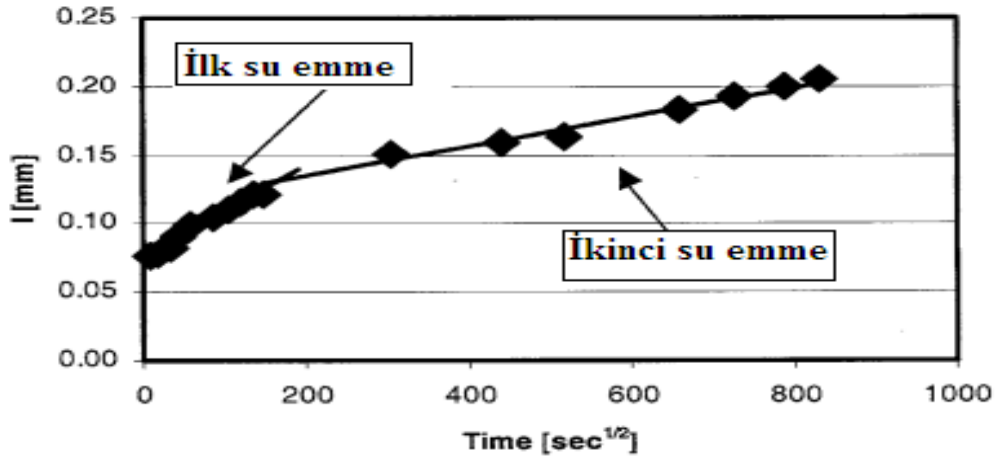
reaksiyona girmesi sonucu bağlayıcılık özelliği gösteren CSH ve serbest kireç (CH) açığa çıkması sonucu oluşmaktadır. Daha sonra CH ile puzolanın bileşiminden reaksiyona katılan silika (S) ve su reaksiyona tekrar girmesi ile bağlayıcılığı arttıran fazladan CSH oluşmasına neden olmaktadır. Ancak bu reaksiyonda serbest kireç oluşumu için beklenmesi ve reaksiyonun yavaş olmasından kaynaklı puzolan ikamesi ile dayanım kazanımı yavaş ve uzun zaman almaktadır. Bu yüzden uçucu küllerin 90 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri 28 günlük puzolanik aktivite indeksi değerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Uçucu külün inceliğinin puzolanik aktivite üzerine ise iki etkisi vardır. Bunlardan biri inceliğine bağlı olarak yüzey alanının arttırması ve sonuçta yüzey alanının artışına bağlı olarak reaksiyonu hızlandırmaya katkı sağlamaktadır. Çünkü puzolanik aktivite ilk olarak tanenin yüzeyinde başlamaktadır. İnceliğin puzolanik aktivite üzerinde bir diğer etkisi ise ince taneli uçucu küller karışım içerisinde boşlukların daha iyi doldurulması sonucu puzolanik aktiviteyi arttırmaya katkı sağlamaktadır (Gürbüz, 2009). Bu yüzden ÇYH uçucu külüne ait farklı öğütme süreli numunelerin puzolanik aktivite indeksi değerleri AE uçucu külüne ait puzolanik aktivite indeksi değerlerinden yüksek çıkması öğütmeye bağlı olarak daha ince tane boyutuna sahip olmasından ileri gelmiştir. Hatta puzolanik aktivite en çok külün incelik değişiminden etkilendiğini kimyasal bileşiminden etkisinin daha az olduğu elde edilen 28 günlük puzolanik aktivite indekleri değerlerinde daha net görülmüştür (Yazıcı ve Arel, 2012). Ayrıca AE uçucu külün 28 ve 90 puzolanik aktivite indeksi değerlerinin standartta ifade edilen sınır değerden düşük olması tane inceliği ile ilişkilidir. Çünkü uçucu külün tane boyutu çimentonun tane boyutundan büyük olması ile karışımda boşlukları doldurma etkisinin azalmasına ve sonuçta puzolanik aktivite indeksi değerlerini düşürmeye neden olmaktadır (Tangpagasit vd., 2005; Sounthararajan ve Sivakumar, 2012).

3.2.1.6. Karışım Numunelerinin Mikro Yapısı

3.2.1.6.1. Numunelerin Kılcal (Kapiler) Kanallar Yolu ile Su Emme Üzerine Etkisi

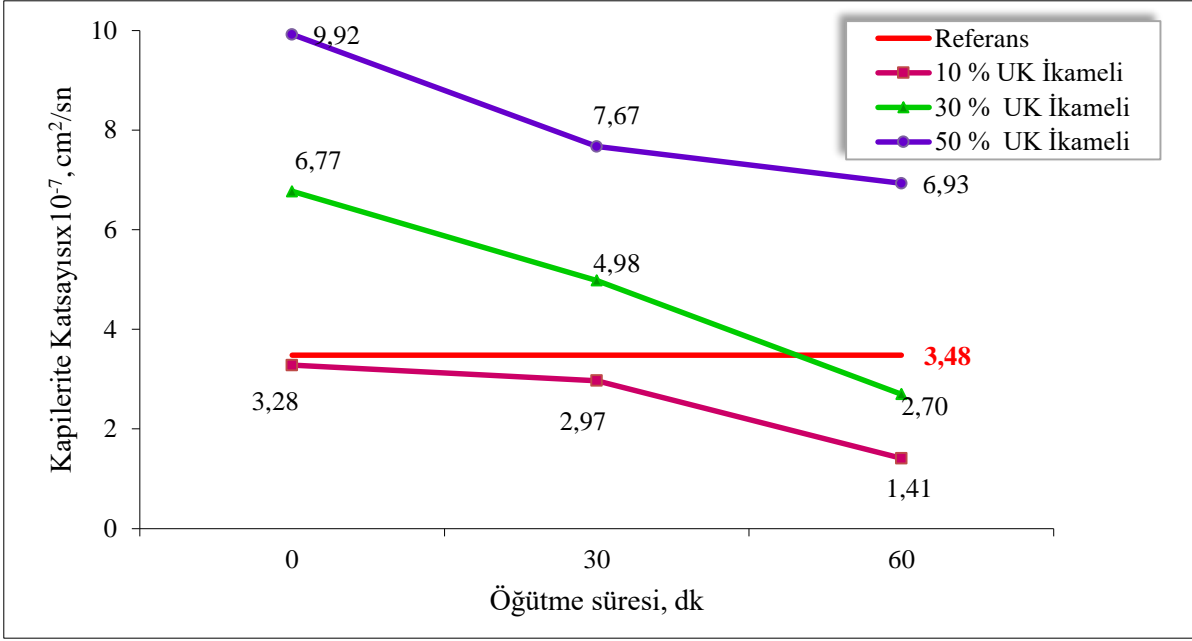
AE ve ÇYH uçucu küllerinin orijinal haldeki, 30 ve 60 dk öğütme sürelerinin her biri için çimento yerine % 10, % 30 ve % 50 ikame edilmesi ile hazırlanan numunelerin 28, 56 ve 90 günlük kür süresi sonrasında kılcal kanallar vasıtası ile emmiş oldukları su miktarları belirlenmiştir. Numunelerin kapilar yollar ile emdiği su miktarları, numunenin yüzey alanı

ve geçen süre ile ilişkili olup hesaplamalar sonucu her bir uçucu külün farklı öğütme süreleri, ikame oranları ve kür sürelerine ait kapilarite katsayı değerleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler ASTM C 1585 -04 (2007) standardında Şekil 3.55’de verilen grafiğe göre numunelerin ilk ve ikinci su emme değerleri şekilsel olarak gösterilmiştir (Ek Şekiller).

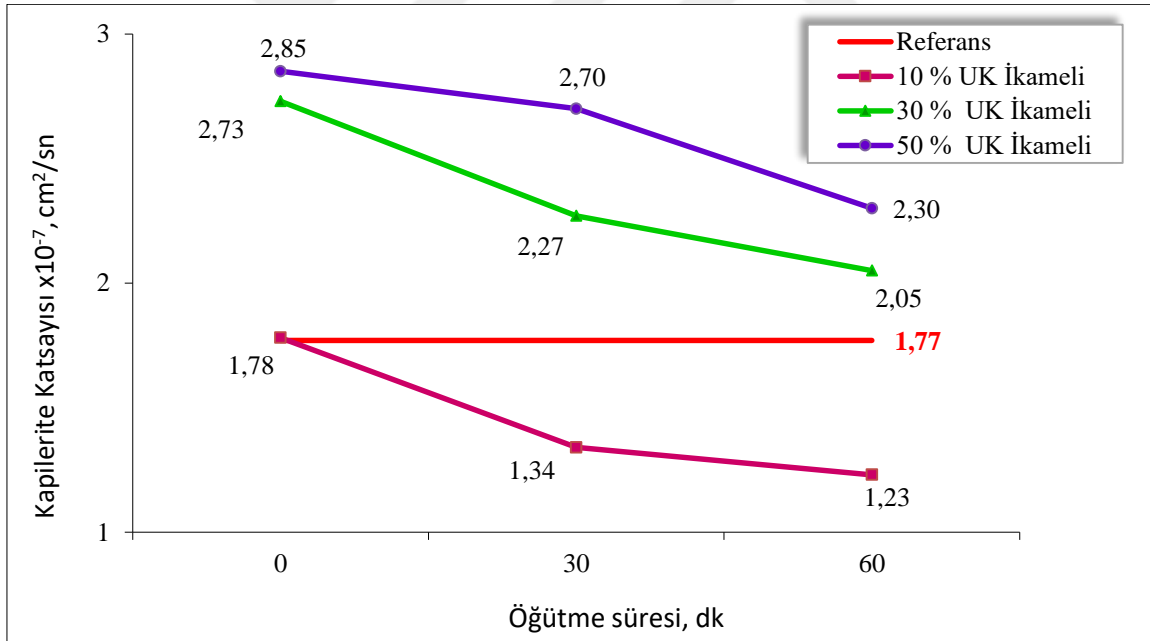


Şekil 3.55. Kılcal kanallar yolu ile numunelerin ilk ve sonraki zamanlarda su emme değerlerinin gösterilmesi (ASTM C 1585 -04, 2007).

AE ve ÇYH uçucu küller ile hazırlanan numunelerin geçirimsizlik üzerine etkisi yapılan kapilarite deneyi ile elde edilen kapilarite katsayılarına göre kıyaslanmıştır. AE uçucu kül ikameli numunelerin 28, 56 ve 90 günlük kür süresi sonrasında kapilarite katsayılarına ait değerler Şekil 3.56, Şekil 3.57 ve Şekil 3.58’de verilmiştir. Elde edilen kapilarite katsayı değerlerine göre numunelerin geçirimsizlik özellikleri değerlendirilmiştir. Geçirimsizlik özelliği kapilarite katsayısına göre kıyaslandığında kapilarite katsayı değeri arttıkça geçirimsizlik özelliği artmakta, kapilarite katsayı değeri azaldıkça geçirimsizlik özelliği azalmaktadır.



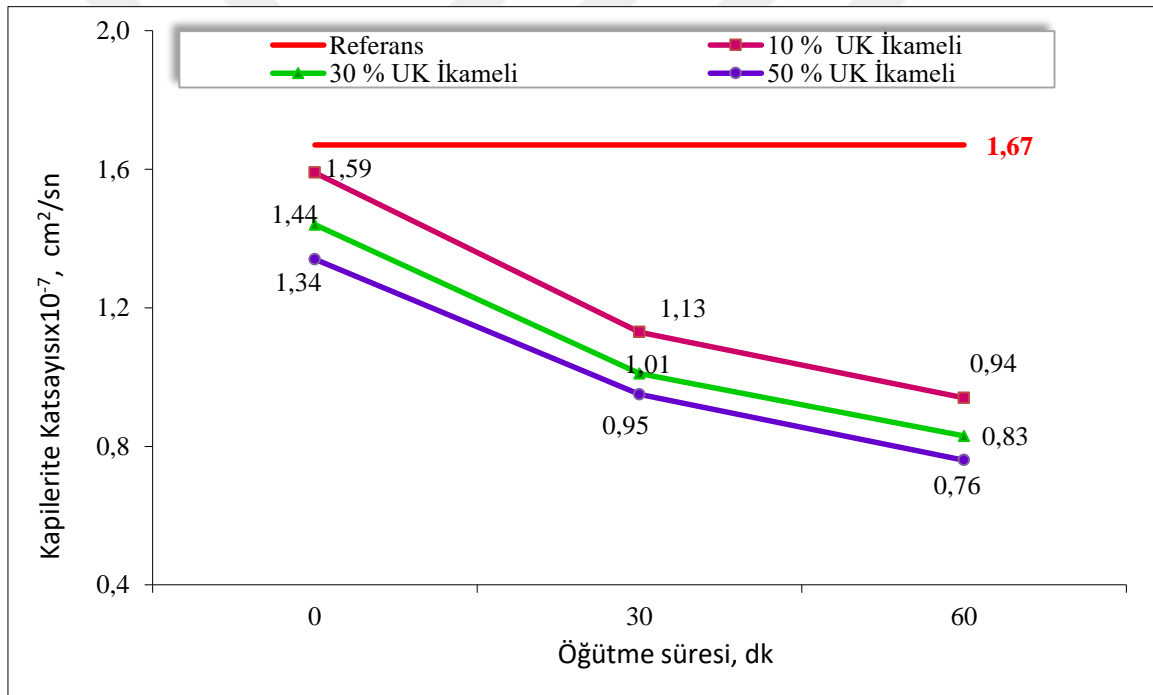
Şekil 3.56. AE uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük kapilarite katsayı değerleri



Şekil 3.57. AE uçucu kül katkılı numunelerin 56 günlük kapilarite katsayı değerleri

AE uçucu külünün kullanımı ile hazırlanan karışım numunelerinin 28 ve 56 günlük kür süresi sonunda öğütme ile tane inceliğinin artmasına bağlı olarak kapilarite katsayı değerleri azalmakta, çimento içerisinde ikame edilen uçucu kül miktarındaki artışa göre ise artmıştır. 28 ve 56 günlük kür süresine ait numuneler için en düşük kapilarite katsayı

değerleri % 10 ikameli karışımlardan elde edilmiştir. Her iki kür süresi için % 10 ikameli karışımların kapilarite katsayı değerleri referans numunenin (sadece su ve çimento karışımı) kapilarite katsayı değerinden düşük çıkmıştır. % 30 ikameli karışımların 28 günlük 60 dk öğütme süresine sahip karışım hariç aynı kür süresine ait diğer % 30 ikameli karışımlar ile aynı ikame oranlı 56 günlük karışımların kapilarite katsayı değerleri referans numunenin kapilarite katsayı değerinden yüksek değerler almıştır. Her iki kür süresine ait kapilarite katsayı değerleri en yüksek % 50 ikameli karışımlarda görülmüştür. Kapilarite katsayı değerlerine göre 28 ve 56 günlük kür süresi için geçirimsizliği özelliği en fazla olan karışımlar % 50 ikameli daha sonra % 30 ikameli ve en son olarak % 10 ikameli karışımlar izlemiştir.



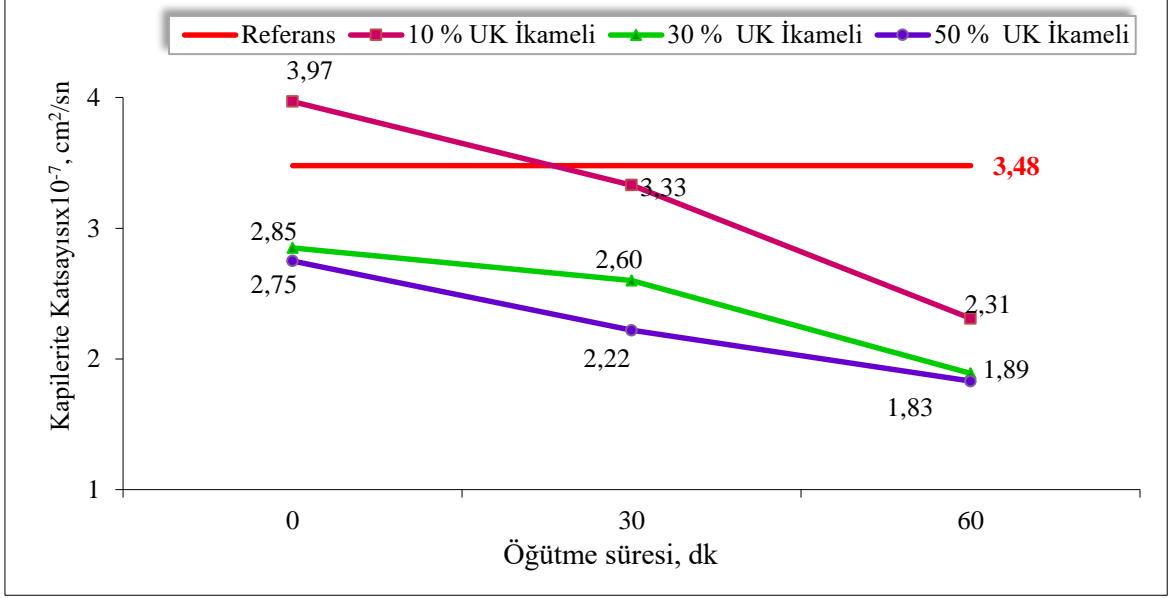
Şekil 3.58. AE uçucu kül katkılı numunelerin 90 günlük kapilarite katsayı değerleri

AE uçucu kül ikameli karışımların 90 günlük kür süresi sonunda kapilarite katsayı değerleri uçucu külün inceliğinin ve çimento içerisinde ikame edilen uçucu kül miktarındaki artışa göre azalmıştır. Kapilarite katsayı değerleri en yüksekten en düşük değerlere doğru % 10 ikameli, % 30 ikameli ve % 50 ikameli karışımlar şeklinde sıralama göstermiştir. Bu sıralamaya göre en az geçirimsizlik özelliğine sahip % 50 ikameli karışımlar almışken en yüksek geçirimsizlik özelliği % 10 ikameli karışımlar göstermiştir

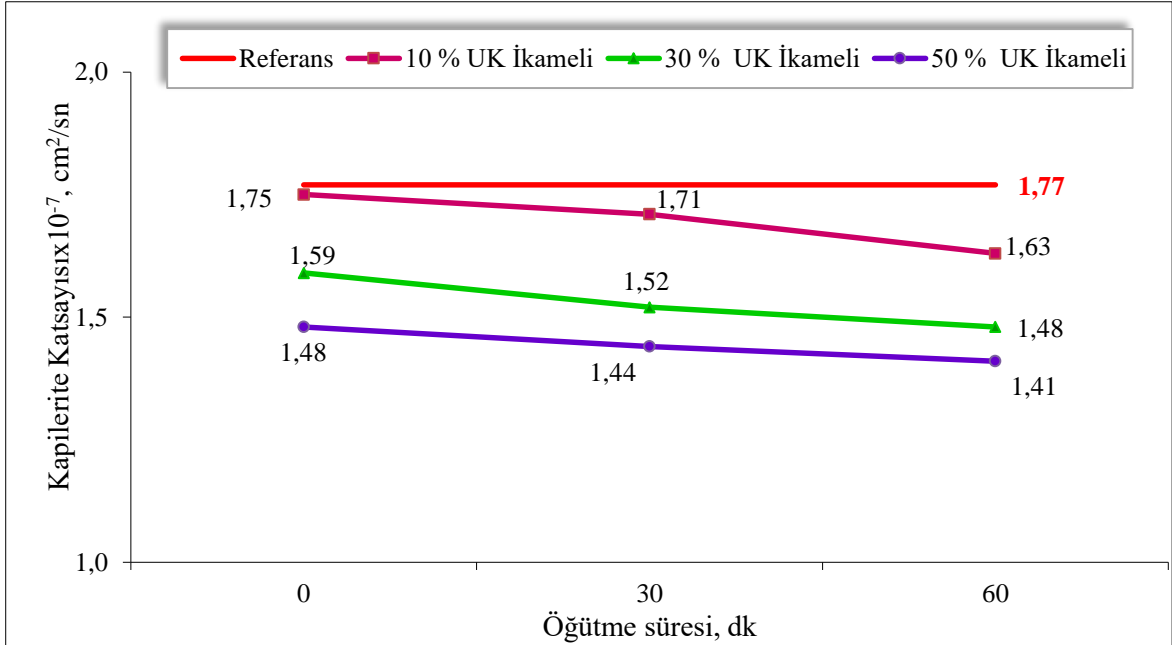
AE uçucu kül ikameli karışımların kür süresi ve malzeme inceliğine göre 28 ve 56 günlük numuneler için kapilarite katsayılarında azalma olduğu ancak ikame oranı artışına göre arttığı belirlenmiştir. 90 günlük kür süresi sonunda ise ikame oranına göre azaldığı görülmüştür. 28 ve 56 günlük kür süresi sonunda ikame oranına göre kapilarite katsayı değerlerinin artması uçucu külün içerisinde yanmamış karbon tanelerinin olmasına, tanelerin düzensiz yapıda ve çimentoya göre iri tane boyutuna sahip olmasından kaynaklanmıştır. Uçucu kül katkılı numunelerin geçirimsizlik özelliği üzerine uçucu külün tane inceliği, tane şekli, puzolanik özelliği ve kür süresi etkili olmaktadır. AE uçucu kül katkılı karışımların 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine ait farklı kapilarite katsayı değerlerine göre değişik geçirimsizlik özelliği göstermesinde yukarıda ifade edilen faktörlerin etkisi belirgin olarak görülmüştür. Kür süresine bağlı olarak uçucu kül katkılı karışımların geçirimsizlik özelliğinin düşük olması, çimento hidrasyonunun artması sonucu geçirimsizlik ve boşluk miktarını azaltmasından ileri gelmiştir. Uçucu küllerin inceliğinin artmasına bağlı olarak geçirimsizliğinin azalması AE uçucu kül katkılı karışımların tüm kür süresi ve ikame oranlarında görülmüştür. Bunun sebebi ise ince parçacıklar boşlukları daha iyi doldurması sonucu geçirimsizliği düşürmektedir. Ayrıca ince tane yapısına sahip uçucu küllerin inceliğe bağlı olarak puzolanik aktiviteyi arttırması sonucu ince taneler boşlukları doldurarak geçirimsizlik ve boşluk miktarını azaltmaktadır. Puzolanik aktivite sonucu oluşan fazladan hidrasyon ürünleri boşlukları doldurmaya ve sıkı bir malzeme oluşturmaya katkı sağlamaktadır (Singh vd., 2018). Bazen uçucu kül katkılı karışımların boşluk hacmi yüksek olsada iyi kür edilmesi ile geçirimsizlik özelliğinin daha düşük olmasına neden olmaktadır. Bu durum kılcal boşluklardaki hidrasyon sonucu oluşmuş ürünlerin doldurmasından kaynaklanmıştır (Yörük, 2001). AE uçucu kül katkılı karışımlarda 28 ve 56 günlük kür süresi sonunda uçucu kül ikame oranı artışına bağlı olarak geçirimsizliğin artması düzensiz tane yapısına sahip olmasına bağlıdır. Düzensiz tane yapısına sahip uçucu küller küresel tane yapısına sahip uçucu küllere kıyasla boşlukları daha iyi dolduramadığından geçirimsizliği arttırmaya neden olmaktadır (Sinsiri vd., 2010).

