

**ARITMA ÇAMURLARININ YAKILMASIYLA OLUŞAN
KÜLLERİN YAPI MALZEMESİ OLARAK GERİ
KAZANIMI**

Berna YİĞİT



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ARITMA ÇAMURLARININ YAKILMASIYLA OLUŞAN KÜLLERİN YAPI
MALZEMESİ OLARAK GERİ KAZANIMI**

Berna YİĞİT
ORCID: 0000-0003-4865-9704

Prof. Dr. Güray SALİHOĞLU
ORCID: 0000-0003-0714-048X
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

TEZ ONAYI

Berna YİĞİT tarafından hazırlanan "Arıtma Çamurlarının Yakılmasıyla Oluşan Küllerin Yapı Malzemesi Olarak Geri Kazanımı" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Güray SALİHOĞLU

Başkan: Prof. Dr. Güray SALİHOĞLU
ORCID: 0000-0003-0714-048X
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Çevre Mühendisliği Bölümü,
Çevre Teknolojileri Anabilim Dalı

İmza



Üye : Doç. Dr. Ali MARDANI-AGHABAGLOU
ORCID: 0000-0003-0326-5015
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Yapı Malzemesi Anabilim Dalı

İmza



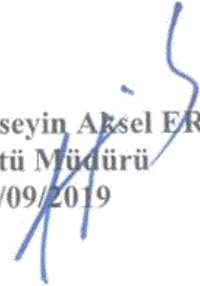
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Aşkın BİRGÜL
ORCID: 0000-0002-7718-0340
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve
Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği
Bölümü

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
22/09/2019



U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

22/10/2019

Berna YİĞİT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Arıtma Çamurlarının Yakılmasıyla Oluşan Küllerin Yapı Malzemesi Olarak Geri Kazanımı

Berna YİĞİT

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Güray SALİHOĞLU

Bursa ili kentsel atıksu arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurları, 2017 yılından itibaren Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi'ne bağlı 400 ton/gün kapasiteli bir akışkan yataklı yakma tesisinde yakılarak bertaraf edilmektedir. Yakma sürecinin sonunda her ay bertaraf edilmeyi bekleyen ortalama 615 ton kül oluşmaktadır. Bu çalışmanın amacı çamur yakma sürecinin sonunda oluşan atık çamur küllerinin yapı malzemesi olarak geri kazanılıp kazanılamayacağını araştırmaktır. Bu amaçla öncelikle torba filtre ve multisiklon olmak üzere iki farklı baca gazı arıtma ünitelerinden elde edilen arıtma çamuru külünün ağır metal içeriği, kimyasal kompozisyonu ve amorf-kristal yapısı ile ilgili analizler yapılmıştır. Çamur küllerine stabilizasyon/solidifikasyon (S/S) ve jeopolimerizasyon teknolojileri uygulanmıştır. S/S ve jeopolimerizasyon teknolojilerinin verimi hamur ve harç örneklerinde izlenmiştir. S/S ve jeopolimer örnekler 50×50×50 mm boyutlarında hazırlanmıştır. S/S hamur örnekleri çimento kullanılarak, jeopolimer hamur örnekleri hem çimento kullanılarak hem de çimento kullanılmadan hazırlanmıştır. Jeopolimer hamur örneklerinde aktivatör olarak NaSiNaOH ve 8M NaOH çözeltileri kullanılmıştır. S/S harç örnekleri ASTM standartlarına uygun olarak, jeopolimer harç örnekleri $M_s=1,6$ (Si_2O/Na_2O), %8 Na_2O içeriğine sahip çözelti kullanılarak hazırlanmıştır. Arıtma çamuru külünün yapı malzemesi olarak değerlendirilebilmesi için basınç dayanımı, su emme, porozite, donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda külün ağır metal içeriğinin tehlike sınır değerlerini aşmadığı ve amorf bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Çamur külü içeren S/S hamur örneklerinde en yüksek basınç dayanımı 30,69 MPa (MS ünitesi arıtma çamuru külü+çimento+su), jeopolimer ve çimentolu hamur örneklerinde en yüksek basınç dayanımı 50 MPa (TF ünitesi arıtma çamuru külü+çimento+NaSiNaOH), jeopolimer ve çimentosuz hamur örneklerinde en yüksek basınç dayanımı 40,56 MPa (MS ünitesi arıtma çamuru külü +mermer çamuru+uçucu kül+NaSiNaOH) olarak ölçülmüştür. Çamur külü içeren S/S harç örneklerinde en yüksek basınç dayanımı 50,53 MPa (%15 oranında MS ünitesi arıtma çamuru külü), jeopolimer harç örneklerinde en yüksek basınç dayanımı 11,88 MPa (%20 TF ünitesi arıtma çamuru külü+%40 UK+%40 MÇ) olarak ölçülmüştür. Elde edilen bulgular çamur küllerinin, yapı malzemesi olarak bir potansiyel vadettiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: stabilizasyon/solidifikasyon, jeopolimerizasyon, arıtma çamuru külü, yakma, yapı özellikleri, sızma testleri

ABSTRACT

MSc Thesis

Recycling of Sewage Sludge Incineration Ashes as Construction Material

Berna YİĞİT

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Güray SALİHOĞLU

Sewage sludges that are originating from the municipal wastewater treatment plants of Bursa city have been incinerated with a fluidized bed reactor of 400 tons/day capacity since 2017. Each month, on an average, 615 tons of ash is generated as a waste of the incineration process, which needs disposal. The purpose of this study was to investigate if the sludge incinerator ash can be recycled as a construction material. Heavy metal content, chemical composition and amorphous-crystal properties of sludge ash obtained from two different flue gas treatment systems as bag filter and multicyclone were analyzed with this aim. Stabilization/solidification (S/S) and geopolymerization technologies were applied to sludge ashes. The efficiency of S/S and geopolymerization technologies was observed in paste and mortar samples. S/S and geopolymer samples were prepared in dimensions of 50×50×50 mm. S/S paste samples were prepared by using cement, geopolymer paste samples were prepared by using cement and without cement. NaSi1NaOH and 8M NaOH solutions were used as activators in geopolymer paste samples. S/S mortar samples were prepared in accordance with ASTM standards using geopolymer mortar samples were prepared with $M_s=1,6$ (Si_2O/Na_2O), %8 Na_2O solution. The compressive strength, water absorption, porosity, freeze-thaw tests were performed to evaluate the sludge ash as a construction material. As a result of the analysis, it was determined that the ash did not show heavy metal properties and had an amorphous structure. The highest compressive strength of S/S paste samples containing sludge ash was 30,69 MPa (multicyclone unit sludge ash + cement + water), the highest compressive strength of geopolymer and cement paste samples was 50 MPa (bag filter unit sludge ash + cement + NaSi1NaOH), geopolymer and without cement paste samples with the highest compressive strength of 40,56 MPa (multicyclone unit sludge ash + marble sludge + fly ash + NaSi1NaOH) was measured. The highest compressive strength of S/S mortar samples containing sludge ash was 50,53 MPa (15% multicyclone unit sludge ash), the highest compressive strength of geopolymer mortar samples was 11,88 MPa (20% bag filter unit treatment sludge ash + 40% fly ash + 40% marble sludge) was measured. As a result of the experiments, showed that sludge ash has the potential to be considered as a construction material.