ÇYH uçucu kül ikameli numunelerin 28, 56 ve 90 günlük kür süresi sonrasında kapilarite katsayı değerleri Şekil 3.59, Şekil 3.60 ve Şekil 3.61'de gösterilmiştir. ÇYH uçucu külünün inceliği, ikame oranı ve kür süresinin artmasına bağlı olarak geçirimsizlik özelliğini düşürmüştür. 28 günlük % 10 ikameli orijinal uçucu kül katkılı karışım haricinde aynı kür süresine ait % 10, % 30 ve % 50 ikameli karışımların kapilarite katsayı değerleri referans numunenin kapilarite katsayı değerinden düşük çıkmıştır. 56 ve 90 günlük kür

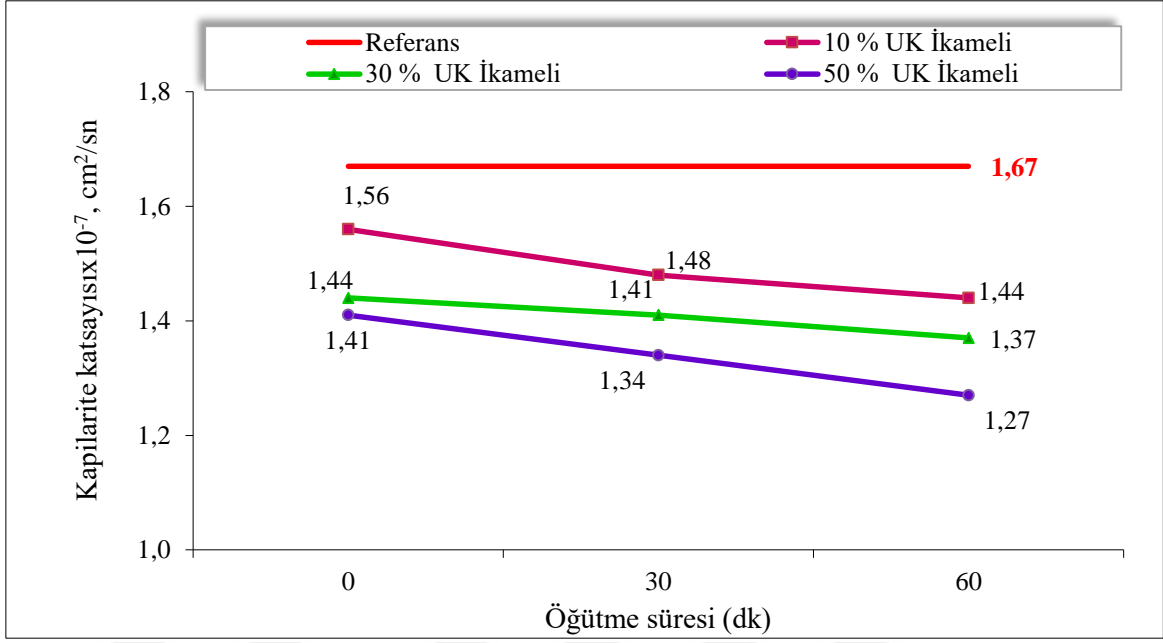
sürelerinde de % 10, % 30 ve % 50 ikameli karışımların tüm öğütme sürelerine ait kapilarite katsayı değerleri referans numunenin kapilarite katsayı değerlerinden düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 3.59. ÇYH uçucu kül katkılı numunelerin 28 günlük kapilarite katsayı değerleri



Şekil 3.60. ÇYH uçucu kül katkılı numunelerin 56 günlük kapilarite katsayı değerleri



Şekil 3.61. ÇYH uçucu kül katkılı numunelerin 90 günlük kapilarite katsayı değerleri

ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 28, 56 ve 90 günlük kapilarite katsayı değerleri referans numunenin kapilarite katsayı değerinden düşük olması çimentoya göre daha ince tane boyutunda ve küresel tane şekline sahip olmasından dolayı boşlukları daha iyi doldurma özelliğine bağlıdır. Ayrıca ince tane yapısına sahip olması puzolanik reaksiyonu geliştirerek CSH jellerinin oluşmasına neden olmaktadır. CSH jelleride boşlukları doldurarak karışımın yoğunluğunu arttırması sonucu geçirimsizliği azalmaya neden olmuştur. Uçucu kül miktarı arttıkça karışımın hacminin artmasına ve boşlukları doldurmaya başlaması ile yoğunluğun artmasına bağlı olarak su geçişini engellemeye neden olmuştur (Naganathan ve Linda,2013).

AE ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımların değişik tane incelikleri, ikame oranları ve kür süresine ait kapilarite katsayılarının referans numunenin kapilarite katsayı değerine göre % olarak değişimi Tablo 3.9 ve Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.9. AE uçucu külünün farklı öğütme süresi ve ikame oranlarında 28, 56 ve 90 kapilarite katsayı değerlerinin referans numunenin kapilarite katsayı değerlerine göre % değişim miktarları

Kül çeşiti	Uçucu kül katkı oranı, %	Öğütme süresi, dk	Kür süreleri, Gün								
			28			56			90		
			Referans numuneye göre kapilarite değerinin durumu kapilarite katsayısı cm^2/sn , (↑ :Yüksek; ↓ : Düşük), Referansa göre değişim, %								
Kapilarite katsayısı $\times 10^{-7}$, cm^2/sn	Referansa göre değişim	Artış, %	Kapilarite katsayısı $\times 10^{-7}$, cm^2/sn	Referansa göre değişim	Artış, %	Kapilarite katsayısı $\times 10^{-7}$, cm^2/sn	Referansa göre değişim	Artış, %			
Afşin Elbistan (AE)	10	0	3,28	↓	-5,7	1,78	↑	0,6	1,59	↓	-4,8
		30	2,97	↓	-14,6	1,34	↓	-24,3	1,13	↓	-32,4
		60	1,41	↓	-59,5	1,23	↓	-30,5	0,94	↓	-43,7
	30	0	6,77	↑	94,5	2,73	↑	54,3	1,44	↓	-13,7
		30	4,98	↑	43,1	2,27	↑	28,3	1,01	↓	-39,5
		60	2,70	↓	-22,4	2,05	↑	15,8	0,83	↓	-50,3
	50	0	9,92	↑	185,1	2,85	↑	61,1	1,34	↓	-19,7
		30	7,67	↑	120,4	2,70	↑	52,5	0,95	↓	-43,2
		60	6,93	↑	99,2	2,30	↑	29,9	0,76	↓	-54,5
Referans Numune	Katkisız [0]	-	Kapilarite katsayısı $\times 10^{-7}$, cm^2/sn								
		-	3,48			1,77			1,67		

Tablo 3.10. ÇYH uçucu külünün farklı öğütme süresi ve ikame oranlarında 28, 56 ve 90 kapilarite katsayı değerlerinin referans numunenin kapilarite katsayı değerlerine göre % değişim miktarları

Kül çeşiti	Uçucu kül katkı oranı, %	Öğütme süresi, dk	Kür süreleri, Gün								
			28			56			90		
			Referans numuneye göre kapilarite değerinin durumu kapilarite katsayısı cm^2/sn , (↑ :Yüksek; ↓ : Düşük), Referansa göre değişim, %								
			Kapilarite katsayısı $\times 10^{-7}$, cm^2/sn	Referansa göre değişim	Artış, %	Kapilarite katsayısı $\times 10^{-7}$, cm^2/sn	Referansa göre değişim	Artış, %	Kapilarite katsayısı $\times 10^{-7}$, cm^2/sn	Referansa göre değişim	Artış, %
Çayırhan (ÇYH)	10	0	3,97	↑	14,1	1,75	↓	-1,2	1,56	↓	-6,6
		30	3,33	↓	-4,3	1,71	↓	-3,4	1,48	↓	-11,4
		60	2,31	↓	-33,6	1,63	↓	-7,9	1,44	↓	-13,7
	30	0	2,85	↓	-18,1	1,59	↓	-10,2	1,44	↓	-13,7
		30	2,60	↓	-25,3	1,52	↓	-14,2	1,41	↓	-15,6
		60	1,89	↓	-45,7	1,48	↓	-16,4	1,37	↓	-17,9
	50	0	2,75	↓	-20,9	1,48	↓	-16,4	1,41	↓	-15,6
		30	2,22	↓	-36,2	1,44	↓	-18,6	1,34	↓	-19,7
		60	1,83	↓	-47,4	1,41	↓	-20,4	1,27	↓	-23,9
Referans Numune	Katkısız [0]	-	Kapilarite katsayısı $\times 10^{-7}, \text{cm}^2/\text{sn}$								
		-	3,48			1,77			1,67		

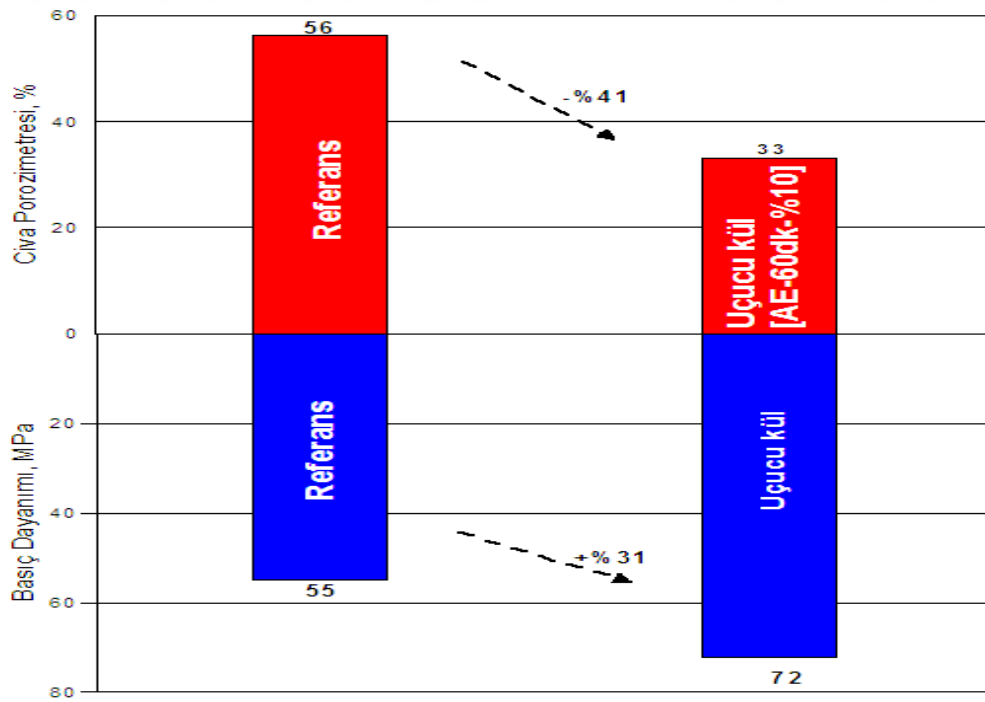
AE uçucu kül katkılı karışımlarda 28 günlük kür süresinin % 10 ve % 30 ikameli karışımların kapilarite katsayı değerleri referans numunenin kapilarite katsayı değerine göre değişimi en fazla 60 dk öğütme süreli karışıma ait olup sırası ile -% 59,5 ve -% 22,4 değerinde düşüş göstermiştir. % 50 ikameli karışımlarda ise kapilarite katsayı değerleri referans numunenin kapilarite katsayı değerlerinden yüksek çıkmıştır. En fazla değişim oranı orijinal uçucu kül katkılı karışıma ait olup bu değer % 185,1 olarak hesaplanmıştır. 56 günlük kür süresine ait kapilarite katsayı değerlerinin referans numuneye göre değişimi % 10 ikameli 60 dk öğütme süresine ait karışımda -% 30,5 oranında düşme olmuştur. % 30 ve % 50 ikameli orijinal uçucu kül katkılı karışımlarda kapilarite katsayılarının referans numuneye göre artmış olup bu değerler sırası ile % 54,3 ve % 61,1 olarak hesaplanmıştır. 90 günlük kür süresi için ise kapilarite katsayı değerleri referans numunesinin kapilarite katsayı değerine göre düşmüştür. En fazla düşüş % 10, % 30 ve % 50 ikameli 60 dk öğütme süreli karışımlarına ait olup sırası ile -% 43,7, -% 50,3 ve -% 54,5 değerleri belirlenmiştir.

ÇYH uçucu kül katkılı karışımlarda 28 günlük kür süresinin % 10, % 30 ve % 50 ikameli karışımların kapilarite katsayı değerleri referans numunenin kapilarite katsayı değerine göre değişimi en fazla 60 dk öğütme süreli karışıma ait olup -% 33,6, -% 45,7 ve -% 47,4 değerinde düşüş göstermiştir. 56 günlük kür süresinin % 10, % 30 ve % 50 ikameli karışımların kapilarite katsayı değerleri referans numunenin kapilarite katsayı değerine göre değişimi en fazla 60 dk öğütme süreli karışıma ait olup -% 7,9, -% 16,4 ve -% 20,4 değerlerinde düşüş oranları belirlenmiştir. 90 günlük kür süresinin % 10, % 30 ve % 50 ikameli karışımların kapilarite katsayı değerleri referans numunenin kapilarite katsayı değerine göre değişimi en fazla yine 60 dk öğütme süreli karışıma ait olup -% 13,7, -% 17,9 ve -% 23,9 değerinde düşüş oranları hesaplanmıştır.

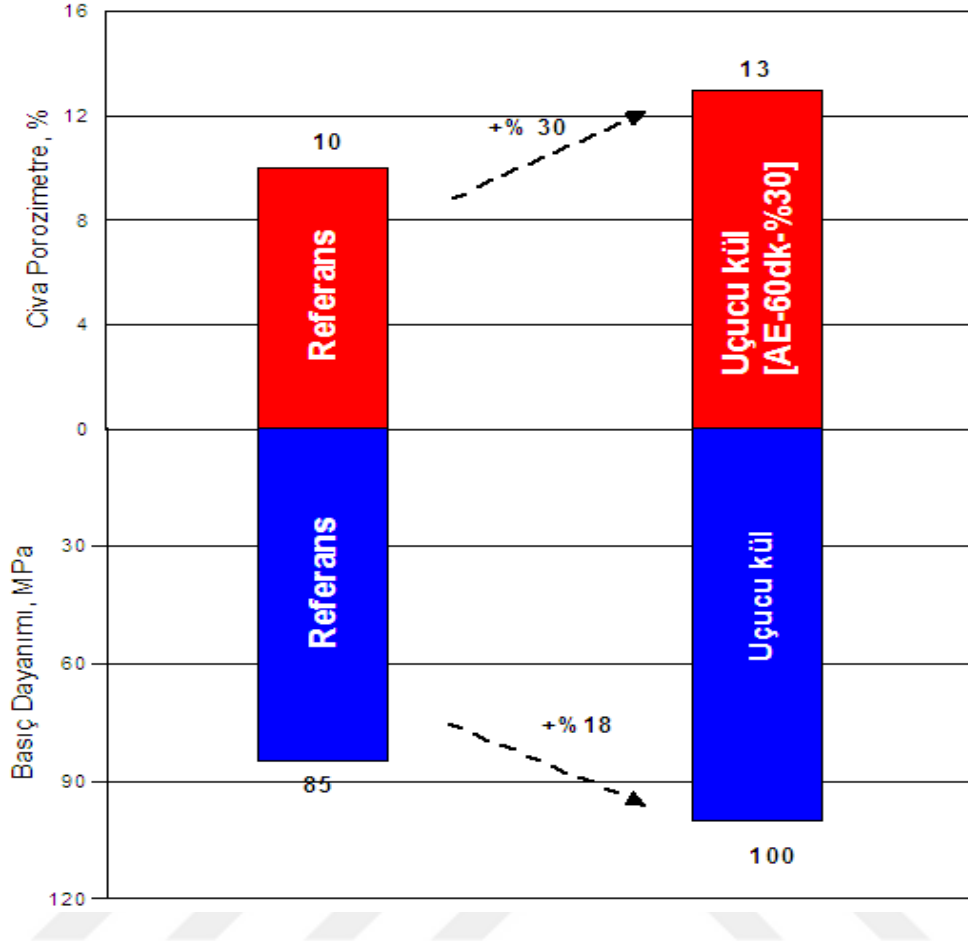
3.2.1.6.2. Numunelerin Boşluk Yapısı Üzerine Etkisi

AE ve ÇYH uçucu küllerinin farklı incelik ve ikame oranında çimento ile biraraya getirilmesi sonucu oluşturulan karışım numunelerinin 7 ve 90 günlük kür süresine ait seçili numuneler üzerine civa porozimetri deneyi yapılmıştır. Bu deneyle uçucu küllerin incelik ve ikame oranının çimento pastasının boşluk yapısı üzerine etkisi belirlenmiştir. AE uçucu kül ikameli karışımlarda 7 günlük kür süresi için referans (%100 çimento+% 0 uçucu kül) ve AE 60dk-% 10 ikameli (Afşin Elbistan uçucu külünün 60 dk öğütülmüş ve çimento

içerisine % 10 uçucu kül ikameli) karışımlar üzerine yapılmış ve Şekil 3.62’de verilmiştir. 90 günlük kür süresi için ise yine referans (%100 çimento+% 0 uçucu kül) ve AE 60dk-% 30 ikameli (Afşin Elbistan uçucu külünün 60 dk öğütülmüş ve çimento içerisine % 30 uçucu kül ikameli) karışımlar üzerine yapılmış ve Şekil 3.63’de gösterilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre 7 ve 90 günlük referans numuleri ile AE uçucu kül katkılı numunelerin toplam civa porozimetri oranları karşılaştırılmıştır. 7 günlük kür süresine ait referans numunenin civa porozimetri oranı AE uçucu kül katkılı karışımın civa porozimetri oranından yüksek çıkmıştır. Numune içerisinde gözenek oranı yükseldikçe basınç dayanımının düşürmüştür. Bu yüzden civa porozimetri oranı yüksek olan referans numunenin basınç dayanımı AE60dk-%10 ikameli karışımın basınç dayanım değerinden düşük değer almıştır. Şekil 3.63’de ise referans numunenin ve AE60dk-%30 ikameli karışımların 90 günlük civa porozimetri oranları verilmiş ve basınç dayanım değerlerine göre değişimleri karşılaştırılmıştır. Referans numunenin civa porozimetri oranı AE uçucu kül katkılı karışımın civa porozimetri oranından düşük çıkmıştır. Ancak AE uçucu kül katkılı karışımın basınç dayanımı referans numunenin basınç dayanımından yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Bu durum deney hatası olarak kabul edilmiştir.