Key words: stabilization/solidification, geopolymerization, sludge ash, incineration, construction properties, leaching tests

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca akademik bilgi birikimi ve tecrübesiyle beni destekleyen, akademik çalışmalarda yer almam için beni cesaretlendiren ve ufuk açıcı yönlendirmelerinden dolayı kendimi geliştirmemi sağlayan değerli hocam ve danışmanım Sayın Prof. Dr. Güray Salihoğlu'na teşekkürlerimi sunarım.

Ders ve tez süreci boyunca bilgi ve birikimlerini aktararak desteklerini esirgemeyen değerli bölüm hocalarıma, teorik ve pratik anlamda her konuda destek aldığım Sayın Doç. Dr. N. Kamil Salihoğlu'na ve Sayın Doç. Dr. Ali Mardani-Aghabaglou'a, laboratuvar desteklerinden dolayı Sayın Arş. Gör. Dr. Süleyman Özen'e, tez süreci boyunca hiçbir konuda yardımlarını eksik etmeyen Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarı asistanlarına teşekkürlerimi sunarım.

TÜBİTAK BİDEB-2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı/2210-C Yüksek Lisans Öncelikli Alanlar Burs Programı'na burs desteğinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar analiz desteklerinden ötürü Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi çalışanlarına ve Bursa Çimento A.Ş. çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, hayatım boyunca desteklerini hep yanımda hissettiğim beni hayata hazırlayan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Berna YİĞİT
22/10/2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Arıtma Çamuru ve Oluşum Süreci.....	3
2.2. Arıtma Çamurlarının Yönetimi.....	5
2.3. Arıtma Çamurlarının Yakma Teknolojisi İle Yönetimi.....	7
2.4. Arıtma Çamurlarının Yakılmasıyla Oluşan Küllerin Yönetimi.....	12
2.5. Arıtma Çamuru Külünün Kullanımı ve Çevre Açısından Değerlendirilmesi.....	13
2.5.1. Betonla ilgili uygulamalar.....	14
2.5.2. Seramik uygulamalar	18
2.5.3. Jeoteknik uygulamalar	19
2.5.4. Yol kaplaması uygulamaları	20
2.6. Stabilizasyon/Solidifikasyon Teknolojisi	21
2.7. Jeopolimerizasyon Teknolojisi	23
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	27
3.1. Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi Kentsel Atıksu Arıtma Tesislerinde Çamur Oluşum Süreci.....	27
3.2. Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi Çamur Yakma Tesisi'nde Kül Oluşum Süreci..	28
3.3. Materyal	33
3.3.1. Hamur örneklerinde kullanılan malzemeler.....	33
3.3.2. Harç örneklerinde kullanılan malzemeler	36
3.4. Deneysel Yöntem.....	38
3.5. Arıtma Çamuru Külünün Karakterizasyonu	39
3.5.1. XRF analizi	39
3.5.2. XRD analizi	39
3.5.3. Ağır metal analizi.....	40
3.6. Hamur Örneklerinin Hazırlanması.....	42
3.6.1. S/S teknolojisi uygulama yöntemi	42
3.6.2. Jeopolimerizasyon teknolojisi uygulama yöntemi.....	43
3.7. Harç Örneklerinin Hazırlanması	45
3.7.1. S/S teknolojisi uygulama yöntemi	45
3.7.2. Jeopolimerizasyon teknolojisi uygulama yöntemi.....	46
3.8. Yayılma Değerleri ve İşlenebilirlik	49
3.9. Puzolanik Aktivite Deneyi	49
3.10. Basınç Dayanımı Deneyi	50
3.11. Su Emme Deneyi	52
3.12. Gözeneklilik (Porozite) Deneyi	53
3.13. Donma-Çözülme Deneyi	53
3.14. Sızma Testi.....	54
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	55

4.1. Arıtma Çamuru Külünün Karakterizasyonu	55
4.1.1. XRF analizi	55
4.1.2. XRD analizi	56
4.1.3. Ağır metal analizi.....	57
4.2. Arıtma Çamuru Külü İçeren Örneklerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	59
4.2.1. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinin puzolanik aktivite değerleri	59
4.2.2. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde yayılma değerleri ve işlenebilirlik.....	60
4.2.3. S/S teknolojisiyle hazırlanan örneklerde basınç dayanımı gelişimi.....	60
4.2.4. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde toplam su emme değerleri.....	66
4.2.5. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde gözeneklilik deneyi sonuçları ...	67
4.2.6. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde donma-çözülme deneyi sonuçları.....	69
4.2.7. Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde yayılma değerleri ve işlenebilirlik.....	72
4.2.8. Jeopolimerizasyon teknolojisiyle hazırlanan örneklerde basınç dayanımı gelişimi.....	73
4.2.9. Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde toplam su emme değerleri.....	83
4.2.10. Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde gözeneklilik değerleri .	84
4.3. S/S ve Jeopolimerizasyon Teknolojisi ile Hazırlanan Hamur Örneklerinde Sızma Davranışları.....	84
5. SONUÇ.....	87
5.1. Hamur Örneklerinden Elde Edilen Sonuçlar	87
5.1.1. S/S teknolojisi ile hazırlanan hamur örneklerinden elde edilen sonuçlar	87
5.1.2. Jeopolimerizasyon teknolojisi ile hazırlanan hamur örneklerinden elde edilen sonuçlar.....	88
5.2. Harç Örneklerinden Elde Edilen Sonuçlar.....	88
5.2.1. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinden elde edilen sonuçlar	89
5.2.2. Jeopolimerizasyon teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinden elde edilen sonuçlar.....	89
5.3. Genel Değerlendirme ve Öneriler.....	90
KAYNAKLAR	94
EKLER.....	101
Kalibrasyon Grafikleri	102
Özgeçmiş.....	105

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
S/S	Stabilizasyon/Solidifikasyon
BUSKİ	Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi
TCLP	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
EPA	Environmental Protection Agency
XRF	X-Ray Fluorescence
XRD	X-Ray Diffraction
ASTM	American Society for Testing and Materials
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer
TS EN	Türk Standartları Enstitüsü

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Evsel atıksu arıtma tesisi çamur oluşumu.....	4
Şekil 2.2. Yakma işleminin avantaj ve dezavantajları	8
Şekil 2.3. İnsineratör tiplerinin genel özellikleri.....	10
Şekil 2.4. Akışkan yataklı yakma sistemi (AÇK: arıtma çamuru külü).....	11
Şekil 2.5. Tipik esnek yol kaplama yapılarının katmanları.....	20
Şekil 2.6. Çimento esaslı sistemlerde S/S teknolojisinin avantaj ve dezavantajları	23
Şekil 2.7. Jeopolimerizasyon mekanizması	25
Şekil 3.1. BUSKİ Doğu Atıksu Arıtma Tesisi	27
Şekil 3.2. 2018 yılında oluşan çamur miktarı	28
Şekil 3.3. BUSKİ çamur yakma tesisi.....	29
Şekil 3.4. BUSKİ yakma tesisinin genel çalışma prensibi.....	29
Şekil 3.5. Çamur yakma tesisi – enerji üretimi akım şeması	30
Şekil 3.6. Çamur yakma tesisi – emisyon kontrolü akım şeması.....	30
Şekil 3.7. BUSKİ 400 ton/gün kapasiteli Akışkan Yataklı Çamur Yakma ve Enerji Elde Etme Tesisi'nde 2018 yılında oluşan arıtma çamuru külü miktarları	32
Şekil 3.8. Çimento.....	33
Şekil 3.9. (a) Multisiklon ünitesi külü (b) Torba filtre ünitesi külü.....	34
Şekil 3.10. F sınıfı uçucu kül	35
Şekil 3.11. 105°C'de 24 saat etüvde kurutulup ve öğütülmüş mermer çamuru.....	35
Şekil 3.12. (a) NaOH paletleri (b) NaSil çözeltisi	36
Şekil 3.13. (a) Elek analizi cihazı (b) 0,125-5 mm agrega (c) 0-0,125 mm agrega.....	38
Şekil 3.14. Agrega partikül boyut dağılımı analizi	38
Şekil 3.15. Çalışmada kullanılan deneysel yöntem.....	39
Şekil 3.16. Mikro dalga cihazı	40
Şekil 3.17. ICP-OES cihazı.....	41
Şekil 3.18. Ag için elde edilen kalibrasyon grafiği	42
Şekil 3.19. S/S teknolojisi ile hazırlanan hamur örnekleri.....	43
Şekil 3.20. Jeopolimerizasyon teknolojisi ile hazırlanan hamur örnekleri	44
Şekil 3.21. Bağlı nem kabini	45
Şekil 3.22. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri	46
Şekil 3.23. Buhar küründe uygulanan ısıl işlem çevrimi	47
Şekil 3.24. Jeopolimerizasyon teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri.....	48
Şekil 3.25. Yayılma tablası	49
Şekil 3.26. Basınç dayanımı düzeylerinin belirlendiği cihaz.....	51
Şekil 3.27. Etüv	52
Şekil 3.28. Donma çözülme deneyinin yapıldığı cihaz ve örnekler.....	54
Şekil 4.1. Torba filtre baca gazı arıtma sisteminden elde edilen kül için XRD grafiği .	56
Şekil 4.2. Multisiklon baca gazı arıtma sisteminden elde edilen kül için XRD grafiği ..	57
Şekil 4.3. S/S teknolojisi ve çimento kullanılarak hazırlanan örneklerin basınç dayanımı düzeyleri (a: torba filtre külü ünitesi ile hazırlanan örnekler, b: multisiklon ünitesi külü ile hazırlanan örnekler, TF: torba filtre ünitesi külü, MS: multisiklon ünitesi külü, UK: uçucu kül, MÇ: mermer çamuru, Ç: Çimento, 10: %10, 30: %30, 40: %40, 70: %70).	61
Şekil 4.4. 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları (TF: torba filtre, MS: multisiklon, MÇ: mermer çamuru, 15: %15, 30: %30).....	63