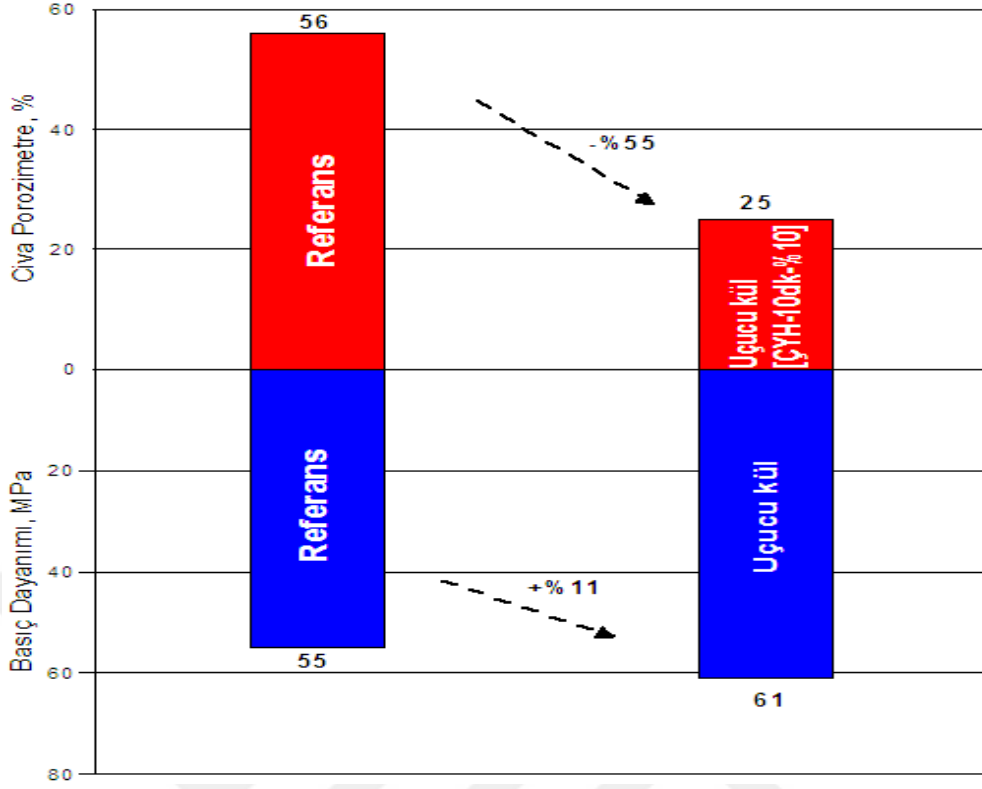


Şekil 3.62. AE uçucu kül ikameli 7 günlük çimento pastasının boşluk oranına göre basınç dayanım değişimi

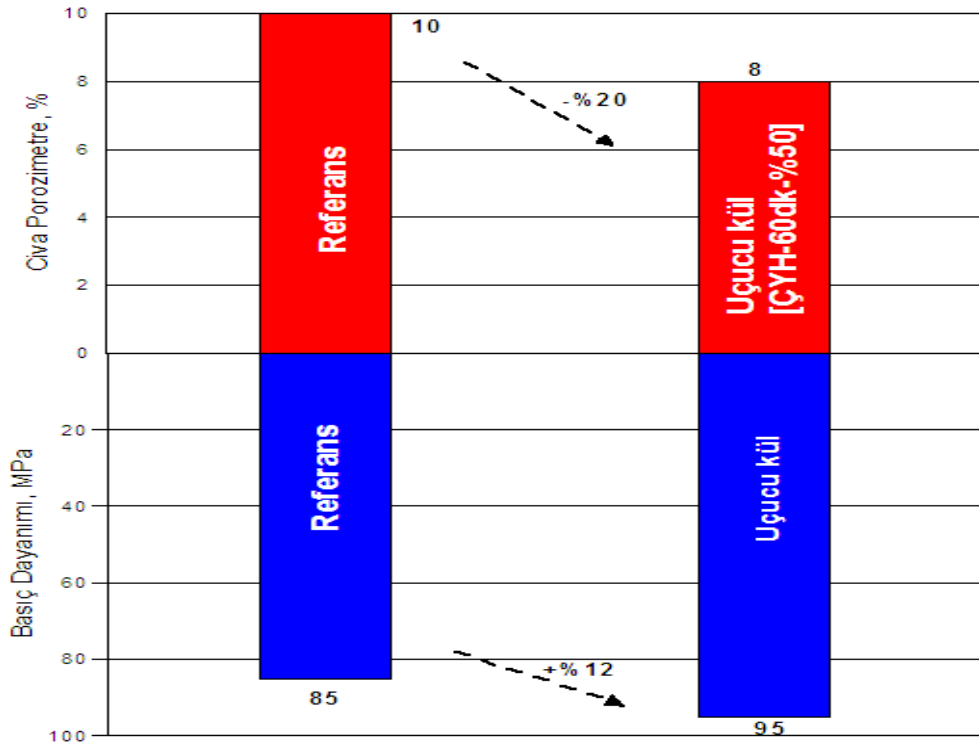


Şekil 3.63. AE uçucu kül ikameli 90 günlük çimento pastasının boşluk oranına göre basıç dayanım değışimi

ÇYH uçucu kül ikameli karışımlarda civa porozimetri oranı 7 günlük kür süresi için referans (%100 çimento+% 0 uçucu kül) ve ÇYH 10dk-% 10 ikameli (Çayırhan uçucu külünün 10 dk öğütölmüş ve çimento içerisine % 10 uçucu kül ikameli) numuneler üzerine yapılmış ve Şekil 3.64’de verilmiştir. 90 günlük kür süresi için ise yine referans (%100 çimento+% 0 uçucu kül) ve ÇYH 60dk-% 50 ikameli (Çayırhan uçucu külünün 60 dk öğütölmüş ve çimento içerisine % 50 uçucu kül ikame) numuneler üzerine yapılmış ve Şekil 3.65’de gösterilmiştir.



Şekil 3.64. ÇYH uçucu kül ikameli 7 günlük çimento pastasının boşluk oranına göre basınç dayanım değişimi



Şekil 3.65. ÇYH uçucu kül ikameli 90 günlük çimento pastasının boşluk oranına göre basınç dayanım değişimi

Elde edilen deney sonuçlarına göre ÇYH uçucu kül katkılı numunelerin 7 ve 90 günlük civa porozimetri oranı basınç dayanımına göre değişimleri değerlendirilmiştir. 7 ve 90 günlük civa porozimetri oranı ÇYH uçucu kül katkılı karışımlarda referans numunelerinin civa porozimetri oranlarına göre daha düşük değerler aldığı belirlenmiştir. Civa porozimetri oranı düşük olan ÇYH uçucu kül katkılı karışımların basınç dayanım değerleri ise referans numunenin basınç dayanım değerlerinden yüksek çıkmıştır.

AE ve ÇYH uçucu kül ikameli numunelerinin boşluk oranının referans numuneye göre farklı miktarlarda olduğu belirlenmiştir. Bu iki uçucu kül katkılı karışımlarda boşluk oranı referans numunenin boşluk oranına göre azalma miktarı ÇYH uçucu kül katkılı karışımlarda AE uçucu kül katkılı karışımlara göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durumu iki uçucu külü oluşturan tanelerin inceliğine, şekline, çimento içerisine ikame edilen oranına ve kür süresine göre değişmektedir (Chindaprasirt vd., 2005). Yukarıda ifade edilen uçucu küllerin özelliklerine göre karışımın boşluk yapısı değişimi irdelenmiş ve boşluk yapısı üzerine etkileri verilmiştir. Uçucu kül inceliğinin boşluk yapısı üzerine etkisi özellikle ÇYH uçucu kül katkılı karışımlar daha belirgin görülmüştür. İnceliğe bağlı olarak çimento matriksini daha yoğun yapması sonucu karışımın boşluk oranını azaltmıştır. Ayrıca daha ince tane yapısına sahip uçucu küllerin daha reaktif, daha iyi puzolanik özellik göstermekte ve erken yaşlarda daha fazla kireç tüketimini sağlaması sonucu boşluk yapısını geliştirmektedir (Hsu vd.,2018). Öğütme yada sınıflandırma yöntemi ile ince tane boyutuna getirilmiş uçucu kül katkılı numunelerin boşluk oranı orijinal durumda uçucu kül katkılı karışımlara kıyasla daha düşük değerler almaktadır. Bu durum, çimento hidrasyonu sonucu oluşan boşlukları ince uçucu kül tanesi tarafından yavaş yavaş doldurması ile boşluk oranını azaltması ile bağlantılıdır. Ayrıca İnce tane yapısına sahip uçucu küller erken kür süresine bağlı olarak çekirdeklenme ve sarma ilerleyen kür süresinde ise puzolanik reaksiyonunun gelişmesine bağlı olarak boşluk yapısını azaltmaya katkı sağlamaktadır. Çimento hidrasyonu sonrasında açığa çıkan Ca(OH)_2 'in uçucu külün bileşimindeki SiO_2 ve Al_2O_3 ile reaksiyona girmesi ile puzolanik reaksiyonu oluşturarak karışımın boşluk oranını önemli miktarda düşmesini sağlamaktadır. ÇYH uçucu külü gibi küresel tane yapısında ve ince tane boyutuna sahip uçucu küller ile hazırlanan karışımlarda uçucu külün inceliğine ve şekline bağlı olarak karışım içerisinde kolaylıkla dağılmaya ve çimento pastası matriksini daha homojen yapıda oluşmasını sağlamaktadır. Buda daha sıkı ve boşluksuz karışım oluşturmaya neden olmaktadır. Bu yüzden küresel tane yapısına sahip ÇYH uçucu kül katkılı karışımlarda boşluk oranı AE uçucu kül katkılı karışımlara

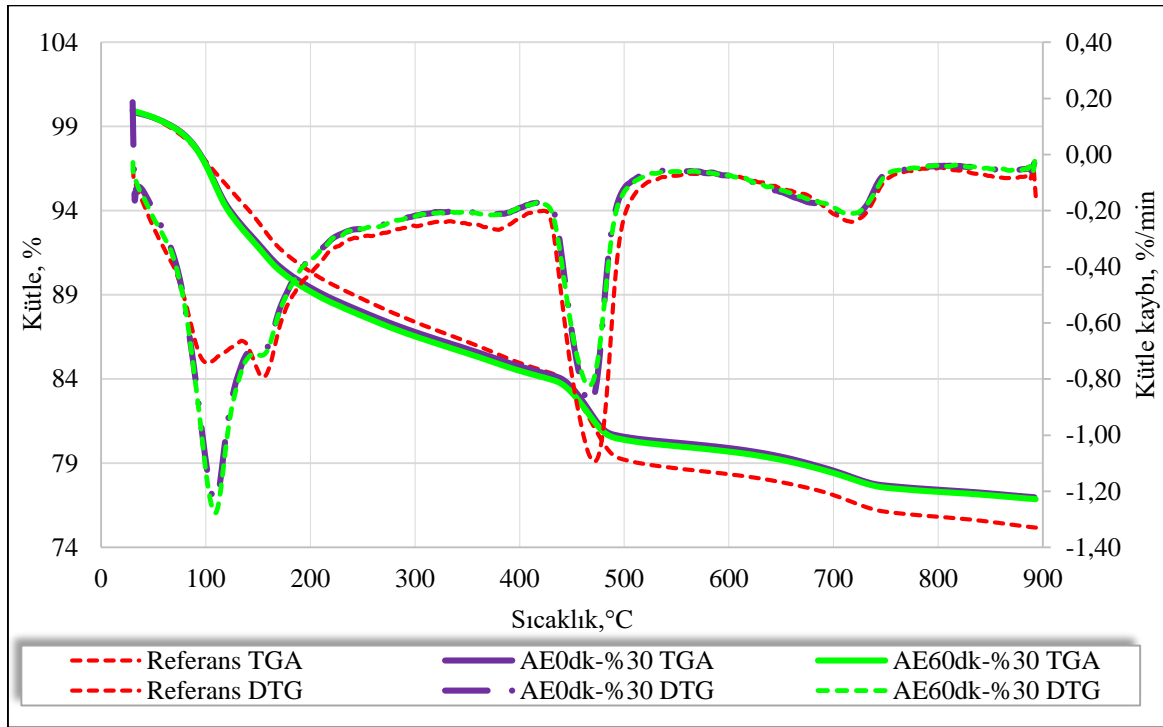
göre daha düşük olmasını sağlamıştır. Uçucu küllerin boşluk yapısı üzerinde sarma etkisi, tamamen reaksiyona girmeyen küresel, katı ve ince taneli uçucu kül parçacıkları, malzemenin parçacıkları ile boşlukları doldurması ve daha yoğun sarmaya izin vermesi ve makriks şeklinin almasını sağlamaktadır. Çekirdeklenme etkisi ise daha küçük parçacıklar katkılı çimento pastası içerisinde dağıtıldığı zaman çimento pastasının daha küçük bir ürün şeklini alması ve reaksiyonu hızlandırma etkisine neden olmaktadır. Uçucu küllerde sarma ve çekirdeklenme etkisi özellikle AE ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımların erken kür sürelerinde boşluk miktarını azaltması üzerine önemli etki oluşturmuştur. İnce tane boyutuna sahip uçucu küllerin boşluk oranını düşürmesinde ilerleyen kür süresinde etkisi ise ince taneli uçucu küller iri taneli uçucu küllere göre boşluk boyutunu azaltmakta, hidrasyon ürünleri için daha büyük çekirdek alan oluşturmaya neden olmaktadır. 90 günde pastanın daha sıkı bir yapıda olmasına, puzolanik ürünlerin oluşmasına ve hidrasyonun büyümesi sonucu pastadaki boşluk boyutunun yaş ile birlikte değişmesi boşluk oranını önemli oranda düşürmeyi sağlamaktadır (Chindaprasirt vd., 2007). Boşluk oranının uçucu külün değişik özelliklerine göre değiştirilmesi sonucu basınç dayanım değerlerini geliştirdiği her iki uçucu kül katkılı karışımlarda da belirgin olarak rastlanmıştır. Çünkü erken kür sürelerinde boşluk oranı referans numunenin boşluk oranından düşük olması boşlukları iyi doldurmaya ilerleyen kür sürelerinde ise Ca(OH)_2 ve uçucu kül arasında puzolanik reaksiyon sonucu oluşmuş C-S-H yada C-A-H jeli boşlukları doldurması sonucu boşluk oranını önemli miktarda düşürdüğü her iki uçucu kül katkılı karışımlarda da görülmüştür (Feng vd., 2018).

3.2.1.6.3. Termal Analiz Üzerine Etkisi (TGA\DTG)

AE ve ÇYH uçucu küllerin orijinal durumda ve 60 dk öğütme inceliğine sahip malzemelerin % 30 oranında çimentoya ikame edilmesi ile su/bağlayıcı 2 olarak kabul edilen katkılı çimento pastaları üretilmiştir. Üretilen numunelerin 90 günlük kür süresi sonunda 4 gün 50 °C sabit sıcaklıkta etüvde kurutulmasının ardından ince öğütülerek Termal Gravimetri Analizi/Diferansiyel Termal Gravimetri (TGA/DTG) analizleri yapılmıştır. Analizler sayesinde uçucu küllerin çimento hidrasyonu üzerine etkisi belirlenmiştir. TGA (Termal Gravimetri Analizi) analizi ile ağırlık değişiminin sıcaklık fonksiyonuna bağlı olarak meydana getirdiği değişikliği mg veya % olarak belirlenmesi sağlanmıştır. TGA ile ısıtılan uçucu kül katkılı ve katkısız numunelerde meydana gelen

ağırlık kaybı sonuçları % olarak belirlenmiştir. DTG (Diferansiyel Termal Gravimetri) analizde ise sıcaklığa bağlı olarak numunelerde meydana gelen ağırlık kayıplarının en fazla hangi sıcaklık aralığında olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmada AE ve ÇYH uçucu küllerinin orijinal durumda ve 60 dk öğütme sürelerinde çimentoya % 30 ikame edilmesi ile hazırlanan uçucu kül katkılı çimento pastalarının çimento hidratasyonu üzerine etkisi incelenmiş ve sadece çimento ikameli referans numunenin hidratasyonuna göre karşılaştırılması Şekil 3.66 ve Şekli 3.67'de verilmiştir.



Şekil 3.66. Çimento, orijinal ve 60 dk öğütme inceliğinde % 30 AE uçucu kül ikameli pastaların 90 günlük kür süresi sonrası TGA/DTG analizi sonuçları

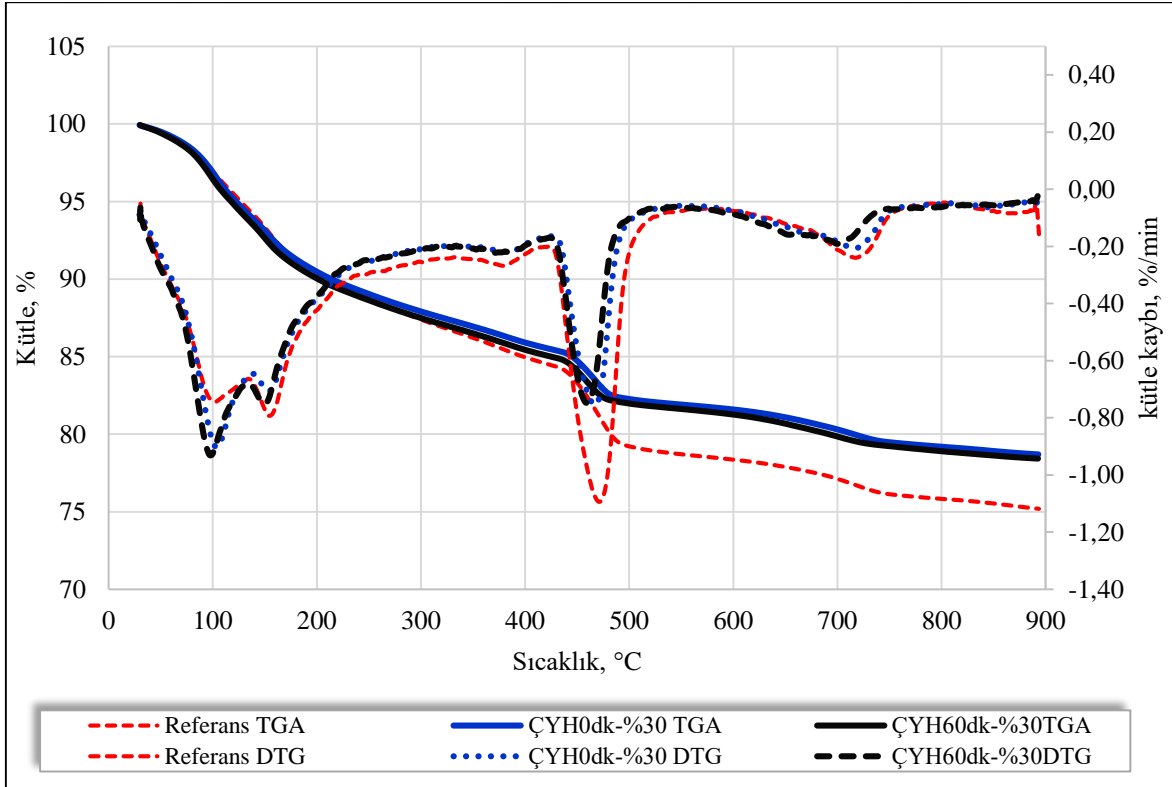
Şekil 3.66'da AE uçucu külün orijinal durumda ve 60 dk öğütme süresine sahip malzemelerin çimento içerisine % 30 ikame edilmesi ile hazırlanan karışımların hidratasyon sonucu oluşan toplam kitle kaybı miktarları sırası ile % 22,99 ve % 23,09 olarak belirlenmiştir. Sadece çimento ikameli referans karışımında ise toplam kitle kaybı % 24,78 oranında olup bu değer uçucu kül ikameli karışımlardan daha fazla olduğu tespit edilmiştir. AE uçucu kül ikameli karışımlarda ilk kitle kaybı yaklaşık 30-200 °C

aralığında, daha sonra 395-520 °C aralığında ve en son olarak 600-800 °C aralığında gözlemlenmiştir. Bu aralıklarda oluşan kütle kaybı miktarları Tablo 3.11’de verilmiştir.

Tablo 3.11. Çimento ve AE uçucu külünün orijinal durum ile 60 dk öğütme inceliğinde TG analiz sonuçlarına göre farklı sıcaklık aralığında oluşmuş kütle kayıpları

Malzeme Çeşidi	30-200 °C, %	395-520 °C, %	600-800 °C, %
Çimento	9,64	6,02	3,08
AE0dk	9,37	4,28	2,53
AE60dk	9,34	4,08	2,33

AE; Afşin Elbistan külü, AE0, 60 dk; o küle ait öğütme süresi (dakika)



Şekil 3.67. Çimento, orijinal ve 60 dk öğütme inceliğinde % 30 ÇYH uçucu kül ikameli pastaların 90 günlük kür süresi sonrası TGA/DTG analiz sonuçları

ÇYH uçucu külün orijinal durumda ve 60 dk öğütme sürelerine ait malzemelerin çimento içerisine % 30 ikame edilmesi ile hazırlanan karışımların hidrasyon sonucu oluşan toplam kütle kayıpları sırası ile Şekil 3.67’de verildiği gibi % 21,25 ve % 21,51 olarak belirlenmiştir. Sadece çimento ikameli karışımda hesap edilen toplam kütle kaybı ise % 24,78 olarak belirlenmiş olup ÇYH uçucu kül katkılı karışımlara göre fazla olduğu

görülmüştür. İlk kütle kaybı yaklaşık 30-210 °C aralığında, sonrası kütle kaybı 428-527 °C aralığında ve en son olarak 600-800 °C aralığında görülmüştür. Bu aralıklarda oluşan kütle kaybı miktarları % olarak Tablo 3.12’de verilmiştir.

Tablo 3.12. Çimento ve ÇYH uçucu külünün orijinal ve 60 dk öğütme inceliğinde TG analiz sonuçlarına göre farklı sıcaklık aralığında oluşmuş kütle kayıpları

Malzeme Çeşidi	30-210 °C, %	428-527 °C, %	600-800 °C, %
Çimento	9,64	6,02	3,08
ÇYH0dk	9,19	3,75	2,4
ÇYH60dk	8,42	3,52	2,3

ÇYH; Çayırhan külü, ÇYH0, 60 dk; o küle ait öğütme süresi (dakika)

Her iki uçucu külünde farklı incelik değerlerinde çimentoya ikame edilmesi ile elde edilen DTG analizi sonuçlarına göre 3 farklı endotermik pike rastlanmıştır. Ayrıca TGA analizi sonuçlarına göre AE uçucu kül ikameli pastalarda kütle kaybı ÇYH uçucu kül ikameli pastalara göre daha yüksek değerler aldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni AE uçucu kül katkılı karışımların kapiler boşluklarında daha fazla doygun suyun olmasından kaynaklanmıştır (Tang vd., 2016). Her iki uçucu kül ikameli karışımlarda farklı sıcaklıklarda oluşan kütle kayıpları farklı bileşenlerden ileri gelmiştir. AE uçucu kül ikameli karışımlarda 30-200 °C’de ÇYH uçucu kül ikameli karışımlarda ise 30-210 °C’de meydana gelen kütle kayıpları hidrasyon sonucunda, jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), etrenjit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), C-S-H (Tobermorit), monosülfoalüminat, gehlenit (C_2ASH_8) gibi birkaç bileşiğin dehidratasyonundan oluşmuştur (Koçak ve Nas, 2014). AE uçucu kül ikameli karışımlarda 395-520 °C’de ile ÇYH uçucu kül ikameli karışımlarda 428-527 °C’de meydana gelen kütle kayıpları portlanditin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) yada (CH) dehidroksilasyonu (bir bileşiğin yapısındaki $-\text{OH}$, hidroksil iyonlarının, ısıtmaya bağlı olarak kaybolması) sonucu CaO ve H_2O oluşturmasından meydana gelmiştir. Son olarak meydana gelen kütle kaybı CaCO_3 ’ün dekarbonizasyonu ile CaO ve CO_2 oluşturması sonucu olmuştur. Bu bileşiğe bağlı kayıp her iki uçucu kül katkılı karışımlarda da 600-800 °C’de aralığında oluşmuştur (Wongkeo vd., 2013; Gad v., 2017). Genel olarak hidrasyon olayında kütle kayıpları üç farklı evreden oluşmuştur. Bu evrelerden ilki dehidratasyon evresini oluşturmuştur. Dehidratasyon evresinde farklı bileşikler içerisinde bulunan nem ve moleküler su kaybı meydana gelmiştir. Sonraki kütle kaybı dehidroksilasyon evresinde

olup $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'den suyun ayrılması sonucu oluşmuştur. En son kütle kaybı dekarbonizasyon (kalsinasyon) evresinden olup kireçtaşı (CaCO_3) ısıtılması ile CO_2 gazı açığa çıkması ve bunun sonucunda kütle kaybı meydana getirmiştir (Nochaiya vd., 2010).

AE ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımlarda öğütmeye bağlı olarak artan tane inceliğinin hidratasyon üzerine etkiside belirlenmiştir. Buna göre her iki uçucu külün 60 dk öğütme süresine sahip karışımları orijinal kül katkılı karışımlara göre azda olsa hidratasyonu erken sürede geliştirmiş ve sonuçta daha az kütle kayıpları olmasını sağlamıştır. Bu durumun nedeni çimentonun bir kısmı yerine uçucu kül ikame edilmesi bağlayıcı içerisinde çimento miktarının azaltmasına neden olmuştur. Çimentoya orijinal uçucu kül yerleştirildiğinde Ca^{+2} iyonunun bir kısmı uçucu kül parçacıklarının yüzeyi üzerinde emilmekte ve çimentonun azalması sıvı konsantrasyonda Ca^{+2} iyonunun düşmesine yol açmıştır. Uçucu kül inceliğinin artmasına bağlı olarak yüzeyde emilen Ca^{+2} iyonu daha fazla olmuştur. Bu yüzden reaksiyon doygun hale geldiği için Ca^{+2} iyonu zamanı ertelemiş ve hidratasyon ısısını düşürmeyi sağlamıştır. Hidratasyon ısısının düşmesi sonucuda puzolanik reaktiviteden dolayı hidratasyon boyunca üretilmiş ısıyı arttırmıştır (Feng vd., 2018). Çimento içerisinde AE ve ÇYH uçucu küllerinin farklı tane boyutlarında kullanılması ile hidratasyonu geliştirmesi üzerine filler ve kimyasal olarak iki etkisi olmuştur.

1- Filler etkisi, uçucu küllerin filler etkisi özellikle çimentonun erken hidratasyon sürecini desteklemiştir. Erken hidratasyon sürecinin geliştirilmesi özellikle uçucu külü oluşturan tanenin küresel ve ince tane boyutuna sahip olmasından ileri gelmiştir. Küresel tanelerin hidratasyon üzerine etkisi taze karışım içerisinde kayganlaştırıcı etki yaratarak sertleşme öncesi karışımın reolojik özelliklerini geliştirmeye katkı sağlamıştır. Uçucu külün tane boyutunun hidratasyon üzerine etkisi ise inceliğe bağlı olarak puzolanik aktiviteyi geliştirmiştir. Puzolanik reaksiyon ise çimento hidratasyonu sonucu oluşmuş portlanditi tüketmekte ve kendi hidratasyon ürünleri ile boşlukları doldurması daha sıkı boşluk yapısı ve çimento temelli malzemeler için daha yüksek dayanımda olmasını sağlamıştır. Uçucu kül katkılı çimentonun hidratasyon reaksiyonunda 3 gün sonra puzolanik reaktiviteyi geliştirmesi özellikle AE uçucu kül katkılı karışımların erken kür sürelerinde yüksek dayanım değerleri elde etmesini sağlamıştır (Zeng vd., 2012).

Uçucu küllerin filler etki ise çimento hidratasyonunu geliştirmesi üzerinde iki farklı katkıya sahiptir. Bu katkılar seyreltme ve heterojenik çekirdeklenme etkisi olarak değerlendirilmiştir.

a)- Seyreltme etkisi, bu etki özellikle AE ve ÇYH uçucu küllerinin orijinal durumda ve 60 dk öğütme süresine sahip karışımların her ikisinde de hidrasyonu geliştirdiği görülmüştür. Uçucu küllerin seyreltme etkisi çimento su/bağlayıcı oranında uçucu kül eklenmesi sonucu su/çimento oranını arttırmaya neden olmuştur. Bu yüzden çimento hidrasyonu derecesi daha fazla mevcut su ile desteklenmiştir. Ayrıca uçucu küllerin küresel tane yapısında olması Ca^{+2} iyonunu emmesi ve çimento hidrasyonu için çökeltme ortamları sağlamıştır. Böylece çimento taneleri hidrasyonu sürecini hızlandırmaya yardım etmiştir. Bu etki özellikle yüksek seviyede (% 30 ve üzeri) uçucu kül katkıli karışımlarda görülmüştür. Bu sonuç her iki uçucu külün ilerleyen kür sürelerine ait en yüksek basınç dayanım değerlerinin % 30 ikamesinde elde edilmesi ile desteklenmiştir (Deboucha vd., 2017).

b)- Heterojen çekirdeklenme etkisi özellikle uçucu küllerin tane boyu dağılımı, tipi ve ikame oranına göre değişmektedir. Bu etki özellikle ÇYH uçucu kül katkıli karışımlarda ilerleyen kür sürelerinde dayanım değerlerinin AE uçucu kül katkıli karışımlara göre yüksek olmasını sağlamıştır. Çünkü ÇYH uçucu küllerin farklı öğütme sürelerine ait özgül yüzey alan değerleri AE uçucu külünün özgül yüzey alan değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. İnce taneli uçucu küller, CH kristalleri için de daha fazla sayıda çekirdeklenme noktası sağladıklarından ara yüzeydeki iri CH kristalleri yerine daha küçük kristaller oluşturmaya neden olmuştur (Anwar, 2010).

2- Kimyasal Etki, mineral katkıların kimyasal etkisi, çimento içerisinde bulunan anhidrit ile reaksiyona girme kabiliyeti, çimento hidrasyonu yada su ile hidrasyonu ürünlerinin oluşumuna bağlıdır (Deboucha vd., 2017). Ayrıca uçucu küllerin hidrasyonu üzerinde erken yaşlarda etrenjitin oluşmasına ve sülfat miktarının azalmasını hızlandırmaya etki etmektedir. Uçucu küllü pasta 1, 3 ve 7 gün gibi hidrasyonu erken evrelerinde kalsiyum etrenjiti monosülfata dönüştürmekte iken sadece çimento katkıli pastalarında bu işlem 28. güne ertelenmektedir. Uçucu kül ilavesi kalsiyum ile alüminyum ve silisyum bereber ek reaksiyonlar oluşması sonucu fazladan C-S-H yapısının oluşmasına sebep olmuştur. Bu dönüşüm mikro yapının yoğunluğunun artması ile eşlik etmiştir (Junyuan vd., 1984).

Uçucu küllerin çimento hidrasyonu geliştirmesi ile elde edilen karışım numunelerinin durabilitesini ve nihai basınç dayanımını arttırmaya, hidrasyonu ısını düşürmeye, sülfat saldırısına karşı dayanımı arttırmaya ve çimento için harcanan enerji miktarını azaltmayı sağlamaktadır. Uçucu küller kimyasal bileşimi bakımından silisyum ve

alimünyumdan oluşmakta olup suyun varlığında çimento hidratasyonu sonucu oluşmuş portlandit ile reaksiyona girmesi ile bağlayıcı özellik kazanmaktadırlar. Çimento hidratasyonu ve puzolanik reaksiyon birbirinden bağımsız ilerlemediği için çimentoya uçucu kül ikame edilmesi ile karışım içerisindeki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içeriğini azaltmaya neden olmaktadır. Bu yüzden çimentoya uçucu kül ikame edilmesi çimentoya göre hidratasyon oranının düşmesine neden olmaktadır (Shafiq ve Nuruddin, (2010). Uçucu küller hidratasyon ısısını azaltması ile çimento bileşiklerinin sertleşme sürecinde ve betonun erken yaşlarda oluşan mikro çatlakların sayısını azaltmayı sağlamaktadır. Bu çatlaklar beton sistemi içerisinde özellikle kütle beton özelliğine sahip geçirimsizliği az olması istenen baraj inşaatlarında istenmeyen bir durum olarak görülmektedir. Özellikle oluşan bu çatlaklar termik rötre çatlakları (taze veya prizini almamış betonun su kaybederek veya ortam ile sıcaklık farklarından dolayı büzülerek çatlak meydana gelmesi durumudur) olarak adlandırılmaktadır. Ancak hidratasyon ısısını düşürme miktarı uçucu küllerin çeşidine göre değişmektedir. Özellikle yüksek kireçli uçucu küllerin hidratasyon ısısında fazla bir değişim göstermediği, düşük kireçli uçucu küllerin hidratasyon ısısını düşürmede daha etkili olmaktadır (Gürbüz, 2009). Ayrıca bileşim içerisinde çimento miktarını azaltmak ve uçucu kül miktarını arttırmak hidratasyon ısısının maksimum sıcaklığa düşürmeye neden olmaktadır. Uçucu kül eklendiği zaman hidratasyon ısısının maksimum sıcaklığa düşürmesi çimento parçacıkları etrafında C-S-H tabakasının şekillenmesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin çimento içerisine silika füme eklendiğinde kendi yapısı içerisinde kalsiyum iyonunu emer ve bileşik içerisinde Ca^{+2} konsantrasyonunu azaltmaktadır. Düşük su/çimento oranında hareketsiz periyodun uzaması silika fümenin suyu emmesine bağlıdır. Çimento hidratasyonu için emilen su içeriğinin azalması sonucunda hidratasyon sürecinde daha az çimento akışı yer alır. Bu yüzden silika füme hidratasyon süreci içerisinde bir geciktirici görevi görür. Çimento parçacıklarının yüzeyi üzerinde silika füme tabakalarının oluşumu ayrıca hidratasyon hızını geciktirmeye katkı sağlaması ile pastanın maksimum hidratasyon sıcaklığını düşürür. Daha düşük yoğunlukta hidrate olmuş çimentonun düşmesi ile portlandit tüketimi takip etmesi, kapiler boşlukları doldurması için çok etkili olup poroziteyi düşürmeye neden olur. Portlanditin tüketim süreci ve boşluk yapısını azaltmaya, dayanımı arttırmaya, impermabilite ve durabiliteyi geliştirmeye ve ek puzolanlar sayesinde çimentonun kimyasal direncini arttırmaya katkı sağlar (Dembovska vd., 2017).

4. SONUÇLAR

Uçucu küllerde inceliğin puzolanik aktiviteye etkisinin incelenmesine yönelik bu tez çalışmasında, Afşin Elbistan (AE) ve Çayırhan (ÇYH) termik santrallerinden temin edilmiş iki farklı uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu küllerin orijinal ve farklı zaman aralıklarında (10, 20, 30, 45 ve 60 dk) bilyeli değirmende öğütme sonucu karakteristik özellikleri (fiziksel, kimyasal, mineralojik, morfolojik) mekanik, puzolanik ve mikro yapı incelemesini kapsayan çeşitli deney ve analizler yapılmıştır. Yapılan deneyler ve analizlerin sonucu aşağıda sunulmuştur.

- Uçucu külleri öğütme ile daha ince tane boyutuna sahip malzemeler oluşturulmuştur. AE uçucu külünün orijinal durumdan 60 dk öğütme süresi sonrasında tane boyutundaki ilcelme miktarı % 10 oranında artmıştır. ÇYH uçucu külünde ise bu oran % 29 seviyelerine kadar ulaşmıştır.
- Yoğunluk deneyi sonuçlarına göre öğütmenin etkisi ile AE ve ÇYH uçucu küllerinin yoğunluk değerlerinin arttığı ancak bu artışın yinede çimentonun yoğunluk değerinden düşük olduğu belirlenmiştir. AE ve ÇYH uçucu küllerinin orijinal durumdan 60 dk öğütme süresi sonrasında yoğunluk değerindeki artış miktarı yaklaşık % 13 olarak hesaplanmıştır.
- Öğütme ile AE ve ÇYH uçucu küllerinin özgül yüzey alan (blaine) değerleri artmıştır. Ancak her iki uçucu külün özgül yüzey alan değerleri en yüksek ÇYH uçucu külü ve sonrasında AE külü olmasına rağmen çimentonun özgül yüzey alan değerinden düşük değerler almıştır. ÇYH uçucu külünün orijinal durumdan 60 dk öğütme süresi sonrasında özgül yüzey alan değerleri arasındaki artış % 38, AE uçucu külünde bu oran % 10 gibi düşük seviyelerde kalmıştır.
- Uçucu külleri kimyasal bileşimine göre kıyaslandığında AE uçucu külü ÇYH uçucu külüne göre % 62,7 oranında daha fazla CaO içermektedir. Bu yüzden AE uçucu külü C, ÇYH uçucu külü F tipi kül grubunda yer almıştır.
- Serbest kireç analizine göre AE uçucu külünün % 10 ikameli karışımı hariç diğer karışımları ile ÇYH uçucu külünün orijinal durumda ve çimentoya farklı ikame

oranlarında hazırlanan karışımların serbest kireç miktarları standartta ifade edilen değerin altında olduğu belirlenmiştir.

- Kızdırma kaybı analiz sonuçlarına göre AE ve ÇYH uçucu küllerinin orijinal ve farklı öğütme zamanlarına ait kızdırma kaybı değerleri standartlarda belirtilen sınır değerlerin ve tez çalışmasında kullanılan çimentonun kızdırma kaybı değerinden düşük değerler almıştır.
- AE ve ÇYH uçucu küllerini mineralojik bileşimleri bakımından kıyaslandığında, AE uçucu külünde kireç olması ve farklı feldispat grubu mineralleri bulundurması iki kül arasında en belirgin fark olarak tespit edilmiştir.
- SEM analizi sonucu göre AE uçucu külünün orijinal durumda tane yapısı ve şekli düzensiz, köşeli tanelerin hâkim ancak ara ara küresel tanelerden ve boşluklu yüzey yapısından oluştuğu görülmüştür. Öğütmeye bağlı olarak düzensiz ve köşeli tanelerin arttığı tespit edilmiştir. Çayırhan uçucu külünde ise tane yapısı ve şekli orijinal durumda, küresel tanelerin hâkim ancak köşeli ve düzensiz tanelerin mevcut olduğu görülmüştür. Öğütme süresine bağlı olarak düzensiz tane yapısına sahip tanelerin arttığı belirlenmiştir.
- Farklı öğütme süreleri ve ikame oranları ile hazırlanan uçucu kül katkılı çimento pastalarının su ihtiyacı uçucu kül tipine göre değişmiştir. AE uçucu kül katkılı karışımlarda öğütme süresinin karışımın kıvam tayini üzerinde çok fazla bir etkisi olmadığı ancak ikame oranı artışına göre arttırdığı görülmüştür. Çayırhan uçucu kül katkılı karışımların su ihtiyacı üzerine öğütme süresinin belirgin bir etkisi olmamıştır. Ancak çimento içerisinde uçucu kül ikamesinin artışına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. AE uçucu kül katkılı karışımların su ihtiyacı referans numunenin su ihtiyacına göre daha fazla, ÇYH uçucu kül katkılı karışımlarda ise daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Priz süresi deney sonuçlarına göre AE ve ÇYH uçucu külleri ile hazırlanan taze haldeki karışımlarda kullanılan uçucu küllerin öğütme inceliği ve çimento içerisindeki ikame oranı artışına bağlı olarak karışımın priz sürelerini uzattığı belirlenmiştir.
- AE kül katkılı sertleşmiş numunelerin 2 günlük basınç dayanım değerleri öğütme süresindeki artışa bağlı olarak artmıştır. Bu küle ait % 10 ikameli karışımların basınç dayanım değerleri referans numunesinin basınç dayanım değerinden daha yüksek, %

30 ve % 50 ikameli karışımlarda ise basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

- ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 2 günlük basınç dayanım değerleri % 10 ikameli karışımlarda öğütme süresinin artması ile arttığı % 30 ve % 50 ikameli karışımlarda ise azaldığı belirlenmiştir. % 10 ikameli karışımların basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerlerinden daha yüksek, % 30 ve % 50 ikameli karışımlarda ise daha düşük değerler aldığı görülmüştür.
- AE ve ÇYH uçucu kül katkılı karışımların 7 günlük basınç dayanım değerleri öğütme süresine bağlı olarak artmıştır. Her iki uçucu kül katkılı % 10 ikameli karışımlarının basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerinden daha yüksek değerler almıştır. % 30 ve % 50 ikameli karışımların basınç dayanım değerleri ise referans numunenin basınç dayanım değerinden daha düşük çıkmıştır.
- Her iki uçucu kül katkılı numunelerin kısa dönem basınç dayanım değerleri için en ideal ikame oranı % 10 olarak kabul edilmiştir. Kısa dönem kür süreleri için AE ve ÇYH uçucu küllerinin çimento bileşiminde mineral katkı olarak farklı öğütme sürelerinde % 10 ikameli karışımlarda en iyi puzolanik aktivite gösterebileceği öngörülmüştür.
- 28 ve 56 günlük basınç dayanım sonuçlarına göre AE ve ÇYH uçucu kül katkılı % 30 ve % 10 ikameli karışımların basınç dayanım değerleri referans numunenin basınç dayanım değerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. % 50 ikameli her iki uçucu kül katkılı karışımların basınç dayanım değerleri ise referans numunenin basınç dayanım değerinden düşük değerler almıştır.
- 90 günlük basınç dayanım sonuçları her iki uçucu külün tüm öğütme süreleri ve ikame oranlarında referans numunenin basınç dayanım sonucuna göre daha yüksek değerler aldığı görülmüştür.
- AE ve ÇYH uçucu küllerini çimento bileşiminde mineral katkı olarak kullanıldığında uzun kür süreleri için en ideal ikame oranının tüm öğütme süreleri için % 30 seviyelerinde olduğu görülmüştür. Bu oranın uzun dönemli kür süresinde daha yüksek puzolanik aktivite gösterdiği öngörülmüştür.
- AE ve ÇYH uçucu küllerinin 28 günlük puzolanik aktivite indeksi sonuçları öğütme süresinin artmasına bağlı olarak artmıştır. Öğütmeye bağlı olarak ÇYH uçucu külünün

orijinal durumdan 60 dk öğütme süresi sonrasında puzolanik aktivite indeksi değeri artışı % 12,77, AE uçucu külünde bu oran % 4, 86 gibi düşük seviyelerde kalmıştır.

- AE ve ÇYH uçucu küllerinin 28 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri 20 dk ve sonrası öğütme süreleri için puzolanik özellik gösterebilecek özgül yüzey alan değerlerine sahip olduğu kabul edilmiştir.
- 90 günlük puzolanik aktivite sonuçlarına göre ÇYH uçucu külünün tüm öğütme süreleri için puzolanik özellik gösterdiği tespit edilmiştir. AE uçucu külünün tüm öğütme süreleri için puzolanik aktivite göstermediği görülmüştür. ÇYH uçucu külünün orijinal durumdan 60 dk öğütme süresi ile 90 günlük puzolanik aktivite indeksi değerleri arasında % 6,05 seviyelerinde, AE uçucu külü için bu değer % 2,89 seviyelerinde kalmıştır.
- AE uçucu kül katkılı karışımların 28 ve 56 günlük kapilarite katsayı değerleri öğütme süresinin artışı ile azalmış, çimento içerisine ikame edilen kül miktarı artışı ile artmıştır. % 10 AE uçucu kül katkılı karışımların 28 ve 56 günlük kapilarite katsayı değerleri referans numunenin kapilarite katsayı değerinden düşük, % 30 ve % 50 ikameli karışımlarda yüksek çıkmıştır. 90 günlük kapilarite katsayı değerleri öğütme süresi ve ikame oranı artışına bağlı olarak azalmış ve referans numunenin kapilarite katsayı değerine göre düşük çıkmıştır.
- AE uçucu külü ile hazırlanan katkılı çimentoların 28 ve 56 günlük kür sürelerinde uçucu külün tüm öğütme süreleri arasında en düşük geçirimsizlik özelliği % 10 ikameli karışımlardan elde edilmiştir. 90 günlük kür süresinde AE uçucu külünün tüm öğütme süreleri ve ikame oranları ile hazırlanan karışımlarla daha yüksek geçirimsiz özelliğe sahip çimento üretilebileceği öngörülmüştür.
- ÇYH uçucu kül katkısı ile hazırlanan karışımların 28, 56 ve 90 günlük kür süresi sonrasında öğütme ve ikame oranı artışına bağlı olarak referans numuneye göre daha yüksek geçirimsizlik özelliği göstermiştir.
- Farklı öğütme süreleri ve ikame oranlarında çimento bileşiminde kullanılan AE uçucu külü 28 ve 56 günlük kür süresinde geçirimsizliği ÇYH uçucu kül katkılı karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi ÇYH uçucu külü karışım içerisinde kapilar kanalları daha iyi tıkayabilecek tane boyutuna sahip olması sonucu geçirimsizliği arttırmıştır. Kür süresinin artmasına bağlı olarak geçirimsizliğin artması uçucu küllerin puzolanik aktivitesinin gelişmesi ile açığa çıkardığı CSH jellerinin boşlukları doldurarak ve geçirimsizliliği arttırmaya katkı sağlamıştır.