Şekil 4.5. Hazırlanan örneklerin sıcaklık değişimlerinin kaydedildiği termal kamera görüntüleri (a: referans, b: %15 torba filtre ünitesi külü eklenmiş örnek c: %30 torba filtre külü ünitesi eklenmiş örnek d: %15 multisiklon ünitesi külü eklenmiş örnek, e: %30 multisiklon ünitesi eklenmiş örnek, f: %15 mermer çamuru eklenmiş örnek, g: %30 mermer çamuru eklenmiş örnek).....	65
Şekil 4.6. Hazırlanan örneklerin sıcaklık değişimlerinin kaydedildiği termal kamera görüntüleri grafiği (a: referans, b: %15 torba filtre ünitesi külü eklenmiş örnek c: %30 torba filtre külü ünitesi eklenmiş örnek d: %15 multisiklon ünitesi külü eklenmiş örnek, e: %30 multisiklon ünitesi eklenmiş örnek, f: %15 mermer çamuru eklenmiş örnek, g: %30 mermer çamuru eklenmiş örnek).....	66
Şekil 4.7. 28 ve 90 günlük toplam su emme değerleri (TF: torba filtre, MS: multisiklon, MÇ: mermer çamuru, 15: %15, 30: %30).....	67
Şekil 4.8. 28 ve 90 günlük örneklerde boşluk oranları (TF: torba filtre, MS: multisiklon, MÇ: mermer çamuru, 15: %15, 30: %30).....	68
Şekil 4.9. 100 çevrim ve 200 çevrim sonunda basınç dayanımlarında azalma (TF: torba filtre, MS: multisiklon, MÇ: mermer çamuru, 15: %15, 30: %30).....	69
Şekil 4.10. Donma-çözülme 200 çevrim sonunda ağırlık kayıpları (TF: torba filtre, MS: multisiklon, MÇ: mermer çamuru, 15: %15, 30: %30).....	70
Şekil 4.11. 100 çevrim sonunda dağılan %30 mermer çamuru içeriğine sahip örnekler	70
Şekil 4.12. 200 çevrim sonunda örneklerin mikroskop görüntüleri (a: referans, b: %15 torba filtre ünitesi külü, c: %30 torba ünitesi filtre külü, d: %15 multisiklon ünitesi külü, e: %30 multisiklon ünitesi külü, f: %15 mermer çamuru).....	71
Şekil 4.13. Jeopolimer teknolojisi ve çimento kullanılarak hazırlanan örneklerin basınç dayanımı düzeyleri (a: torba filtre ünitesi külü ile hazırlanan örnekler, b: multisiklon ünitesi külü ile hazırlanan örnekler, TF: torba filtre ünitesi külü, MS: multisiklon ünitesi külü, UK: uçucu kül, MÇ: mermer çamuru, Ç: çimento, AKT: aktivatör- NaSiNaOH, 10: %10, 30: %30, 40: %40, 70: %70).....	74
Şekil 4.14. Jeopolimer teknolojisi ve çimento kullanılmadan hazırlanan örneklerin basınç dayanımı düzeyleri (a: torba filtre ünitesi külü ile hazırlanan örnekler, b: multisiklon ünitesi külü ile hazırlanan örnekler, TF: torba filtre ünitesi külü, MS: torba filtre ünitesi külü, UK: uçucu kül, MÇ: mermer çamuru, AKT: aktivatör- NaSiNaOH, 20: %20, 40: %40, 50: %50, 80: %80, 100: %100).....	76
Şekil 4.15. Jeopolimer teknolojisi ve çimento kullanılmadan hazırlanan örneklerin basınç dayanımı düzeyleri (a: torba filtre ünitesi külü ile hazırlanan örnekler, b: multisiklon ünitesi külü ile hazırlanan örnekler, TF: torba filtre ünitesi külü, MS: torba filtre ünitesi külü, UK: uçucu kül MÇ: mermer çamuru, AKT: aktivatör- 8M NaOH, 20: %20, 40: %40, 50: %50, 80: %80, 100: %100).....	77
Şekil 4.16. Jeopolimer harç örneklerinde basınç dayanımı değerleri (MS: multisiklon ünitesi külü, TF: torba filtre ünitesi külü MÇ: mermer çamuru, 100: %100, 50: %50, 40: %40, 20: %20).....	79
Şekil 4.17. Buhar küründen sonra jeopolimer örneklerin mikroskop görüntüleri (a: referans, b: %100 multisiklon ünitesi külü, c: %100 torba ünitesi filtre külü, d: %50 multisiklon külü+%50 uçucu kül, e: %50 torba filtre külü +%50 uçucu kül, f: %50 multisiklon külü+%50 mermer çamuru, g: %50 torba filtre külü+%50 mermer çamuru, h: %20 multisiklon külü+%40 uçucu kül+%40 mermer çamuru, ı: %20 torba filtre külü +%40 uçucu kül+%40 mermer çamuru).....	81

Sayfa

Şekil 4.18. Jeopolimer örneklerde toplam su emme değerleri (MS: multisiklon ünitesi külü, TF: torba filtre ünitesi külü, MÇ: mermer çamuru, UK: uçucu kül, 100: %100, 50: %50, 40: %40, 20: %20).....	83
Şekil 4.19. Jeopolimer örneklerde boşluk oranı (MS: multisiklon ünitesi külü, TF: torba filtre ünitesi külü, MÇ: mermer çamuru, UK: uçucu kül, 100: %100, 50: %50, 40: %40, 20: %20).....	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Bir atıksu arıtma tesisinin farklı noktalarından elde edilmiş çamurun ısıtılma değerleri.....	9
Çizelge 2.2. Arıtma çamuru külünün ve arıtma çamuru külü kullanılarak hazırlanan klinkerin sızma konsantrasyonları	15
Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal kompozisyonu.....	33
Çizelge 3.2. Multisiklon ve torba filtre baca gazı arıtma sistemlerinden elde edilen arıtma çamuru külü	34
Çizelge 3.3. Uçucu külün kimyasal kompozisyonu	35
Çizelge 3.4. Mermer çamurunun kimyasal kompozisyonu.....	36
Çizelge 3.5. Portland çimentosu kimyasal kompozisyonu.....	37
Çizelge 3.6. S/S teknolojisi kullanılarak hazırlanan hamur örneklerinin içeriği	43
Çizelge 3.7. Jeopolimerizasyon teknolojisi kullanılarak hazırlanan hamur örneklerinin içeriği.....	44
Çizelge 3.8. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinin içerikleri.....	46
Çizelge 3.9. Jeopolimerizasyon teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinin içerikleri ..	48
Çizelge 4.1. Çamur küllerinin kimyasal kompozisyonu	55
Çizelge 4.2. Arıtma çamuru külünde ölçülen ağır metal düzeyleri ve yasal sınır değerlerle karşılaştırması	58
Çizelge 4.3. Puzolanik aktivite değerleri	59
Çizelge 4.4. S/S teknolojisi ile hazırlanan örneklerin yayılma değerleri ve kullanılan süper akışkanlaştırıcı miktarları	60
Çizelge 4.5. Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan örneklerin yayılma çapları.....	73
Çizelge 4.6. EPA TCLP 1311 (1992) yöntemine göre örneklerdeki sızma davranışı	85
Çizelge 4.7. TS EN 12457-4 (2004) yöntemine göre örneklerdeki sızma davranışı	85

1. GİRİŞ

Son yüzyılda hızla gelişen sanayileşme ve beraberinde getirdiği hızlı nüfus artışının sonucu olarak dünyada önemli miktarlarda atık oluşumu ve bu atıkların nasıl bertaraf edileceği ile ilgili sorunlar gündeme gelmeye başlamıştır.

İçme suyu ve atıksulara fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma işlemleri uygulanması sonucunda çökebilen veya yüzebilen hale getirilen katı maddeler çamur olarak ifade edilmektedir. Evsel ve endüstriyel atıksuların arıtılması ile oluşan arıtma çamurları patojen ve zehirli maddeler içerebildiğinden dolayı çevresel sorun oluşturmaktadır (Spinoza ve Vesilind 2001). Oluşan çamurların çevreye zarar vermeyecek şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir. Arıtma çamurları, su ve atıksuların arıtılmasıyla meydana gelen, arıtılmadan çevreye verildiğinde çevreye zarar verebilecek katı ve sıvı karışımdan oluşan maddelerdir. Yüksek miktarda organik madde, besin maddeleri, patojen mikroorganizmalar ve çok miktarda su içerdiklerinden arıtılması gerekmektedir (Yıldız ve ark. 2009).

Arıtma çamurlarının depolanması, toplanması, taşınması ve bertarafı çevre sorunu teşkil etmektedir. Depolama, arazide uygulama çamur bertarafında uygulanan yöntemlerden bazılarınıdır. Arıtma çamurları bertaraf yöntemlerinden biri de yakmadır. Çamurun yanması sonucunda baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler, siklonlar vb. ile tutularak atmosfere çıkışı engellenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Uçabilen bu kül taneciklerine, uçucu kül adı verilmektedir (Aruntaş 2006). Bu işlem esnasında daha iri taneli olan ve baca gazları ile birlikte atmosfere verilemeyerek kazan tabanına düşen küllere de taban külü denilmektedir (Tokuyay 1998).

Yakma sonucunda oluşan uçucu küllerin taşınmaları ve depolanmaları sırasında çevre sorunları meydana gelmektedir. Tehlikeli madde içeriğine sahip olabilen uçucu küller, stabilizasyon/solidifikasyon (S/S) teknolojisi ile depolanabilme özelliklerini sağlayabilmektedir. Atıkların düzenli depolama alanlarında depolanması, atık

yönetiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. S/S teknolojisi ile atık içerisinde bulunan kirleticiler katılaştırılmış materyalde sabitlenerek kararlı hale getirilmektedir (Conner 1990).

Jeopolimerizasyon, düşük sıcaklıkta ve kısa zamanda doğal olarak oluşan, amorf ve yarı kristal üç boyutlu alüminosilikat yapılardan meydana gelen, yüksek mukavemete sahip inorganik çimento alüminosilikat jel bağlayıcısı olarak tanımlanmaktadır (Davidovits 1991). Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, puzolan, maden atığı, atık cam, inşaat kalıntıları gibi yeterli miktarda reaktif alümina ve silika içeren kaynak malzemeleri doğal jeopolimerizasyon reaksiyonları için kullanılmaktadır (Van Jaarsveld ve ark. 1999).

Genel olarak jeopolimer matrislerinin yaklaşık %60'ını uçucu kül ve %15'ini ilave Al-Si kaynakları oluşturmaktadır. Kalan kısım alkali veya alkali-silikat çözeltilerden oluşmaktadır (Davidovits 1991). Ancak bu oranlar atıkların çeşidine ve kimyasal kompozisyonuna göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle jeopolimerizasyon matrisinin atığın kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak farklı oranlarda karıştırılarak hazırlanması gerekmektedir.

Bu çalışmada arıtma çamurlarının yakılmasıyla oluşan küllerin inşaat sektöründe yapı malzemesi olarak geri kazanımı araştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

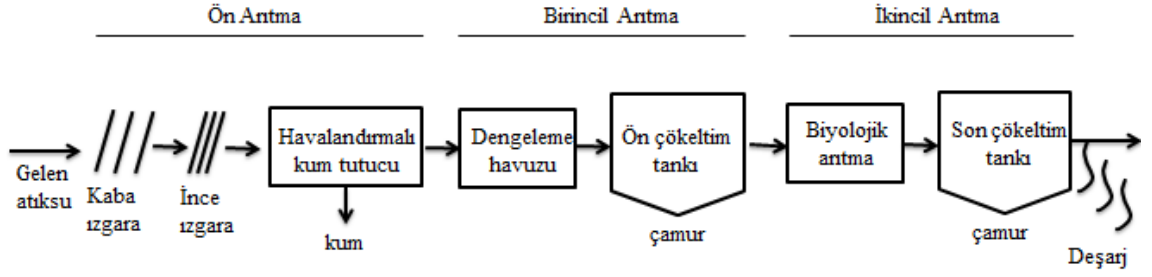
2.1. Arıtma Çamuru ve Oluşum Süreci

Şehirleşme ile beraber nüfusun artması ve sanayileşmenin gelişmesiyle, su kıtlığı sorununun ortaya çıktığı bilinmektedir. Bu sorunun aşılması için doğal suların (nehir, göl vb.) arıtılması doğrultusunda yöntemler geliştirilmeye başlanmıştır. Bunun yanında deşarj edilmeden önce kanalizasyon atıksularının ve endüstriyel atıksuların arıtılması sağlanmıştır. Doğal su ve atık su arıtımının başlıca nihai ürünleri;

- Arıtılmış su,
- Arıtma tesisi atıksuyu,
- Arıtma çamuru.

Atıksuların arıtılması sonucu oluşan sıvı ya da yarı katı halde, kokulu; uygulanan arıtma işlemine bağlı olarak ağırlıkça %0,25 ile %12 katı madde içeriğine sahip atıklar arıtma çamuru olarak adlandırılmaktadır (MWST 1991). Atıksu arıtma tesislerinde arıtılan su şehirlere ve endüstrilere gönderilmektedir. Arıtma tesisi atıksuları alıcı ortamlara deşarj edilmekte ve çamur bertaraf edilmeden önce son kez işlenmektedir. Atıksu arıtma tesisinde arıtılmış su ve tesiste oluşan atıksu nihai ürünler olurken, oluşan çamur nihai ürün olarak kabul görmemektedir (Fleming ve ark. 1986, Parker ve ark. 1992).

Aktif çamur ve damlatmalı filtre işlemi gibi geleneksel atıksu arıtma yöntemlerinde, fazla birikmiş ikincil çamura ek olarak büyük miktarlarda birincil çamur üretilmektedir. Aktif çamur prosesinde ikincil çamur, organik maddenin metabolizması tarafından üretilen mikrobiyal biyokütle olarak adlandırılmaktadır (Gurjar ve Tyagi 2017). Şekil 2.1'de evsel atıksu arıtma tesisinde çamur oluşum süreci özetlenmiştir.



Şekil 2.1. Evsel atıksu arıtma tesisi çamur oluşumu

Arıtma çamurları, arıtma şekline ve amacına göre farklılık göstermektedir. Çökebilen katı maddelerin oluşturduğu ön çökeltim çamurları, kimyasal arıtma ve koagülasyon sonucu oluşan kimyasal çamurlar, biyolojik arıtma işlemleri sonucu oluşan biyolojik çamurlar ve içme suyu arıtma işlemleri sonucunda oluşan çamurlar arıtma çamurları çeşitleri olarak sayılabilmektedir (Metcalf & Eddy 1991).

Arıtma ile giderilen maddelere bağlı olarak büyük hacimlerde çamur oluşumu, oluşan çamurun işlenmesi ve bertarafı çevresel problemler teşkil etmektedir. (Riffat 2012). Bu problemler:

- Çamur, arıtılmamış atıksu içinde önemli miktarlarda bulunmakta ve kokuya sebep olan maddeleri içermektedir.
- Biyolojik arıtmada oluşan ve uzaklaştırılması gereken çamur, ham atıksu içerisindeki organik maddelerin bileşimi halinde, fakat başka bir yapıda, bozunma ve kokuşma eğilimindedir.
- Çamurun sadece küçük bir kısmı katı madde, önemli bir kısmı sudur. Bu nedenle büyük hacimler işgal etmektedir (Metcalf & Eddy 1991).