- Boşluk tayini analiz sonucuna göre AE uçucu kül ikameli 90 günlük numune hariç aynı külün 7 günlük, ÇYH uçucu külün ise 7 ve 90 günlük numunelerinin boşluk oranı referans numunenin boşluk oranından düşük değerler aldığı görülmüştür. Uçucu küllerin öğütme ile tane boyutunun küçülmesi ve öğütme ile puzolanik aktivitenin gelişmesi sonucu karışımda boşluk oranını azaltıcı etki yaratmıştır.
- Termal analiz sonucuna göre AE ve ÇYH uçucu küllerin orijinal ve öğütülmüş durumları ile hazırlanan karışımların tüm kür sürelerinde çimento hidrasyonunu geliştirdiği belirlenmiştir. Öğütmenin etkisi ile puzolanik aktivitenin erken başlamasını, reaksiyonun yüksek ve hızlı olmasına katkı sağladığı tespit edilmiştir. Öğütmenin etkisi ile uçucu küllü karışımların 3 günlük kür süresi sonrasında fiziksel dolgu ve mikro agrega etkisi yaparak dayanım değerlerinin yüksek olmasına katkı sağlamıştır. Ayrıca öğütülmüş uçucu kül katkılı çimento pastalarının orijinal uçucu kül katkılı pastalara göre sertleşmiş pastanın boşluk yapısını iyileştirmeye katkı sağlamış ve bu durum yapılan kapilarite deneyi sonucu göre geçirimsizlik değerlerinin azalması ile ortaya konulmuştur. AE ve ÇYH uçucu kül katkılı pastalarda çimentoya ikame edilmesi ile erken yaşlarda hidrasyon için mikro agrega olarak bağlayıcının boşlukları doldurması ve hidrasyon ürünleri için çekirdek alan olarak davranma etkisi oluşturduğu yapılan basınç dayanımı, geçirimsizlik deneyleri ve boşluk tayini analizi sonuçlarına göre tamamen destekleyici nitelikte olduğu görülmüştür.
- Uzun dönemde ise uçucu küllerin çimentoya ikame edilmesi ile hidrasyon üzerindeki etkisi, kimyasal reaksiyon şeklinde olup çimento hidrasyonu sonucu oluşmuş Ca(OH)_2 ile reaksiyona girmesi ile C-S-H jeli oluşturmasına katkı sağlamıştır. Bu katkı sonucu numunelerin uzun dönem basınç dayanım değerlerini arttırdığı yapılan basınç dayanım testleri ile doğrulanmıştır.

5. KAYNAKLAR

- Açıkğöz, Y., 2008. Uçucu Küllerin Beton Kilitli Parke Taşı Üretiminde Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara ,1-61.
- Ahmaruzzaman, M., 2010. A Review on the Utilization of Fly Ash, Progress In Energy And Combustion Science, 3, 36, 327-363.
- Akar, G., Sen, S., Yılmaz, H., Arslan, V. ve İpekoğlu, U., 2013. Characterization O Ash Deposits from the Boiler of Yenikoy Coal-Fired Power Plant, Turkey, International Journal of Coal Geology, 105, 85-90.
- Akkaya, B. ve Toroğlu, İ., 2017, Uçucu Külün Boyutu ile Pozolanik Aktivite Arasındaki İlişkinin İncelenmesi, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 7, 412-418.
- Alam, J. and Akhtar, M.N. 2011. Fly Ash Utilization in Different Sectors in Indian Scenario, International Journal Of Emerging Trends in Engineering and Development, 1-14
- Abualrous, Y., 2017. Characterization of Indian and Canadian Fly Ash for Use in Concrete, A Thesis Submitted in Conformity with the Requirements for the Degree of Master of Applied Science Department of Civil Engineering University, Toronto, 1-171.
- Anuk, O., 2004. CEM I 42.5 Çimentolu Düşük Dozajlı Betonlarda F Tipi Uçucu Külün Etkinliği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-97.
- Anwar, I.I., 2010. Katkıların Beton Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-84.
- Aruntaş, H.,Y., 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21, 1, 193-203.
- ASTM C 618-12, 1994. Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, Annual Book of ASTM Standarts, Pennsylvania, 3, USA.
- ASTM C 618, 1997. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standarts, 3, Pennsylvania, USA.
- ASTM C 430, 2003. Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-µm (No. 325) Sieve, American Society for Testing and Materials, 3, America.

- ASTM C 618-05, 2005. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM (American Society for Testing and Materials), 3, Amerika.
- ASTM C 204, 2007. Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, American Society for Testing and Materials, 8, America.
- ASTM C 1585 -04, 2007. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes, American Society for Testing and Materials, 6, America.
- ASTM C 109/ C 109 M-07, 2008. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), American Society for Testing and Materials, 9, America.
- ASTM D 2216, 2014. Standart Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, American Society for Testing and Materials, 7, America.
- Atakay, O. 2006. Uçucu küllerin Katkılı Çimento Üretiminde Kullanılması-Tane İnceliği ve Katkı Miktarının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Aydın, S., Karatay, Ç. ve Baradan, B., 2010. The Effect of Grinding Process on Mechanical Properties and Alkali-Silica Reaction Resistance of Fly Ash Incorporated Cement Mortars, Powder Technology, 197, 68–72.
- Aytekin, S., 2009. Uçucu Küllerin Killi Zeminlerin İslahında Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 1-83.
- Awang, A.R., Marto, A. and Makhtar, A.M., 2012. Morphological and Strength Properties of Tanjung Bin Coal Ash Mixtures for applied in Geotechnical Engineering Work, International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology, 2, .2, 8.
- Baert1, G., Hoste, S., Schutter, G. D. and Belie, N., 2008. Reaktivite of Fly Ash in Cement Paste Studied by Means of Termogrevimetry and Isothermal Calorimetry, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 94, 2, 485–492.
- Baharavar, S.R., 2012. Karbonatlaşmanın Çelik Lifli ve Uçucu Küllü Betonlarda Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-88.
- Bakan, G. 2008. Türkiye’de ÇED Uygulamaları Samsun Termik Santrallerine Çarpıcı Örnek, Kasım 2008, Samsun, TMMOB Samsun Kent Sempozyumu, 97.
- Barış, K., 2011. The Role of Coal in Energy Policy and Sustainable Development of Turkey: Is it t the Energy Policy, Energy Policy, 39, 1754-1763.

- Basirun, N.F., Ibrahim, M.H.W., Jamaludin, N. And Jaya,R.P., 2017. A Review: the Effect of Grinded Coal Bottom Ash on Concrete, MATEC Web of Conferences, Nisan,Wuhan, Chin, 103.
- Başar, M., Pelitli, V. ve Güzel, B., 2016. Termik santrallerden kaynaklanan küllerin yönetimi-uygulama örnekleri, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü raporu.
- Bediako, M., 2018. Pozzolanic Potentials and Hydration Behavior of Ground Waste Clay Brick Obtained from Clamp-Firing Technology, Case Studies in Construction Materials, 8, 1-7.
- Berktaş, A., 2007. Pomza ve Uçucu Kül Kullanılarak İmal Edilen Hafif Betonların Agresif Su Ortamlarında Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1-100.
- Bilir, T., Gencil, O., ve Topcu, İ.B., 2015. Properties of mortars with fly ash as fine aggregate, Construction and Building Materials, 93, 782-789.
- Binici, H., Görürü, E.B. ve Durgun, Y., 2009. Afşin-Elbistan Uçucu Külü ve Tekstil Fabrikaları Atık Küllerin Betonda Puzolanik Katkı Olarak Kullanımı, KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12, 1, 10-19.
- Bouzoubal, N., Zhang M.H., Bilodeau, A., and Malhotra, V.M., 1997. The Effect of Grinding on the Physical Properties of Fly Ash and A Portland Cement Clinker, Cement and Concrete Research, 27, 12, 1861-1874.
- Bremseth, S.K., 2010. Fly Ash in Concrete a Literature Study of the Advantages and Disadvantages, COIN Project report 18, SINTEF Building and Infrastructure.
- Bulut, Ü., 2007. Perlitin Puzolanik Aktivitesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,1-162.
- Bumrongjaroen,W., S. M., Isabelle, Pegg, I. L., 2007. Characteritazion of Glassy Phase in Fly Ash From Iowa State University, Technical Report, Vitreous State Laboratory the Catholic University of America Washington, DC 20064.
- Bumrongjaroen, W., 1999. Utilization of Processed Fly Ash in Mortar, a Dissertation Submitted to the Faculty of New Jersey Institute of Technology in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor o f Philosophy Departm ent of Civil and Environmental Engineering, USA.
- Camões, A., Rocha, P., Jalali, S. Aguiar, J.L.B., Delgado,R. High Performance Concrete Using Fly Ash, Third International Conference, Volume: ACI (American Concrete Institute) Special Publication, SP-207.
- Casarez, C.A.R., Rea,S.P.A., Enríquez, A.C., 1, Higuera, R. C., Manuel , M.J.P., Soberón, J.M.G. and Serna, T.J.M., 2018. Influence of Size Reduction of Fly Ash Particles by Grinding on the Chemical Properties of Geopolymers, Applied Sciences, 8, 365.

- Chaipanich, A. and Nochaiya, T., 2009. Thermal Analysis and Microstructure of Portland Cement-Fly Ash-Silica Fume Pastes, Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry, 99, 487–493.
- Cheerarat, R. and Jaturapitakkul, C., 2004. A study of Disposed Fly Ash From Landfill to Replace Portland Cement, Waste Manage, 24,7, 701-709.
- Chen, S.S., 1984. Correlation of Fly Ash Characteristics with Pozzolanic Behavior, Dissertation Partial Satisfaction of the Requirements for The Degree Of Doctor Of Philosophy In Engineering in The Graduate Division Of The University Of California, Berkeley, 1-57.
- Chindapasit, P., Homwuttiwong, S. and Sirivivatnanon, V., 2003. Influence of Fly Ash Fineness on Strength, Drying Shrinkage and Sulfate Resistance of Blended Cement Mortar, Cement and Concrete Research, 34, 1087–1092.
- Chindapasirt, P., Chai, J. and Sinsiri, T., 2005. Effect of Fly Ash Fineness on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste, Cement and Concrete Research, 27, 425–428.
- Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsir, T., 2007. Effect of Fly Ash Fineness on Microstructure of Blended Cement Paste, Construction and Building Materials, 21, 1534–1541.
- Choi, S. J., Lee, S. S., Monteiro, P.J. M., ASCE, M., 2012. Effect of Fly Ash Fineness on Temperature Rise, Setting, and Strength Development of Mortar, Journal Of Materials in Civil Engineering, 24, 499-505.
- Çavuşoğlu, İ., 2008. Uçucu Küllerin Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılması: Örnek Bir Uygulama (Çayırhan), Madencilik, 47, 3, 3-13.
- Çavuşoğlu, İ., 2013. Kimyasal Katkıların Uçucu Küllü Dolgularda Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1-201.
- Çelik, H.M., Aruntaş, H.Y. ve Baran, Y., 2003. Seytömer ve Çayırhan Uçucu Küllerinin Portland (PÇ-UK) Hamurunun Priz Başlama ve Sonu Süresine Etkisi, Politeknik Dergisi, 6, 1, 397-409.
- Çelik, Ö., 2004. Farklı İnceliklerdeki Tras ve Uçucu Külün Çimento Dayanımlarına Etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10, 3, 333-337.
- Çinçin, Y., 2015. Linyit Yakan Termik Santral Uçucu Küllerinden Kireç Katkısı ile Hafif Tuğla Üretiminin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 1-72.
- De Belie, N., Scrivener, K.L., Lothenbach, B., Gruyaert, E., Skibsted, J., Snellings R., Vollpracht, A. Villagran, Y., 2015. Determination of the Degree of Reaction of Fly Ash in Blended Cement Pastes, October, Beijing, 14th International Congress on the Chemistry of Cement, 1-12.

- Deboucha,W., Leklou, N., Khelidj,A., and Oudjit, M.N., 2017. Hydration Development of Mineral Additives Blended Cement Using Thermogravimetric Analysis (TGA): Methodology of Calculating the Degree of Hydration, Construction and Building Materials, 146, 687–701.
- Dembovska, L., Bajarea, D., Pundieneb, I. and Vitol, L., 2017. Effect of Pozzolanic Additives on the Strength Development of High Performance Concrete, Procedia Engineering, 172, 202–210.
- Dhamsaniya, R. G., 2011. Comprehensive Study of Fly Ash Mixed Reinforced Concrete in Aggressive Conditions for Foundation and Super Structure, PhD Thesis, Sardar Patel University, Sophisticated Instrumentation Center for Applied Research and Testing, INDIA.
- Demir, İ., Başpınar, M.S., Görhan, G., ve Kahraman, E., 2008. Seyitömer Uçucu Külü ve Afyonkarahisar Yöresi Volkanik Tüflerinin Puzolanik Özelliklerinin Belirlenmesi, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi,1, 39-46.
- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B. ve Uçar, A., 2010. Uçucu Kül Katkılı Çimento Hidratasyonuna Elektrokinetik Özelliklerin Etkileri, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25, 3, 449-457.
- Durmuş, G., 2008. Farklı Beton Sınıflarının Su İşleme Derinliğinin Değerlendirilmesi, Journal Of Poltechnic, 11, 4, 379-383.
- Dvořák,K. and Hájková, I.,2015. The Effect of High-Speed Grinding Technology on the Properties of Fly Ash, Materials and Technology, 50, 683-687.
- Dwivedi, A., and Jain, M.K, 2014. Fly Ash–Waste Management and Overview: A Review, Recent Research in Science and Technology, 6, 1, 30-35.
- ENV 197-1, 1994. Cement-Composition, Specifications and Conformity Criteria-Part 1: Common Cements, CEN, America.
- Erdemiş, S., 2001. Termik Santral Artık Uçucu Küllerinin Sinterleme Davranışına B203'ün Etkisi, Bitirme Ödevi, Sakarya Üniversitesi.
- Erdoğdu, K., ve Türker, P., 1998. Effects Of Fly Ash Particle Size on Strength of Portland Cement Fly Ash Mortars, Cement and Concrete Research, 28, 1217–1222.
- Erdoğan, S.T. ve Erdoğan, T.Y., 2007. Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri, , 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Nisan 2007, Ankara, 263-275.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Coal. Info Bank > Energy > Coal 2017. (<http://www.enerji.gov.tr>) (06.03.2018).
- Fathi, M.S., 2012. Civil Engineering Materials Lecture Notes, Department of Civil Engineering RAZAK School of Engineering & Advanced Technology .

- Felekoğlu, B., Türkel, S., ve Kalyoncu, H., 2009. Optimization of Fineness to Maximize the Strength Activity of High-Calcium Ground Fly Ash–Portland Cement Composites, Construction and Building Materials, 23, 2053–2061.
- Felekoğlu, K.T. 2014. Çimentoların Genel Özellikleri ve Deneyleeri, Yapı Malzemesi II Dersi, Beton Teknolojisi Bağlayıcı Maddeler; Çimento, 1-110.
- Feng, J., Sun, J. and Yan, P., 2018. The Influence of Ground Fly Ash on Cement Hydration and Mechanical Property of Mortar, Hindawi (Advances in Civil Engineering), 2018, 7.
- Fu, X., Wanga, Z., Tao, W., Yang, C., Hou, W., Dong, Y. and Wu, X., 2002. Studies on Blended Cement with a Large Amount of Fly Ash, Cement and Concrete Research, 32: 1153-1159.
- Fulekart, M. H. and Dave, J. M., 1986. Disposal of Fly Ash-An Enviromental Problem, Internatioanl Journal Environmental Studies, 1986, 26, 191-215.
- Gad, E.A.M., Habib, A.O., Mousa, M.M., 2017. Understanding the Mechanism of Decomposition Reactions of Neat and Superplasticized ordinary Portland Cement Pastes Using Thermal Analysis, Journal of Silicate Based and Composite Materials, 69, 3, 102-107.
- Gao, P., Ye, G., Wei, J. and Yu, Q., 2015. Multi-Scale Simulation of Capillary Pores and Gel Pores in Portland Cement Paste, 14th International Congress on the Chemistry of Cement, October, Beijing, China, 1-14.
- Georgakopoulos, A., 2003. Chemistry and Morphology of Fly Ash Samples from the Main Lignite Power Stations of Northern Greece, 8th Interntional Conference on Enviromental Science and Technology Lemnos Island, September, Athens, Greece, 256-263.
- Gikunoo, E., 2004. Effect of Fly Ash Particles on the Mechanical Properties and Microstructure of Aluminium Casting Alloy A535, Degree of Master of Science in the Department of Mechanical Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 1-136.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S. ve Demir, İ., 2009. Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 5, 2, 33-42.
- Guo, X., Shi, H., Dick, W. A., 2010. Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer, Cement & Concrete Composites, 32, 142-147.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S., Demir, Ğ., 2008. Uçucu Kül Bölüm 1: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 1305-631, 85-94.

- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H. 2005. Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuar (IMCET), Haziran, İzmir, 419-423.
- Günindi, İ., 2005. Yumurtalık Sugözü Uçucu Külü İçeren Betonların Basınç, Eğilme ve Aşınma Dayanımlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 1-67.
- Gürbüz, E., 2009., C Tipi Uçucu Küllerin Etkinliği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-97.
- Haque, M.N., Kayali, O., 1998. Properties of High-Strength Concrete Using a Fine Fly Ash, Cement and Concrete Research, 28, 1445–1452.
- He, X., Miao, C. Wu, Y., Cao, X. ve Liu, D., 2014. Thermal Reaction Kinetics of Fly Ash Cement Paste at the Age of 28 Days, Applied Mechanics and Materials Vols., 668-669, 91-94.
- Hefni, Y., Zaher, Y.A.E. and Wahab, M.A., 2018, Influence of Activation of fly Ash on the Mechanical Properties of Concrete, Construction and Building Materials, 172, 728–734.
- Hela, R. ve Orsàková, D., 2013. The Mechanical Activation of Fly Ash, Procedia Engineering, 65, 87-93.
- Hoffman, G.K., 2006. Pozzolans and Supplementary Cementitious Materials: In Kogel, J.E. Trivedi, N.C., Barker, J.M., and Krukowski, S.T., eds., .Industrial Minerals and Rocks 7th Edition, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, CO, 1161-1172.
- Hsu, S., Chi, M. ve Huang, R., 2018. Effect Of Finess and Replacement Ratio of Ground Fly Ash on Properties of Blended Cement Mortar, Construction and Building Materials, 176, 250-258.
- Hu, C., 2014, Microstructure and Mechanical Properties of Fly Ash Blended Cement Pastes, Construction and Building Materials, 73, 618–625.
- Joshi, R.C., 1970. Pozzolan Reactions in Synthetic Fly Ashes, A Dissertation Submitted to the Graduate Faculty in Partial Fulfillment of The Requirements for the Degree of Doctor Of Philisophy, Iowa State University, Ames, Iowa, 1-215.
- Jun-yuan, H., Scheetz, B.E. and Roy, D.M., 1984. Hyration of Fly Ash-Portland Cements, Cement and Concrete Research, 1, 505-512.
- Kaplan, G. ve Gültekin, A.B., 2010. Yapı Sektöründe Uçucu Kül Kullanımının Çevresel ve Toplumsal Etkiler Açısından İncelenmesi, International Sustainable Buildings Symposium, Mayıs, Ankara, Türkiye, 59-64.
- Karahan, O., 2006. Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 1-256.