Çamurda mevcut olan atık katı maddelerin kuru ağırlığının, çökelebilen veya askıda kalabilen katıların ağırlığı olduğu belirtilmektedir. Bu katı maddeler:

- Doğal su ve atıksu içinde bulunan çökebilir katılar,
- Kimyasal koagülantlar ile çöktürülebilen askıda katı maddeler,

- Canlı organizmalardan meydana gelen biyokütle ve atıksu arıtımı sırasında oluşan organik madde şeklinde olabilmektedir.

Çamur çökeldikten sonra içeriğindeki çoğu organik maddeler ve mineral katılar gevşer ve büyük miktarlarda su ile birleşmektedir. Bununla birlikte, su çamurdan kolaylıkla ayrılmamakta ve çamurun nem içeriği yükselmektedir. Sonuç olarak, çamurlar organik içeriğin yanı sıra önemli miktarda su da içermektedir. Bu nedenle arıtma çamurlarının bertarafı nakliye ve taşıma açısından ekonomik problemlere sebep olmaktadır (Gurjar ve Tyagi 2017).

2.2. Arıtma Çamurlarının Yönetimi

Çamur oluşum sürecinde belirtildiği gibi arıtma çamurlarının bertaraf edilmeden önce işlenmesi gerekmektedir. Arıtma çamurlarının işlenmesi, çamurların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, depolanacak ve taşınacak çamurun hacmini ve ağırlığını azaltmaktadır. Çamurun işlenmesi sadece depolanacak hacmi azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda toprak iyileştirici malzeme gibi yan ürünlerin de üretilmesini sağlayabilmektedir. Bu şekilde çamur, sadece atık olarak değerlendirilmek yerine, değerli bir kaynak olarak kullanılabilir.

Atıksu çamurunun niteliğinin atıksu arıtma işlemine, üretilen çamurun miktarına bağlı olduğu bilinmektedir. Arıtma çamuru organik ve inorganik maddelerin yanı sıra bakteri ve virüs, yağ ve gres, azot ve fosfor gibi besinleri ve ağır metalleri içermektedir. Bu nedenle arıtma teknolojisi ve bertaraf yöntemi seçilirken, çamurun her bir bileşeni için farklı çevresel etkilerin olduğu dikkate alınmaktadır (Jensen ve Jepsen 2005). Çamurun yönetiminde düzenli depolama (Wu ve ark. 2019), anaerobik çürütme (Carrere ve ark. 2010), tarım arazisinde kullanım (Bittencourt 2018), yakma (Krejcirikova ve ark. 2019) gibi çeşitli alternatifler mevcuttur.

Düzenli depolama yöntemi ile çamur bertarafı, yaygın olarak tercih edilen yöntemler arasındadır (Wu ve ark. 2019). Ancak düzenli depolamada geniş arazi alanlarına ihtiyaç

duyulmaktadır. Düzenli depolama atık yönetimi hiyerarşinin en alt sırasında yer almaktadır. Bu nedenle çamurların düzenli depolama ile bertaraf yöntemi İsviçre, Hollanda gibi ülkelerde kısıtlanmıştır (Kacprzak ve ark. 2017).

Anareobik çürütmede, anaerobik bakteriler %30-40 arasında çamurda bulunan organik maddeleri parçalamakta ve bu sayede 3:1 oranında metan ve karbondioksit oluşmaktadır (Carrere ve ark. 2010). Günümüzde anaerobik çürütme ile metan gazından yenilenebilir bir enerji kaynağı olan biyogaz üretilmektedir. Bu işlem, çamurun nihai bertarafından önce çamur stabilizasyonu amacıyla yaygın olarak uygulanmaktadır (Tyagi ve Lo 2011).

Bazı arıtma çamurları tarımsal amaçlar için de kullanılabilir. Hemen hemen tüm çamurlar az veya çok ağır metal konsantrasyonu içermektedir. Dolayısıyla çamurun topraklara uygulanması toprakta yüksek seviyede metal üretilme riskini taşımaktadır. Bu nedenle, arıtma çamurları tarımsal amaçlarla kullanılmadan önce patojenlerin giderilmesi için biyolojik veya kimyasal arıtmaya tabi tutulmalıdır (Gurjar ve Tyagi 2017).

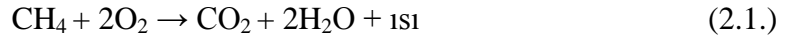
Yakma teknolojisi günümüzde önem kazanan çamur bertaraf yöntemlerinden biri olarak kabul görmektedir. Büyük ölçekli çamurların yakılmasının, yüksek sermaye maliyetleri nedeniyle pahalı bir alternatif olduğu bilinmektedir (LaGrega ve ark. 1994). Ancak, ototermik yakma (kendiliğinden yanma) işleminin geliştirilmesi yakma tekniğini daha kullanılabilir hale getirmiştir. Bu işlemde, birincil ve ikincil çamurlar birbirine karıştırılmakta ve su muhtevasını gidermek için preslenmektedir. Çamur susuzlaştırılması işlemi ile %20-30 arasında katı madde içeriğine sahip oranlarda çamur keki üretilmesini sağlamaktadır. Akışkan yataklı gelişmiş yakma tesislerinde suyu çamurdan uzaklaştırmak için yüksek sıcaklıklarda (750-850°C) yakma işlemi yapılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda yapılan yakmada, bir kere işlem başladıktan sonra çamur yakılmasına devam edilebilmesi için ek gaz yakıtına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu işlemde oluşan kül, elektrostatik çöktürücüler, ıslak yıkayıcılar gibi sistemlerle

arıtılmaktadır. Ayrıca, yakma işlemi sonucu oluşan bu kül, ağır metal içeriğine sahip olabilmektedir (Scragg 1999).

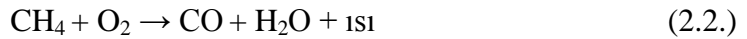
Arıtma çamurları için geri kazanım sistemlerinin oluşturulması, yenilenemeyen doğal kaynaklara olan bağımlılığı azaltmaktadır. Ayrıca çevresel ve insan sağlığını olumsuz etkileyen atık miktarının azalmasını sağlamaktadır. Bu sistemler atık çamurun sürdürülebilir bir yöntemle bertarafına olanak sağlayabilmektedir (Öztürk ve ark. 2015).

2.3. Arıtma Çamurlarının Yakma Teknolojisi İle Yönetimi

Yakma, çamur içindeki yanıcı organik maddelerin ekzotermik reaksiyonlarla hızlı bir şekilde oksitlenmesini sağlamaktadır. Organik bileşiklerin yakılmasıyla karbondioksit ve su buharı oluşmaktadır. Yakma atık hacmini ve miktarını azaltmakla birlikte, organik maddelerin yanmasıyla aynı zamanda zehirlilik özelliği gösteren bileşiklerin azalmasını da sağlamaktadır. Hidrokarbonun yeterli miktardaki oksijenle reaksiyona girerek karbondioksit ve su oluşturması tam yanma olarak tanımlanmıştır (LaGrega ve ark. 1994). Tipik yanma reaksiyonu aşağıdaki gibidir:



Hidrokarbonun yetersiz miktarda oksijen ile reaksiyona girerek karbonmonoksit ve su oluşturması ise eksik yanma olarak tanımlanmaktadır ve eksik yanmanın bir çevre kirliliği olduğu bilinmektedir (LaGrega ve ark. 1994). Eksik yanma reaksiyonu aşağıdaki gibidir:



Yakma yöntemi tehlikeli atık, evsel atık, arıtma çamurları gibi katı atıkların bertarafında yaygın bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Susuzlaştırılmış çamur, oksijenin bulunduğu bir ortamda 420-500°C aralığındaki sıcaklarda tutuşabilmektedir. Organik katıların tamamen yanması için 760-820°C sıcaklığa ihtiyaç duyulmaktadır. Çamur yakıldığında

organik katılar, öncelikle karbondioksit, su buharı ve kül olmak üzere, yükseltgenmiş son ürünlere dönüştürülmektedir. Baca gazında partikül madde ve NO_x, SO_x, dioksin, furanlar gibi diğer gazlar da bulunmaktadır. Atmosfere salınmadan önce hangi kirleticileri içerdiğine bağlı olarak baca gazı arıtma sistemleri kurulmaktadır. Yakma işlemi çamurun kullanımının mümkün veya ekonomik olmadığı durumlarda, depolama alanının yetersiz olduğu durumlarda ve hijyen sebebiyle kullanılmaktadır (Öztürk ve ark. 2015). Yakma işleminin avantaj ve dezavantajları Şekil 2.2’de verilmektedir.

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"> • Islak çamur kekinin hacmini ve ağırlığını yaklaşık %95 oranında düşürmekte böylece bertaraf gereksinimi azaltılmaktadır. • Patojenler tamamen yok edilmektedir. Toksinler yok edilmekte veya azaltılmaktadır. Atık ürünlerin yakılmasıyla enerji kazanımı mümkün olmaktadır. Bu da toplam enerji maliyetini düşürmektedir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek yatırım ve işletme maliyeti gerektirmektedir. Deneyimli işletme ve bakım personeline ihtiyaç duyulmaktadır. • Kül/cüruftaki metal konsantrasyonlarının yönetmelikte belirlenen sınır değerleri aşması durumunda, tehlikeli atık bertaraf yöntemleri gerekmektedir. • Atmosfere salınan partiküllerin ve gazların çevreye zarar vermeyecek şekilde arıtılması gerekmektedir.

Şekil 2.2. Yakma işleminin avantaj ve dezavantajları

Çamurun yakma işleminde, en önemli parametrelerden birinin çamurun nem oranı olduğu bilinmektedir. %30-50 katı madde (%50-70 nem) içeriğine sahip çamur keki ilave yakıtı gerek kalmadan (kendiliğinden yanma) yakılabilmektedir. %20-30 katı madde (%70-80 nem) içeriğine sahip bir çamuru yakmak için ise ilave yakıtı ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple yakma işleminden önce çamurun nem içeriğinin mekanik susuzlaştırma, termal kurutma gibi yöntemlerle azaltılması gerekmektedir (Öztürk ve ark. 2015).

Çamur yakma işleminde diğer önemli bir parametre çamurun ısı (kalorifik) değeridir. Bu değer çamurun birim kütlesi başına açığa çıkan ısı miktarını vermektedir. Çamurdan açığa çıkan ısının miktarı, çamurun çeşidi ve içerdiği yanıcı maddelere bağlı olmaktadır.

Çamurda (ve mevcut yakıtların çoğunda) bulunan birincil yanıcı elementlerin karbon, hidrojen ve kükürt olduğu bilinmektedir. Atıksu arıtma tesisinin farklı noktalarından elde edilen çamurun ısı değeri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Bir atıksu arıtma tesisinin farklı noktalarından elde edilmiş çamurun ısı değerleri (Öztürk ve ark. 2015)

Çamur/Kalıntı Çeşidi	Kuru Katılar (alt ısı değeri) (MJ/kg)
Birincil Çamur	20-28
Aktif Çamur	16-22
Çürütülmüş Çamur	10-15
Gres ve Köpük	39
Elek Atığı	21

Karbon hidrojen ya da kükürt içeriğindeki herhangi bir değişimin çamurun ısı değerini yükselttiği veya azalttığı Çizelge 2.1’de görülmektedir.

Çamur yakma işlemi ısıtma, kurutma, uçucu maddelerin destilasyonu, yanıcı organik maddelerin yakılması ve karbon kalıntılarını yakmak için kalsinasyon aşamalarından oluşmaktadır. Susuzlaştırılmış çamurun yakılmasında kullanılacak fırın, çamurun nem içeriği dikkate alınarak ve karbonize kalıntı topraklaşma yapmayacak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Tesis seçiminde nem içeriğine dikkat edilmesi çamurun ön kurutmaya gerek kalmadan yakılabilmesini sağlamaktadır.

Günümüzde hareketli ızgaralar, akışkan yataklı ve döner tamburlu fırınlar en sık kullanılan insineratör tipleri olarak örnek verilmektedir (Öztürk ve ark. 2015). İnsineratör tiplerinin genel özellikleri Şekil 2.3’te verilmektedir.