- Karayığit, A.I., Gayer, R.A, Querol, X.and Onacak, T., 2000. Contents of Major and Trace Elements in Feed Coals From Turkish Coal-Fired Power Plants, Applied Geochemistry, 44, 169-184.
- Karayığit, A.I., Onacak, T., Gayer, R.A. and Goldsmith, S., 2001. Mineralogy and Geochemistry of Feed Coals And Their Combustion Residues from the Çayirhan Power Plant, Applied Geochemistry, 16, 911-919.
- Karim, M. R., Zain, M. F. M., Jamil, M. , Lai, F. C. and Islam, M. N., 2011. Strength Development of Mortar and Concrete Containing Fly ash: a Review, International Journal of the Physical Sciences, 6, 17, 4137-4153.
- Karthikeyan, B. and Dhinakaran, G., 2014. Effect of Grinding on Physico-Mechanical Properties of Ultra-Fine Micro-Silica, Asian Journal of Applied Sciences, 7, 182-193.
- Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S. and Chutubtim, S., 2001. A Study of Ground Coarse Fly Ashes with Different Finenesses from Various Sources as Pozzolanic Materials, Cement & Concrete Composites, 23, 335-343.
- Kılınçkale, F.M., 1996. Çeşitli Puzolanların Puzolanik Aktivitesi ve Bu Puzolanlarla Üretilen Harçların Dayanımı, İMO Teknik Dergisi, 1217-1229.
- Koçak, Y., 2011. Termik Santral Atığı Uçucu Külün Portland Çimentosu Özelliklerine Etkisi, Politeknik Dergisi (Journal of Polytechnic), 14, 2, 135-140.
- Koçak, Y., ve Nas, S., 2014. The Effect of Using Fly Ash on the Strength and Hydration Characteristics of Blended Cements, Construction and Building Materials, 73, 25-32.
- Kosmatka, S. H., B. Kerkhoff, and W. C. Panarese. 2002. Design and Control of Concrete Mixtures, Engineering Bulletin 001. Skokie, IL: Portland Cement Association.
- Koukouzas, N., Hämäläinen, J., Papanikolçou, D., Tourunen, A. and Jäntti, T., 2007. Mineralogical and Elemental Composition of Fly Ash From Pilot Scale Fluidised Bed Combustion of Lignite, Bituminous Coal Wood Chip and Their Blends, Fuel, 86, 2186-2193.
- Kurugöl, S., 2017. Puzolanik Aktivite Tespit Yöntemleri: Fiziksel Metotlar, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi (CFD), 38, 1, 21-39.
- Kölemen, Ş., 2012. Farklı Bölgelerden Alınan Uçucu Küllerin Ağır Metal İyonlarının Adsorbansında Kullanımının Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,1-145.
- Köleli, Y., 2015. TR63 Bölgesi Çimento Sektör Raporu, Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı, 1-26.
- Leonard, R.J.,1958., The Pozzolanic Activity of Certain Fly Ash and Soil Minerals, a Dissertation Submitted to the Graduate Faculty in Partial Fulfillment of The

- Requirements for the Degree of Doctor Of Philosophy, Iowa State College, 1-114.
- Lohtia, R.P. and Joshi, R.C.,1995. Mineral Admixtures in Concrete Admixtures Handbook, Edited by V.S. Ramachandran, Park Ridge, Noyes Publications, 657-731.
- Lothenbach, B., Scrivener, K. and Hooton, R.D., 2011. Supplementary Cementitious Materials, Cement and Concrete Research, 41, 1244–1256.
- Malhotra, V.M. and Metha, P. K. 2005. High-Performance High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction practice, and Case Histories, Second edition.
- Malhotra, V.M., and Mehta, P.K., 1996. Pozzolan and Cementitious Materials, Edited by V.M. Malhotra.Ottawa, Canada: Gordon and Breach Publishers. 1, 1-191.
- Monteagudo, S.M., Moragues, A., Gálvez, J.C., Casati, M.J. ve Reyes, E., 2014. The Degree of Hydration Assesment of Blended Cement Pastes by Differential Thermal and Thermogravimetric Analysis. Morphological Evolution of the Solid Phases, Thermochimica Acta, 592, 37-51.
- Mucsi, G., 2016. Mechanical Activation of Power Station Fly Ash By Grinding – A Review, Journal Of Silicate Based and Composite Materials, 68, 2, 56-61.
- Mydraboina, H., Setunge, S. and Patnaikuni, I., 2017. Pozzolan Index and Lime Requirement of Low Calcium Fly Ashes in High Volume Fly Ash Mortar, Construction and Building Materials, 131, 690–695.
- Naganathan, S. ve Linda, T., 2013. Effect of Fly Ash Fineness on the Performance of Cement Mortar, Jordan Journal of Civil Engineering, 7, 3,326 – 331.
- National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), Concrete in Practice, CIP 30 Supplementary Cementitious Materials, 2000. Technical Information Prepared by NRMCA, 2.
- Nochaiya, T., Wongkeo, W., Pimraksa, K. and Chaipanich, A., 2010. Microstructural, Physical and Thermal Analyses of Portland Cement-Fly Ash-Calcium Hydroxide Blended Paste, J Therm Anal Calorim, 100, 101-108.
- Öksüz, K., 2006. Afşin-Elbistan Termik Santralı Uçucu Külünün Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 1-91.
- Özdemir, O., 2001. Tunç Bilek Termik Santrali Uçucu Küllerinin Karakterizasyonu ve Yan Ürünlerinin Eldesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-96.
- Özdemir, O., 2007. Uçucu Külün Yapı Malzemelerinde Bağlayıcılığa Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-88.

- Payá, J., Monzo, J., Borrachero, M.V. and Peris, E., 1995. Mechanical Treatment of Fly Ashes .Part I: Physico-Chemical Characterization of Ground Fly Ashes, Cement and Concrete Research, 25, 7, 1469-1479.
- Payá, J., J. Monzó, Borrachero, M.V., Peris-Mora, E. and González-Lopez, E.,1996. Mechanical Treatment of Fly Ashes .Part II: Particle Morphologies in Ground Fly Ashes (GFA) and Workability of GFA-Cement Mortars, Cement and Concrete Research, 26, 2, 225-235.
- Rajak, D.K., Raj, A., Guria, C. and Patha, A.K., 2017. Grinding of Class-F Fly Ash Using Planetary Ball Mill: A Simulation Study to Determine the Breakage Kinetics by Direct- and Back-Calculation Method, South African Journal of Chemical Engineering, 24, 135-147.
- Rajamma, R., 2011. Biomass Fly Ash Incorporation in Cementbased Materials, Thesis Submitted to University of Aveiro in Partial Fulfillment of the Requirements for Obtaining the Degree of Doctor of Philosophy In Materials Science Engineering, 34-261.
- Reddy, P.N., Kavyateja, B.V. and Reddy, G.G.K., 2016. An Experimental on Use of Fly Ash Pellets in Concrete in Place of Granite Aggregate, International Journal of Research And Innovation (IJRI), 3, 234-240.
- Rukzon, S., Chindapasirt, P. and Mahachai, R.,2009. Effect of Grinding on Chemical and Physical Properties of Rice Husk Ash, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 16, 2, P. 242-247.
- Saha, A.K., 2017. Effect of Class F Fly Ash on the Durability Properties of Concrete, Sustainable Environment Research, 1-26.
- Sahu, B.K. and Jayaram, S., 2000. Environmental Impacts of Fly Ash, Botswana Journal of Technology, 9, 1, 9-13.
- Sahzabia, A.Y., Yucesoy, E.U., Sasakia, K., Yuosefic,H., Sugai, A.W.Y.,2017. Turkish Challenges for Low-Carbon Society: Current Status, Government Policies and Social Acceptance, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68,596–608.
- Saikia, P.B., 2000. An Investigation on Pozzolanic Characteristics of Some Clay and Rice Husk Ash for Making Blended Cement, A Thesis Submitted for the Award of Degree of Philosophy of Gauhati Uviversity in Chemistry, India, 1-218.
- Shaikh, F.U.A. and Supit, S.W.M., Compressive Strength and Durability Properties of High Volume Fly Ash (HVFA) Concretes Containing Ultrafine Fly Ash (UFFA), Construction and Building Materials, 82, 92-205.
- N.P.,2006. Lignite-Fired Thermal Power Plants and SO₂ Pollution in Turkey, Energy Policy, 34, 2690-2701.
- Sevim, U.K., 2003. Afşin–Elbistan Uçucu Külünün Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanılabilirliğinin Çimento Hamuru ve Harçlarının Üzerinde Yapılacak

Deneylerle Araştırılması, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

- Shafiq, N. and Nuruddin, M. F., 2010. Degree of Hydration of OPC/Fly Ash Paste Samples Conditioned at Different Relative Humidity, Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology, 1, 1, 47-56.
- Shi, C., 1992, Activation of Natural Pozzolans Fly Ashes and Blast Furnace Slag, a Thesis Submitted to the Faculty of Graduates Studies in Partial Fulfilment of the Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy Department of Civil Engineering, Calgary, Alberta, 1-201.
- Singh, P., Shah, N.D. and Majumdar, P.K., 2018. Influence of Fly Ash on Fineness, Porosity and Permability of Fly Ash Blended Cement Paste, International Research Journal of Engineering and Technology, 5, 01, 1056-1058.
- Sinsiri, T. Teeramit, P., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K., 2006. Effect of Finenesses of Fly Ash on Expansion of Mortars in Magnesium Sulfate, Science Asia, 32, 63-69.
- Sinsiri, T., Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C., 2010. Influence of Fly Ash Fineness and Shape on the Porosity and Permeability of Blended Cement Pastes, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 17, 6, 683-690.
- Skoog, D.A. and West, D.M., 1981. Principles of Instrumental Analysis, Thermal Processing Technology Center Illinois Institute of Technology, II. Ed, 1039.
- Skoog, D.A., Holler, F. J. and Nieman, T.A, 1998. Enstrümental Analiz İlkeleri, Çev. Editörleri, E. Kılıç, F. Köseoğlu, H. Yılmaz, Bilim Yayıncılık.
- Sounthararajan, V.M., and Sivakumar, A., 2012. Experimental Studies on the Effect of Fineness of Fly Ash Particles on the Accelerated Properties, ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences (ARPJ), 7, 12, 1644-1651.
- Sözen, A., Alp, İ. ve Özdemir, A., 2010. Assessment of Operational and Environmental Performance of the Thermal Power Plants in Turkey by Using Data Envelopment Analysis, Energy Policy, 38, 6194–6203.
- Supit, S.W.M. and Shaikh, F.U.A., 2015. Durability Properties of High Volume Fly Ash Concrete Containing Nano-Silica, Materials and Structures, 48, 8, 2431–2445.
- Szabo, R., Gombkötö, I., Sveda, M. and Mucsi, G., 2017. Effect of Grinding Fineness of Fly Ash on the Properties of Geopolymer Foam, Archives of Metallurgy and Materials, 62, 1257-1261.
- Şengül, Ö., Taşdemir, M.A. ve Gjørv, O.E., 2007. Puzolanik Malzemelerin Betonun Mekanik Özellikleri ve Klor İyonu Yayınımına Etkisi, İTÜ Mühendislik Dergisi, 6, 1, 53-64.

- Tang, S.W., Cai, X.H., He, Z., Shao, H.Y., Li, Z.J. and Chen, E., 2016. Hydration Process of Fly Ash Blended Cement Pastes by Impedance Measurement, Construction and Building Materials, 113, 939–950
- Tangpagasit, J., Cheerarot, R., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., 2005. Packing Effect and Pozzolanic Reaction of Fly Ash in Mortar, Cement and Concrete Research, 35, 1145– 1151.
- Taylor, P. C., S. H. Kosmatka, G. F. Voigt, M. E. Ayers, A. Davis, G. J. Fick, J. Grove, D. Harrington, B. Kerkhoff, H. C. Ozyildirim, J. M. Shilstone, K. Smith, S. Tarr, P. D. Tennis, T. J. Van Dam, and S. Waalkes, 2006. Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavements: A State-of-the-Practice Manual. FHWA-HIF-07-004. Federal Highway Administration.
- Tekin, İ., ve Tekin, D., 2018. Taban Külü İkame Edilmiş Kompoze Çimentolarda Süperakışkanlaştırıcı Etkisinin Araştırılması, Politeknik Dergisi, 21,1, 39-46.
- Thomas, M.D.A., Shehate, M.H. and Shashiprakash, S.G., 1999. The Use of Fly Ash in Concrete: Classification by Composition, Journal of Cement, Concrete and Aggregates, 21, 2, 105-110.
- Thomas M. D. A., and M. L. Wilson. 2002. Admixtures for Use in Concrete. CD-ROM CD039. Skokie, IL: Portland Cement Association.
- Thomas, M., 2007. Optimizing the use of fly ash in concrete, PCA (America's Cement Manufactures).
- Tikalsky, P.J. and Huffman, M.V., 2001. Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete, Reported by ACI Committee, 232 ACI 232.1R-00.
- Tiwari, M.K., Bajpai, S., Dewangan, U.K., 2016. Fly Ash Utilization: A Brief Review in Indian Context, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 03, 04, 949-956.
- Türk Mühendis ve Mimarlar Odası Birliği (TMMOB), 2017. Türkiye’de Termik Santraller, YAYIN NO: MMO/668.
- Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), 2019. Aylık İstatistik Veriler, 1.
- Toniolo N., and Boccaccini, A.R., 2017. Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste. A review, Ceramics International, 43, 14545–14551.
- Topçu, İ.B. ve Canbaz, M., 2001. Uçucu Kül Kullanımının Betonda Etkisi, 1, Mehmet Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi, XIV, 2, 11-23.
- Topçu, İ.B. ve Karakurt, C., 2007. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun çimento üretiminde katkı olarak kullanımı, 7. Ulusal Beton Kongresi, Kasım, İstanbul, 395-404.
- Toplan, N. 2013. Porozlu Malzemeler-8, Sakarya Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Bölümü Ders Notları.

- TS EN 196-3, 2002. Çimento Deney Metotları- Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi, Türk Standartları Enstitüsü, 27, Ankara.
- TS EN 196-1, 2002. Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım, Türk Standartları Enstitüsü, 24, Ankara.
- TS EN 772-11, 2002. Kagir birimler-Deney Metotları-Bölüm 11: Betondan, Doğal ve Yapay Taştan Yapılmış Kagir Birimlerde Kapiler Su Emme ve Kil Kagir Birimlerde İlk Su Emme Hızının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, 24, Ankara.
- TS EN 196-2, 2002. Çimento Deney Metotları- Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi, Türk Standartları Enstitüsü, 27, Ankara.
- TS EN 196-3+ A1, 2010. Çimento Deney Metotları- Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, 10, Ankara.
- TS EN 196-6, 2010. Çimento Deney Yöntemleri- Bölüm 6: İncelik Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, 13, Ankara.
- TS EN 197-1, 2012. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, 29, Ankara.
- TS EN 196-5, 2012. Çimento Deney Metotları- Bölüm 5: Puzolanik Çimentolarda Puzolanik Özellik Deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, 8, Ankara
- TS EN 450-1/A1, 2013. Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Bölüm:1 Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, 27, Ankara.
- TS 25, 2015. Doğal Puzolan (Tras)-Çimento ve Betonda Kullanılan-Tarifler, Gereklere ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, 14, Ankara.
- Türkenoğlu, M., 2010. Uçucu Küllerin Liç Karakteristiklerinin ve Çevreye Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 1-133.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinoğlu, A., Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, 4. Baskı, Fersa Matbaacılık, Ankara, 2009, Türkiye Çimento Müstahsiller Birliği, Ar-Ge, Y03.03.
- Ulubaş, T., 2000., Uçucu Küllerin Ağır Metal (Cu^{2+} ve Pb^{2+}) Gideriminde Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- URL 1, <http://www.enerjiatlas.com/komur/>, 1 Mart 2018.
- URL 2, <https://www.slideshare.net/safab/nkleer-enerji>, 10 Mart 2019
- URL 3, <https://www.slideshare.net/DoganDOGRAMACI/uucu-kuller-in-imentoteknolojisinde-kullanilmasi>, 3 Şubat 2019.

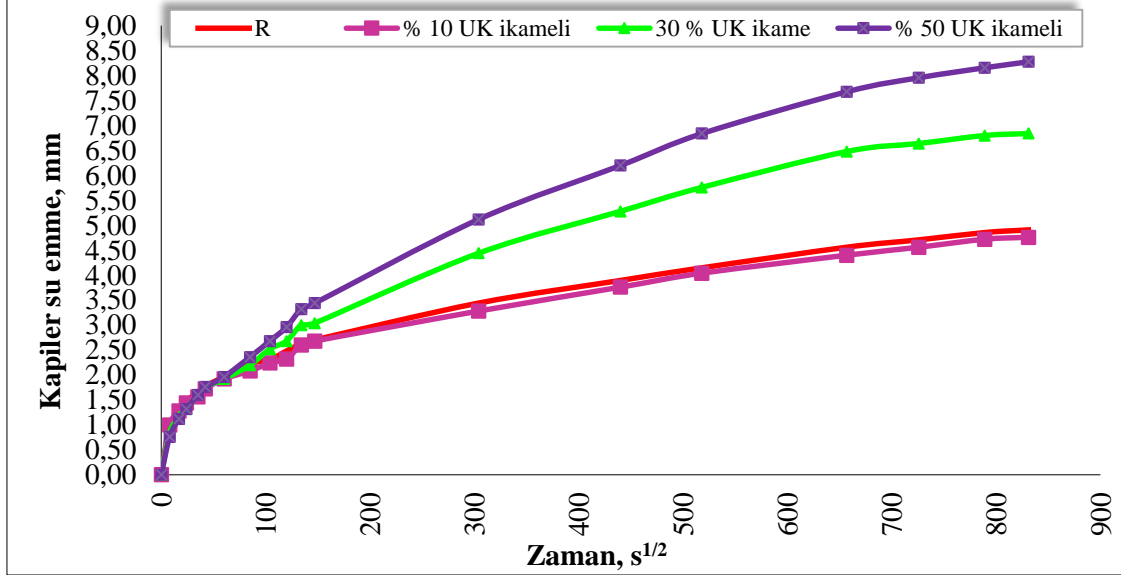
- URL 4, <http://slideplayer.com/slide/5701612>, 13 Mayıs 2018.
- URL 5, <https://theconstructor.org/building/composition-of-portland-cement/5725>, 20 Mayıs 2018.
- URL 6, <http://maerker-gruppe.net/en/products/trass/product-informations.html/>, 15 Mart (Tras) 2018.
- URL7, <https://ipfs.io/ipfs/QmT5NvUtoM5nWFfrQdVrFtvGfKFmG7AHE8P34isapyhCxX/wiki/Felsik.html>, 15 Mart 2018 (Riyolit-volkanik cam)
- URL 8, <http://organikhabitat.blogspot.com.tr/2016/08/tarmda-pomza-tasbims-hsrkisirtuf.html>, (pomza), 15 Mart 2018
- URL 9, <https://urun.n11.com/bitki-besini-ve-vitamin/volkanik-tuf-curuf-P197740682>, 15 Mart 2018 (volkanik tuf)
- URL 10 <http://www.ketogenic-diet-menu.com/2017/06/how-to-use-zeolite-mineral.html>, 15 Mart 2018 (zeolit)
- URL 11, <http://www.karmabilgi.net/kayaclari-siniflandiralim/>, 15 Mart 2018 (Killer ve şeyller)
- URL 12, <https://www.mineralatlas.eu/lexikon/index.php/RockData?rock=Diatomit>, 15 Mart 2018 (Diatomit)
- URL 13, <https://riversonghousewright.wordpress.com/about/19-from-rome-to-portland-the-story-of-concrete/>, 16 Mart 2018
- URL 14, <https://turkish.alibaba.com/product-detail/rice-husk-ash-1405588761.html>, 16 Mart 2018.
- URL 15, http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/80167/35911/termal_analiz_nedir.pdf, 14 Ekim 2018.
- URL 16, <http://www.troy-met.com/haber/15/x-sini-fluoresans-xrf-nedir>, 5 Ocak 2019
- URL 17, <http://arsiv.cu.edu.tr/tr/haberduyuru/%C3%87%C3%9CMERLAB.pdf>, 5 Ocak 2019
- URL 15, <https://www.concrete.org/tools/frequentlyaskedquestions.aspx?faqid=64>, 19 Haziran 2018.
- URL 18, <https://www.tech-worm.com/taramali-elektron-mikroskobu-sem-nedir/>, 7 Ocak 19
- Velandiaa, D.F., Lynsdalea, C.J., Provisc, J.L., Ramirezd, F. and Gomez, A.C.,2016. Evaluation of Activated High Volume Fly Ash Systems Using Na₂SO₄, Lime And Quicklime in Mortars with High Loss on Ignition Fly Ashes, Construction and Building Materials, 128, 248-255.

- Wang, Q., Wang, D. and Chen, H., 2017. The Role of Fly Ash Microsphere in the Microstructure and Macroscopic Properties of High-Strength Concrete, Cement and Concrete Composites, 83, 125-137.
- Wenk, K., 1992. Influence of Silica Fume And Fly Ash On Hydration, Microstructure And Strength of Cement Based Mixtures, a Thesis Submitted to the Faculty of Graduate Studies in Partial Fulfillment of The Requirements for the Degree of Master of Science Department of Civil Engineering Calgary, Alberta, 1-126.
- Wesche, K., 2005. Fly Ash in Concrete Properties and Performance, Report of Technical Committee 67-FAB Use of Fly Ash in Building RILEM (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures).
- White, H.J. 1977. Electrostatic Precipitation of Fly Ash, Journal of the Air Pollution Control Association, 27, 1, 15-22.
- Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Chindaprasirt, P. and Chaipanich, A., 2013. Thermogravimetry of Ternary Cement Blends Effect of Different Curing Methods, J Therm Anal Calorim, 113, 1079-1090.
- Wu, Z., 2000. Development of High-Performance Blended Cements, a Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement of the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering at the University of Wisconsin-Milwaukee, 1-177.
- Xiao, L., 2007. Interpretation of Hydration Process of Concrete Based on Electrical Resistivity Measurement, a Thesis Submitted to the Hong Kong University of Science and Technology in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in the Department of Civil Engineering, Hong Kong, 1-178.
- Yao, Z.T., Jib, X.S., Sarker, P.K., Tang, J.H., Geb, L.Q., Xia, M.S. and Xi, Y.Q. 2015. A Comprehensive Review on the Applications of Coal Fly Ash, Earth-Science Reviews, 141, 105–121.
- Yazıcı, H., 2005. Yüksek Hacimde C Sınıfı Uçucu Kül İçeren Betonların Mekanik Özellikleri ve Sülfirik Asit Dayanıklılığı, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11, 3, 443-448.
- Yazıcı, Ş. and Arel, H.Ş., 2012. Effects of Fly Ash Fineness on the Mechanical Properties of Concrete, Sādhanā, 37, 389–403.
- Yeğınobalı, A., 2003. Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar, TMH–Türkiye Mühendislik Haberleri Sayısı, 426, 4, 56-61.
- Yijin, L., Shiqiong, Z., Jian, Y., and Yingli, G., 2004. The Effect of Fly Ash on the Fluidity of Cement Paste, Mortar, and Concrete, International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, 339-345.
- Yörük, Ö., 2001. Katkılı ve Katkısız Çimentoların Betonun Durabilitesine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-44.

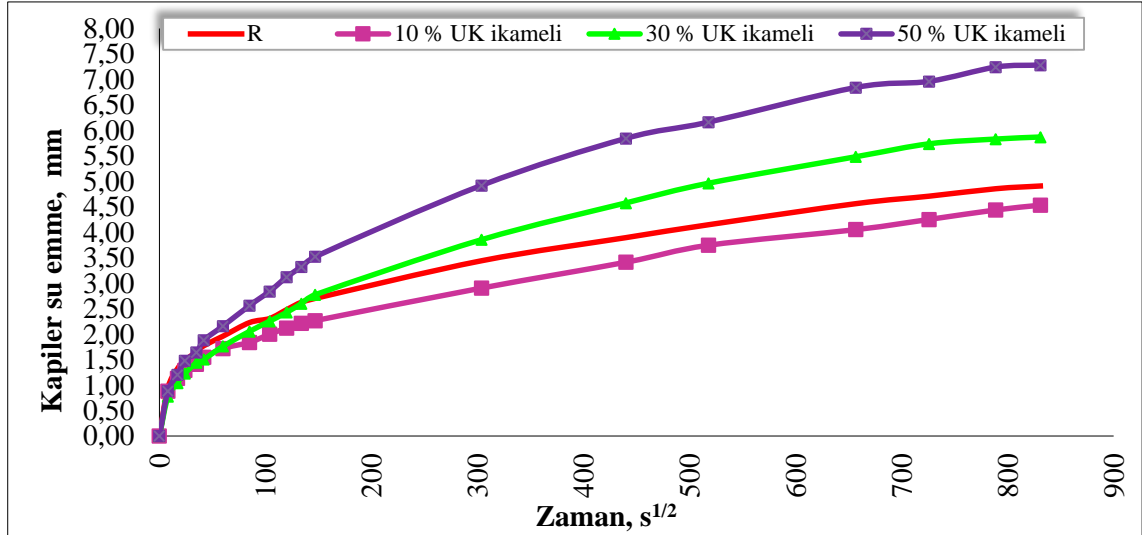
- Zelinkova, M. and Ondova, M., 2015. Effect of Fly Ash Fineness on Sorption Properties of Geopolymers Based on Liquid Glass, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering, 9, 5.
- Zeng, Q., Li, K., Fen-chong, T. and Dangla, P., 2012. Determination of Cement Hydration and Pozzolanic Reaction Extents for Fly-Ash Cement Pastes, Construction and Building Materials, 27, 560–569.



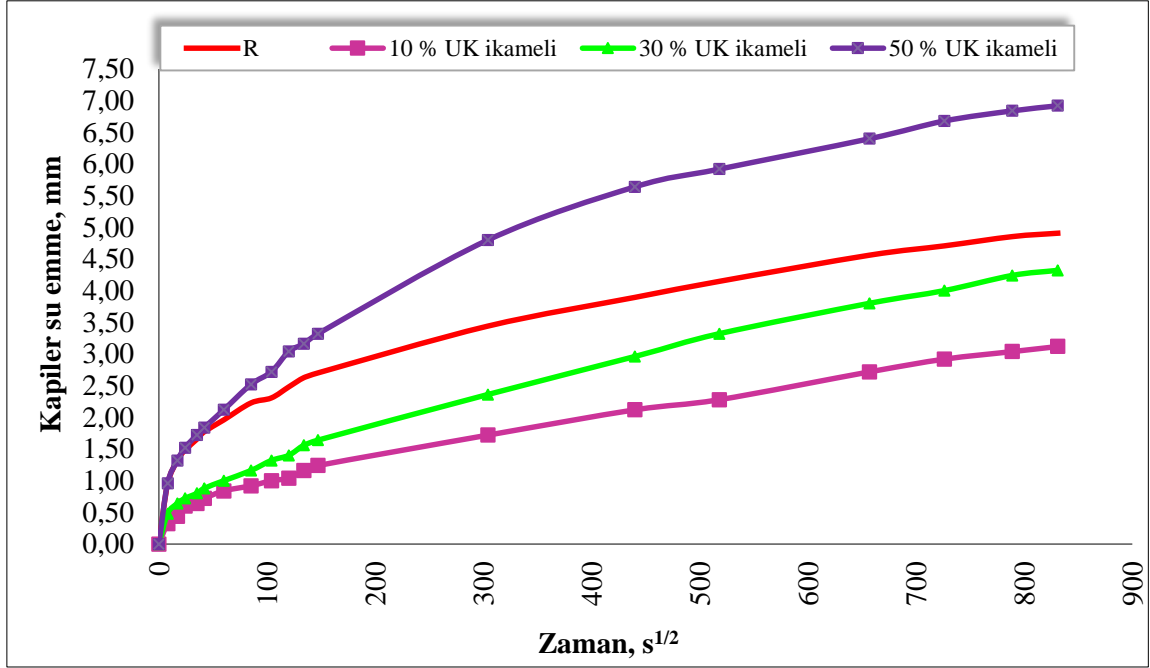
6. EKLER



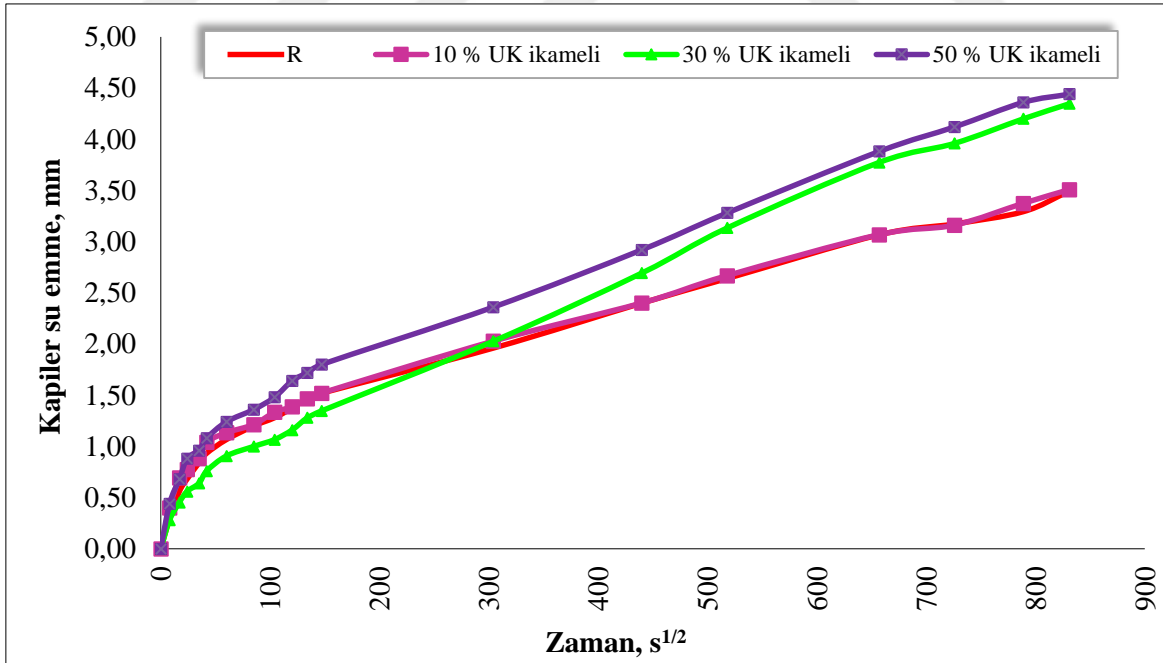
Ek Şekil 1: AE orijinal durumda uçucu kül (UK) ikameli 28 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=3.48 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 3.28 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 6.77 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 9.92 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$)



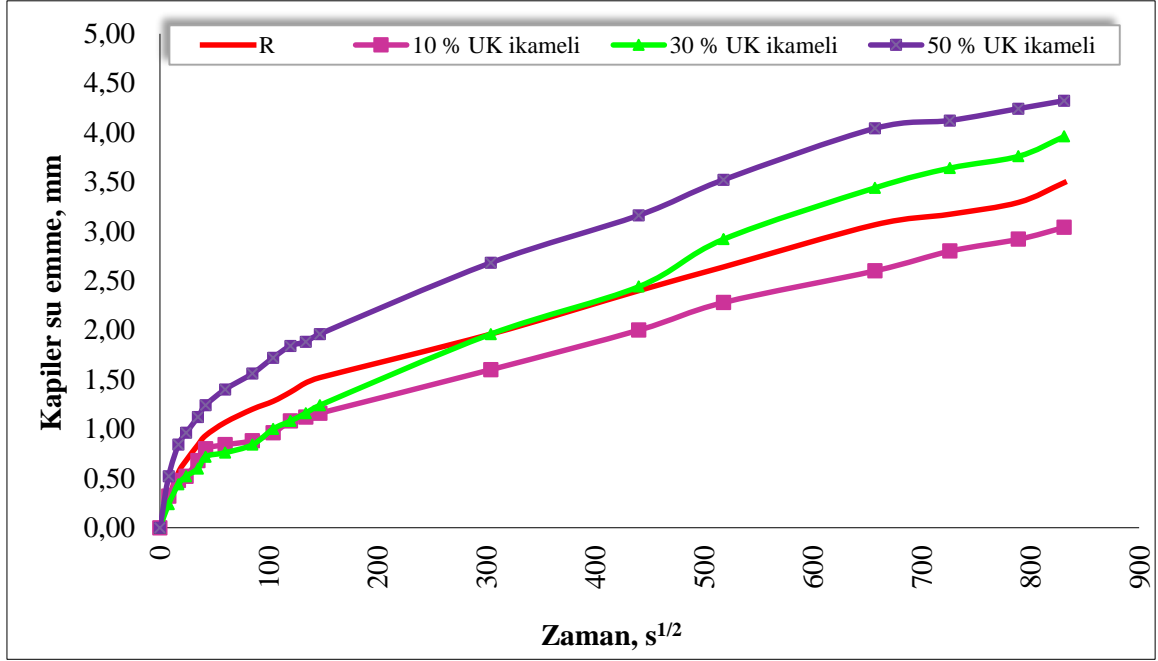
Ek Şekil 2: AE 30 dk öğütülmüş uçucu kül (UK) ikameli 28 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K= 3.48 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 2.97 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 4.98 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 7.67 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$)



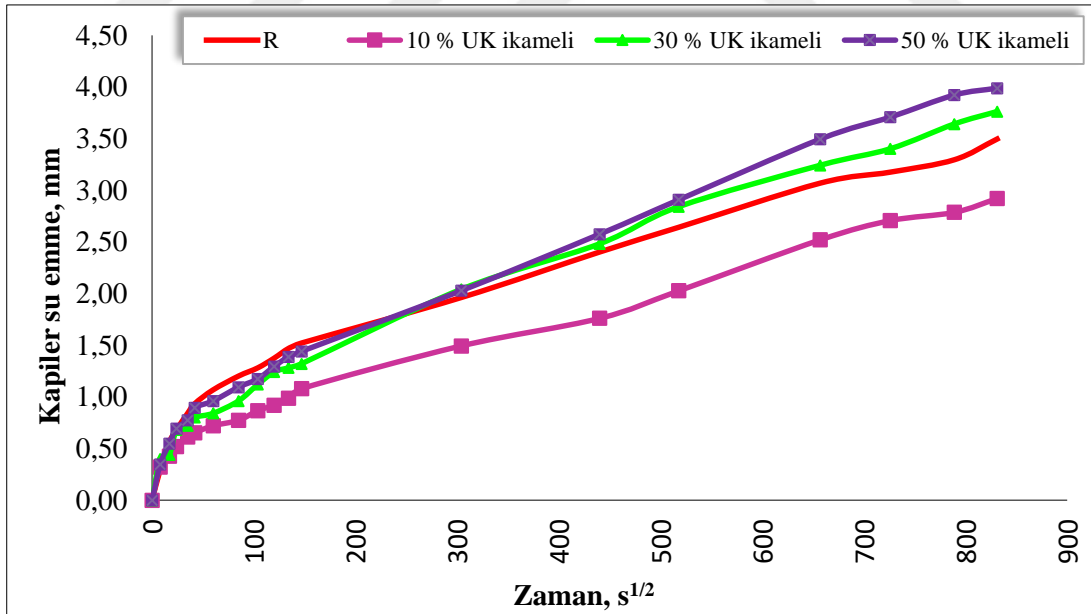
Ek Şekil 3: AE 60 dk öğütülmüş uçucu kül (UK) ikameli 28 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K= 3.48 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 1.41 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 2.70 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 6.93 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$)



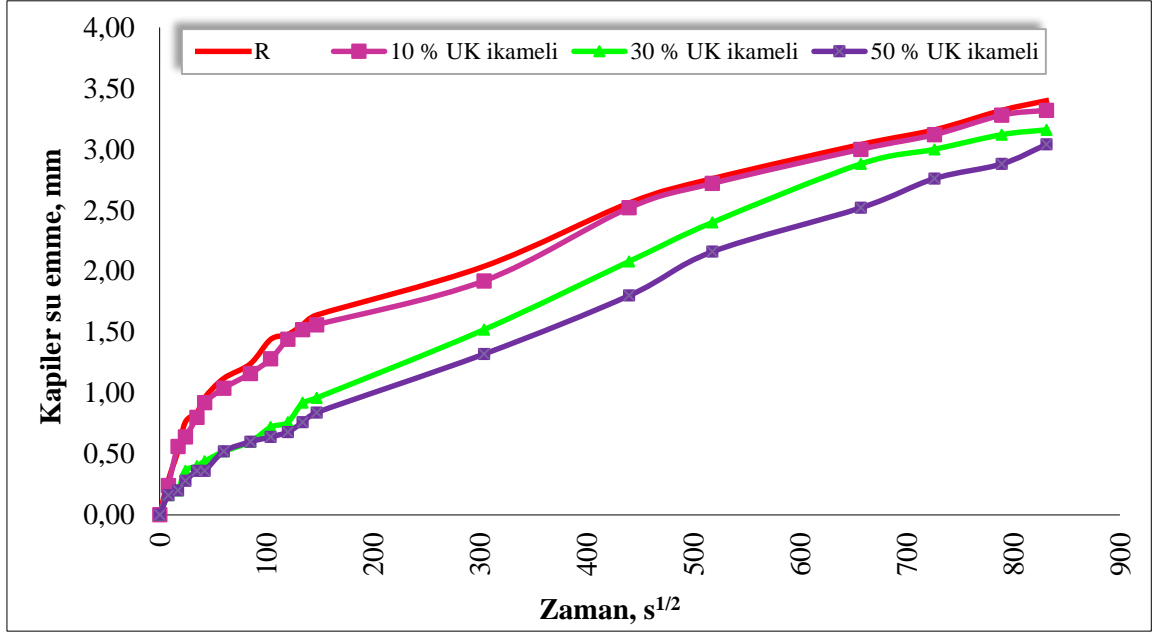
Ek Şekil 4: AE orijinal durumda uçucu kül (UK) ikameli 56 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=1.77 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 1.78 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 2.73 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 2.85 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$)



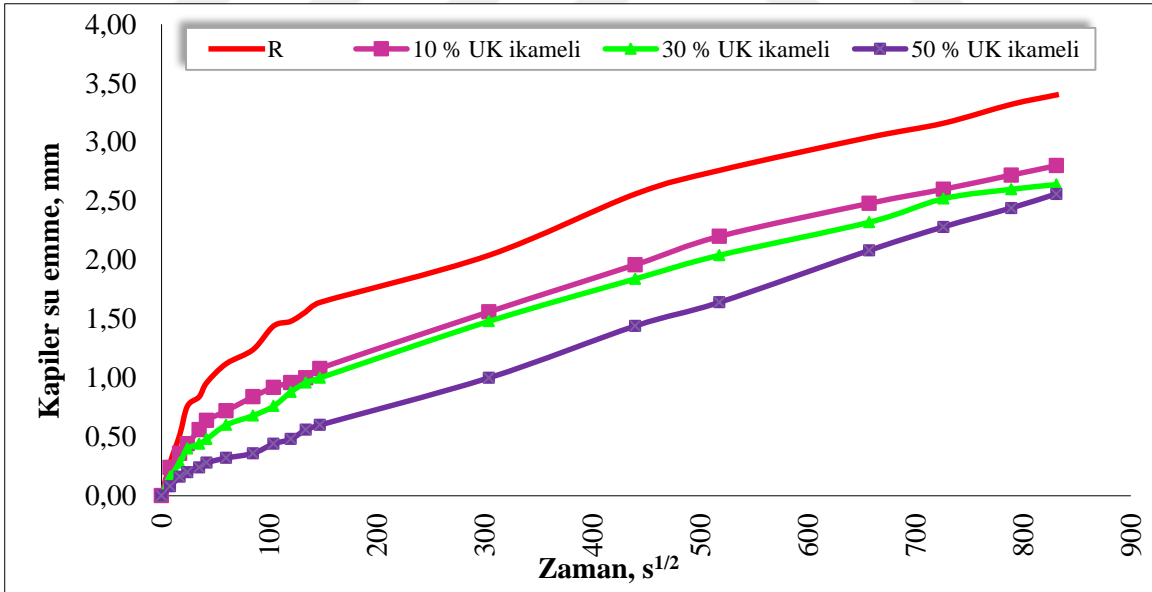
Ek Şekil 5: AE 30 dk öğütülmüş uçucu kül (UK) ikameli 56 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=1.77 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 1.34 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 2.27 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 2.70 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$)



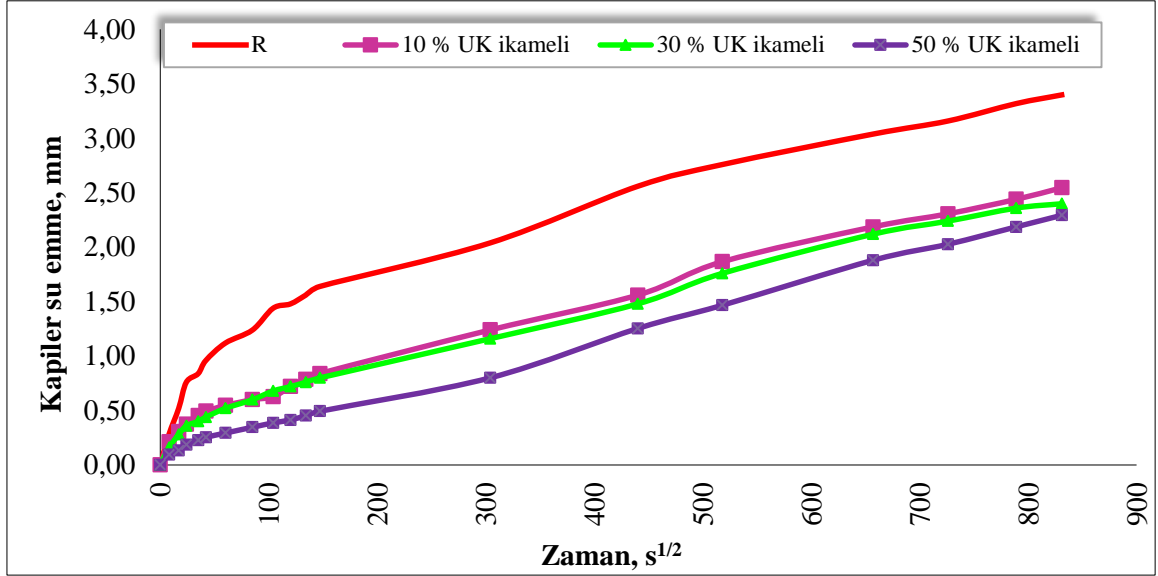
Ek Şekil 6: AE 60 dk öğütülmüş uçucu kül (UK) ikameli 56 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=1.77 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 1.23 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 2.05 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 2.30 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$)



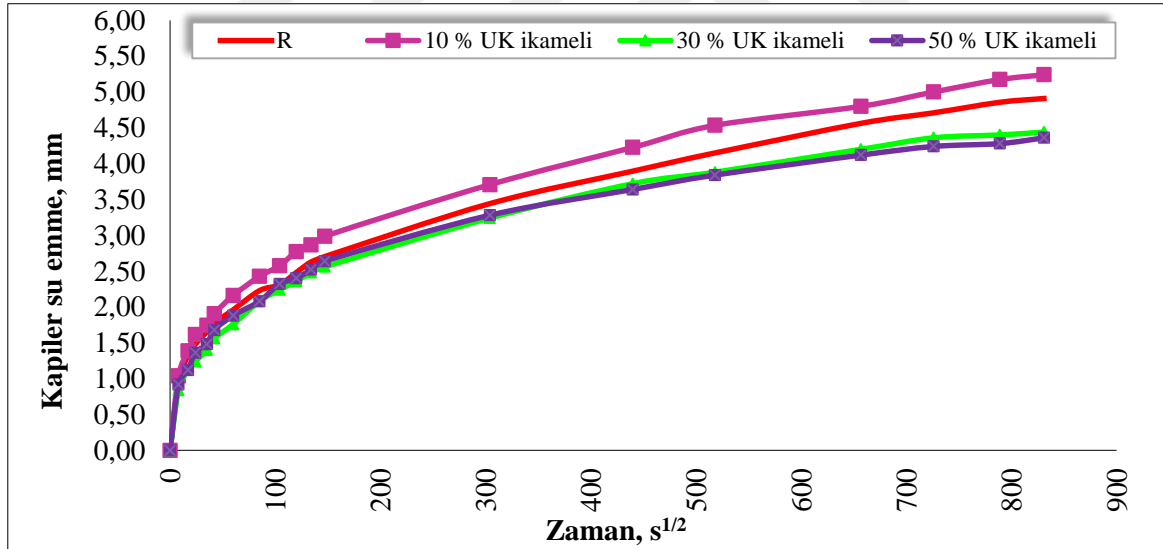
Ek Şekil 7: AE orijinal durumda uçucu kül (UK) ikameli 90 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=1.67 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 1.59 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 1.44 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 1.34 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$)



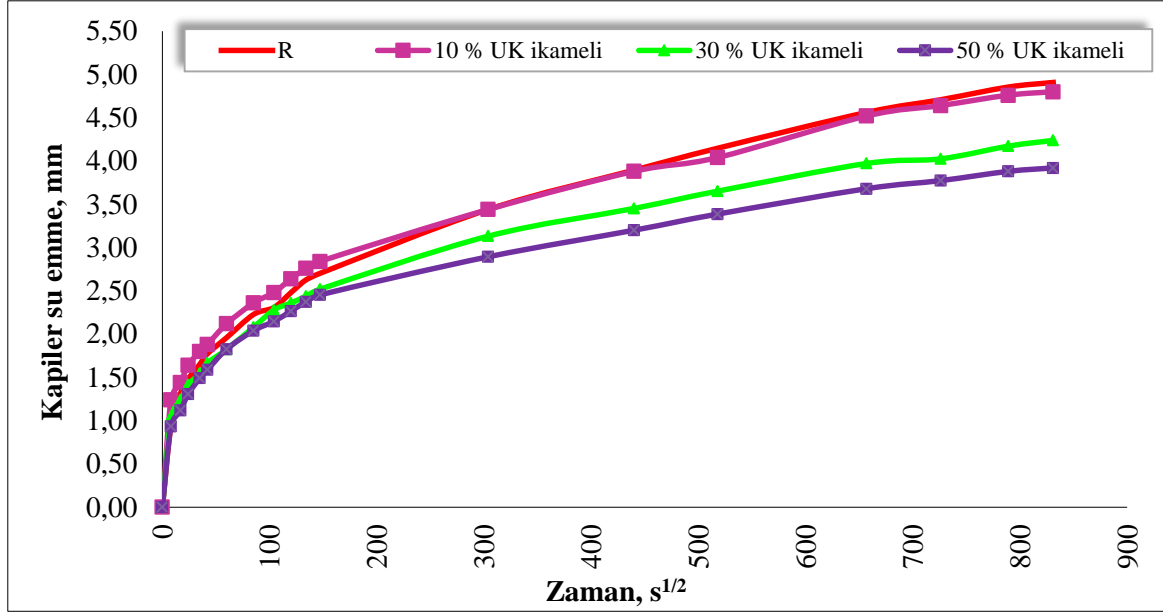
Ek Şekil 8: AE 30 dk öğütülmüş uçucu kül (UK) ikameli 90 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=1.67 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 1.13 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 1.01 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 9.48 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)



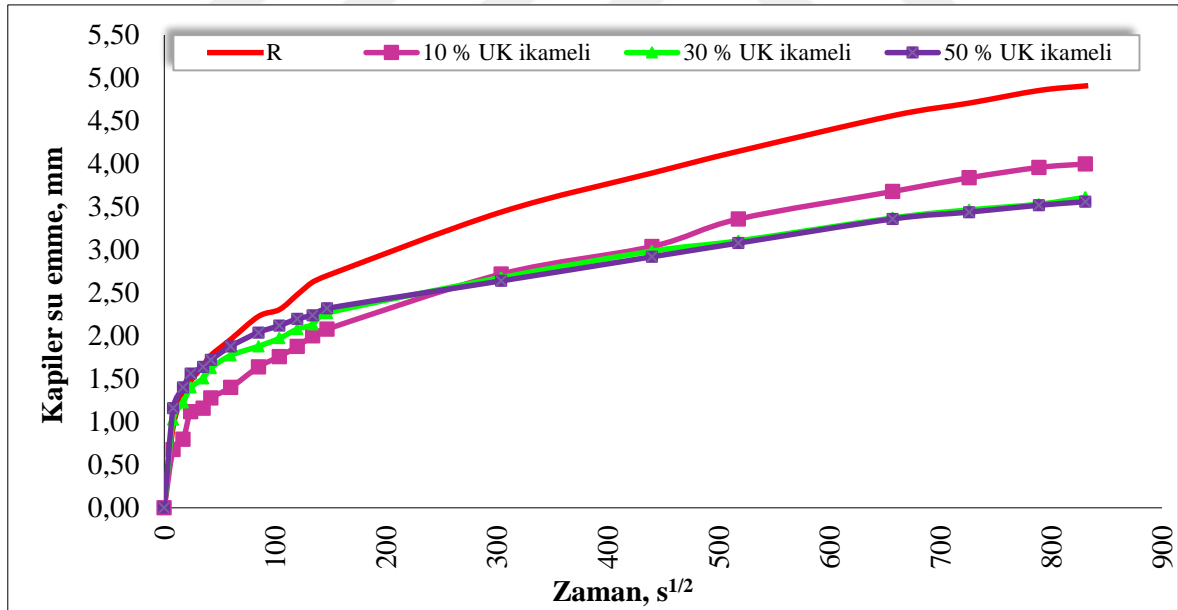
Ek Şekil 9: AE 60 dk öğütülmüş uçucu kül (UK) ikameli 90 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=1.67 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 9.38 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 8.38 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 7.61 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)



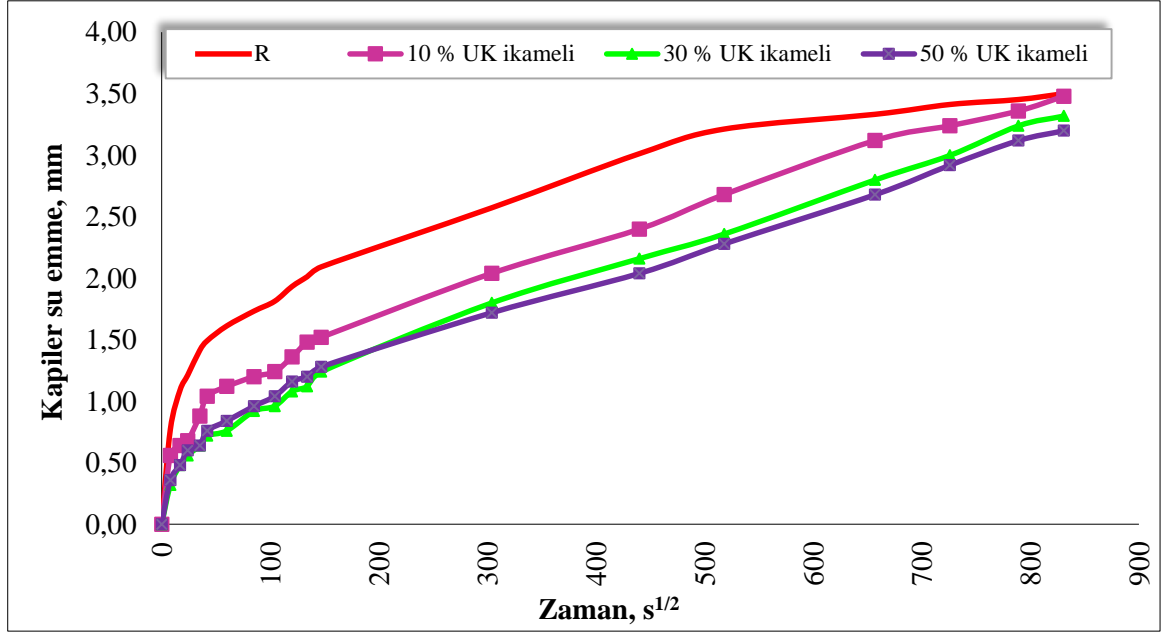
Ek Şekil 10: ÇYH orijinal durumda uçucu kül (UK) ikameli 28 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=3.48 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 3.97 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 2.85 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 2.75 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$)



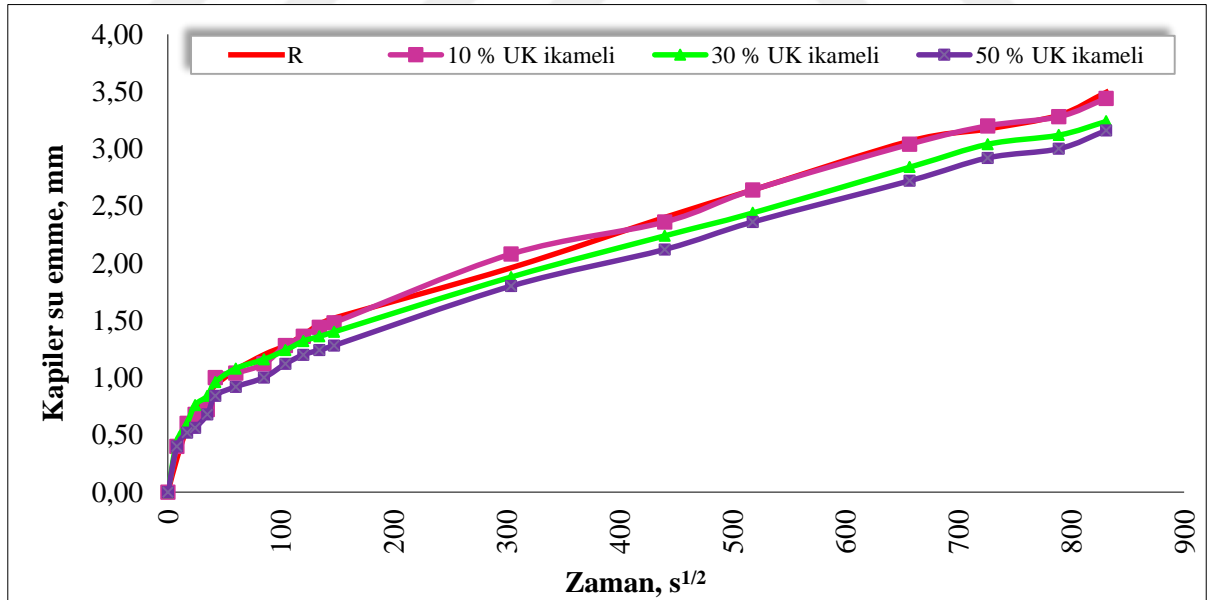
Ek Şekil 11: ÇYH 30 dk öğütülmüş uçucu kül (UK) ikameli 28 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=3.48 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 3.33 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 2.60 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 2.22 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)



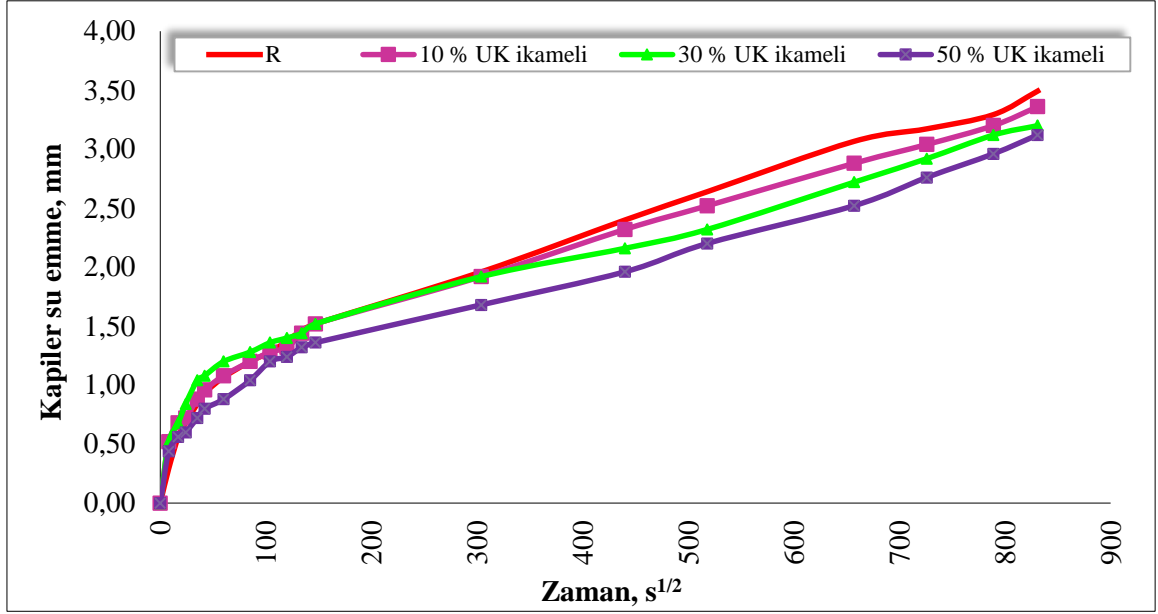
Ek Şekil 12: ÇYH 60 dk öğütülmüş uçucu kül (UK) ikameli 28 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=3.48 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 2.31 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 1.89 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 1.83 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)



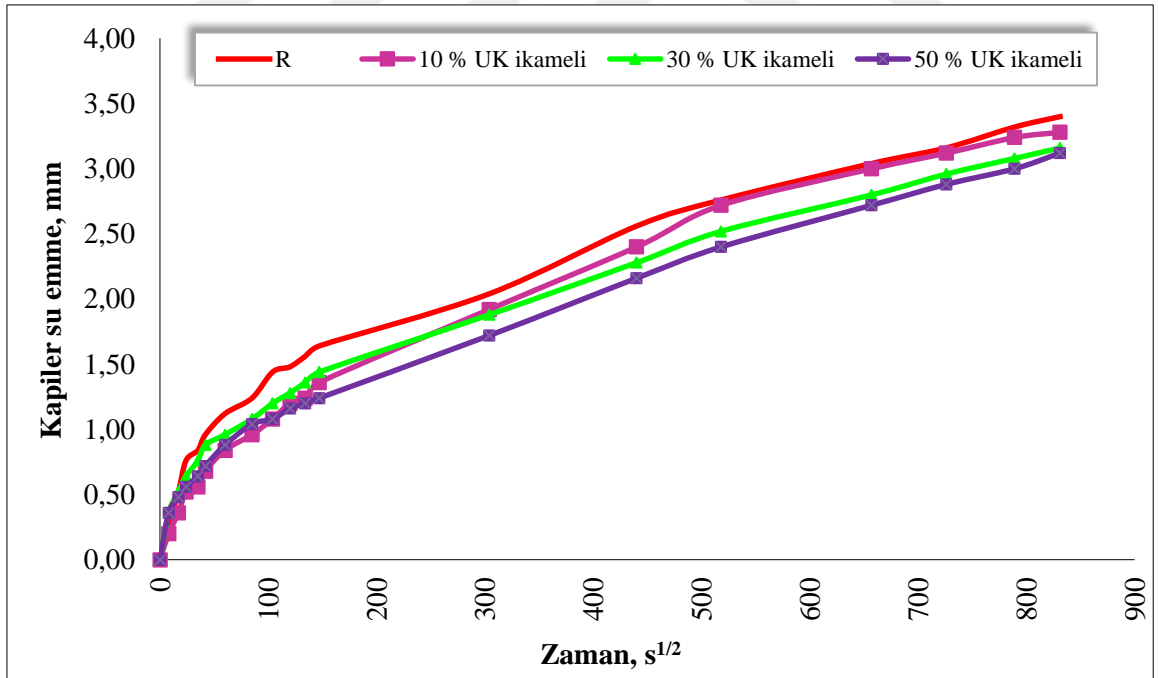
Ek Şekil 13: ÇYH orijinal durumda uçucu kül (UK) ikameli 56 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=1.77 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 1.75 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 1.59 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 1.48 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$)



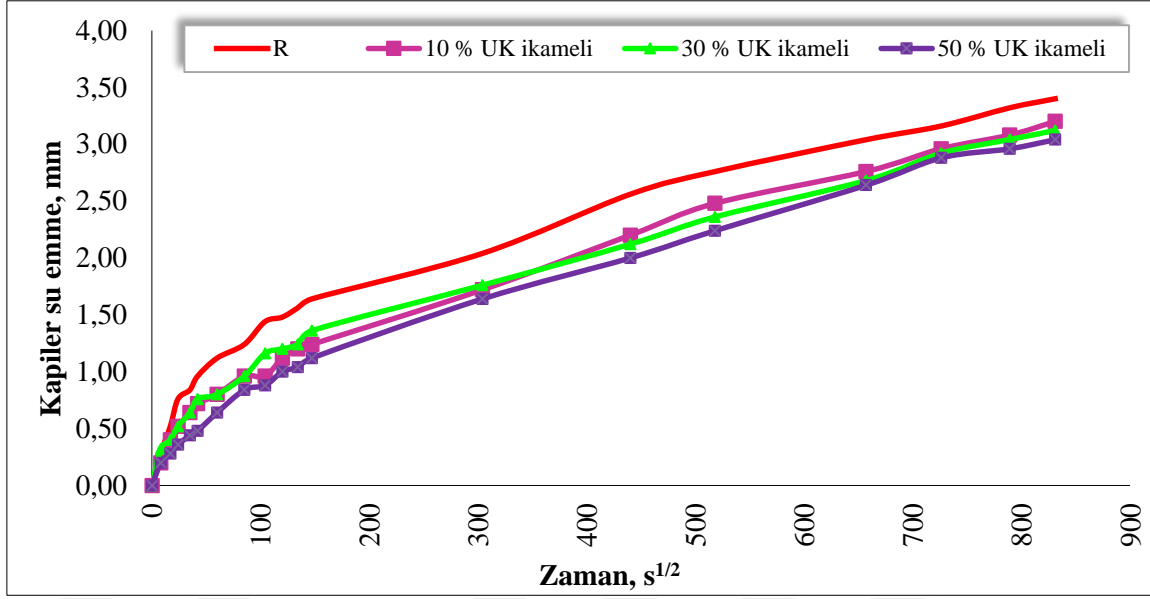
Ek Şekil 14: ÇYH 30 dk öğütülmüş uçucu kül (UK) ikameli 56 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=1.77 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 1.71 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 1.52 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 1.44 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)



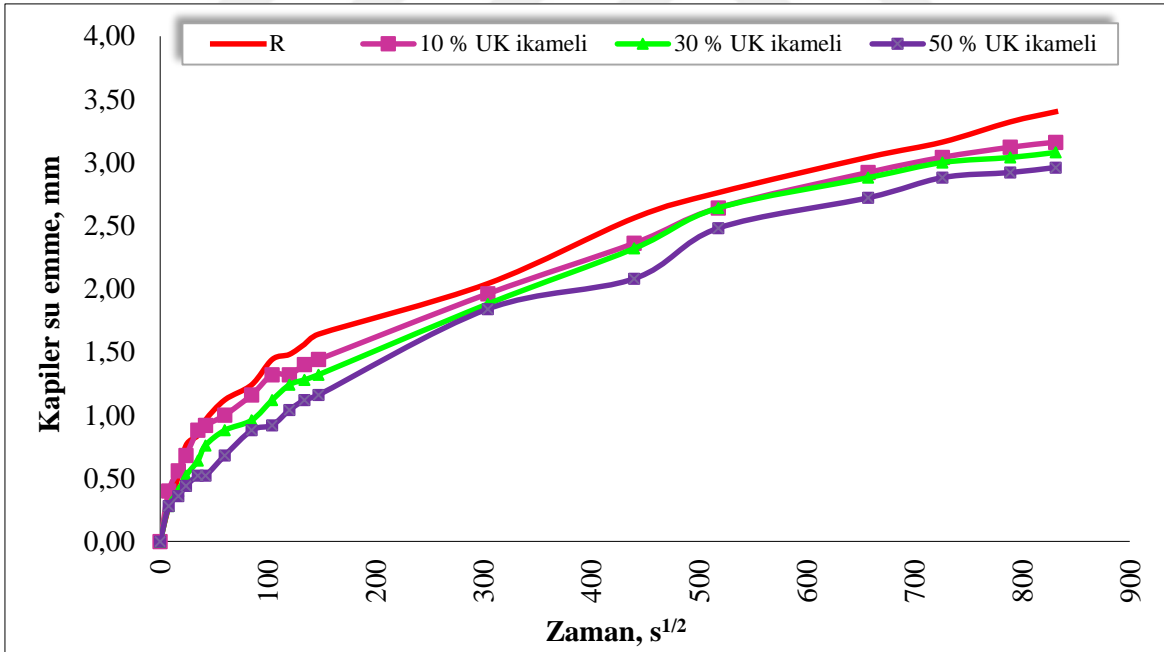
Ek Şekil 15: ÇYH 60 dk öğütülmüş uçucu kül (UK) ikameli 56 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=1.77 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 1.63 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 1.48 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 1.41 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)



Ek Şekil 16: ÇYH orijinal durumda uçucu kül (UK) ikameli 90 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=1.67 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 1.56 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 1.44 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 1.41 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$)



Ek Şekil 17: ÇYH 30 dk öğütülmüş uçucu kül (UK) ikameli 90 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=1.67 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 1.48 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 1.41 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 1.34 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)



Ek Şekil 18: ÇYH 60 dk öğütülmüş uçucu kül (UK) ikameli 90 günlük numunelerin kılcal kanallar yolu ile zamana bağlı su emme değerleri (Kapilarite katsayıları (K): Referans (R) $K=1.67 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 10 UK ilaveli $K= 1.44 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 30 UK ilaveli $K= 1.37 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, % 50 UK ilaveli $K= 1.27 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Gümüşhane ilinin Merkez İlçesi Tekke Köyü'nde doğdu. İlk ve Orta öğrenimi Gümüşhane de tamamladı. 2000 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünü kazandı ve 2004 yılında Jeoloji Mühendisi olarak mezun oldu. 2007 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitime başladı. 2010 yılında Jeoloji Yüksek Mühendisi olarak mezun oldu. 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora eğitimine başladı.

2012 yılında Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı ve bu görevine devam etmektedir. Evli ve Yagız Uğur adında bir erkek çocuğa sahip olup iyi derece de İngilizce bilmektedir.