Hareketli Izgaralar	Akışkan Yataklı Fırınlar	Döner Fırınlar
<ul style="list-style-type: none"> • Belediye katı atıkları için kullanılan insineratör tipidir. • Hareketli ızgara atığın kontrollü bir şekilde hareket etmesini sağlamaktadır. • Yanma havasının bir kısmı (birincil yanma havası) ızgaralardaki delikler yardımıyla ızgaraların altından verilmektedir. • Birincil yanma havası hareketli ızgarayı soğutmak, ikincil yanma havası yanmayı kolaylaştırmak içindir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Arıtma çamurları ve belediye atıkları için kullanılan insineratör tipidir. • 750-950 °C'de yanma gerçekleşmektedir. • Düşük ısı değerli atıklarda yüksek yanma verimi sağlamaktadır. • Hava kum yatağına verilerek kum akışkan yatak haline gelmektedir. • Atık akışkan yatak içerisinde kumla birlikte tamamen sirküle olarak yanmaktadır. 	<ul style="list-style-type: none"> • Endüstrilerin tehlikeli atık yakmak için kullandığı en yaygın insineratör tipidir. • Birincil ve ikincil yanma odası olmak üzere 2 farklı oda bulunmaktadır. • Birinci yanma odasında katı fraksiyon gaza dönüşmektedir. • İkinci oda, gaz fazın yanma reaksiyonlarının tamamlanmasını sağlamaktadır. • Aynı anda farklı tipte atıklar yakmak için uygundur. • 850-1300 °C'de yanma gerçekleşmektedir.

Şekil 2.3. İnsineratör tiplerinin genel özellikleri

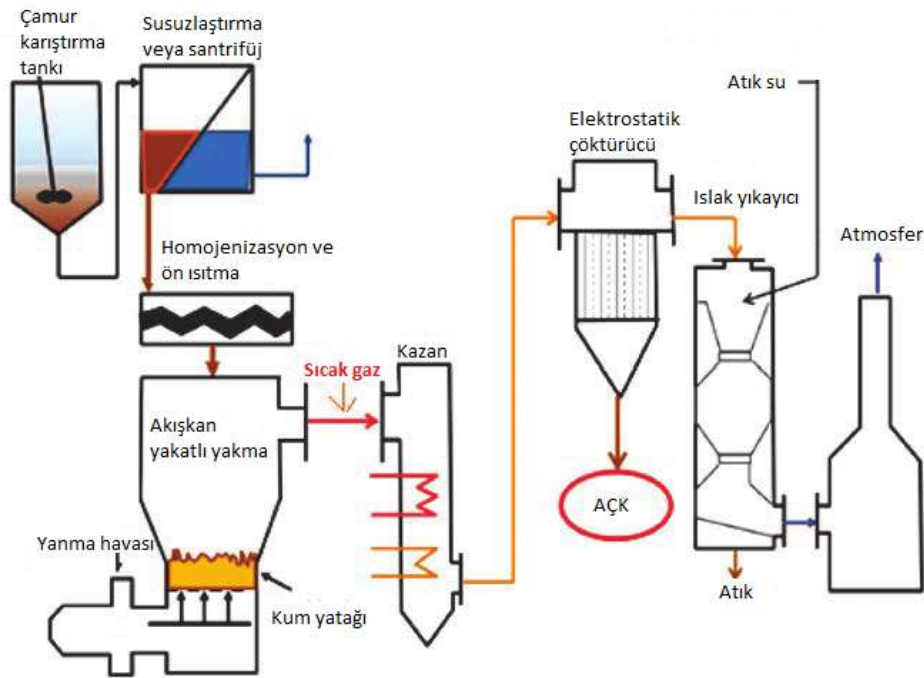
Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi'ne bağlı olarak faaliyet gösteren yakma tesisi akışkan yataklı fırın esasına göre tasarlanmıştır. Aşağıdaki başlıkta akışkan yataklı fırınların temel çalışma prensibi açıklanmıştır.

Akışkan yataklı yakma fırınları

Akışkan yataklı yakma fırınları belediye atıkları, arıtma çamurları, kömür, kimyasal atıklar gibi çeşitli atıkları yakmak için kullanılabilir. Bu teknoloji, yakıtın sıcak akışkanlaştırılmış kum, kül veya tutucu yatağında kademeli hava besleme özelliğiyle yanmasını esas almaktadır. Yatak malzemesi olarak düz kum veya kireçtaşı (CaCO_3) kullanılmaktadır. Kireçtaşı kullanıldığında, karbondioksit açığa çıkarmak ve kül ile

giderilebilecek bir katı olan kalsiyum sülfat (CaSO_4) oluşturmak için kükürt içeren atıkların yanması sonucu oluşan kükürt dioksit oksijenle reaksiyona girmektedir. Yatak malzemesi olarak kireçtaşı kullanıldığında, yüksek kükürlü kömürün minimum kükürt dioksit emisyonuyla yanması sağlanmaktadır (Tchobanoglous ve ark. 1993).

Akışkan yataklı yanmada, kömür, yağ veya gaz gibi herhangi bir yakıt, reaksiyona girmeyen (inert) parçacıkların akışkanlaştırılmış bir yatağında dağılarak yanmaktadır. Akışkan yataklı yakma sistemlerinde yanma sıcaklığı 750° ile 950°C arasında değişmektedir. Akışkan yatakta yakılabilecek olan yakıt miktarı, hava besleme hızı tarafından belirlenmektedir. Sıvılaştırılmış yanmada yakıt, kömür külü, silis kumu veya kükürtü tutması için kireçtaşı gibi akışkanlaştırılmış bir mineral maddesi yatağı içinde yanmaktadır. Havanın yataktan yanması için geçişi, partikülleri şiddetli bir şekilde akışkanlaşmış halde tutmaktadır. Birçok endüstriyel işlem için ısı yakma sisteminde ısı tasarrufu için akışkan yanma kullanılmaktadır (Dryden 1982). Tipik bir akışkan yataklı yakma sistemi Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Akışkan yataklı yakma sistemi (AÇK: arıtma çamuru külü) (Vouk ve ark. 2016)

Dünyada katı atık yakma için birçok akışkan yataklı sistem kullanılmaktadır. Örneğin Rusya'nın St. Petersburg şehrinde, akışkan yataklı yakma fırınları, aktif çamur ve susuzlaştırılmış birincil çamur karışımını yakmak için 1990 yılından itibaren kullanılmaktadır. Tesis günde 250 ton çamur yakma kapasitesine sahip olarak tasarlanmıştır. Çamuru %28-30 katı madde elde edecek şekilde susuzlaştırmak için polimer şartlandırma sistemine sahip pres filtre, ısı geri kazanımı ve kullanımı sistemi, kül uzaklaştırma sistemi, baca gazı arıtma ve nötralizasyon sistemi bulunmaktadır. Yakmadan sonra gazlar 130°C'ye kadar soğutulduktan sonra atmosfere bırakılmaktadır (Turovskiy ve Mathai 2006).

2.4. Arıtma Çamurlarının Yakılmasıyla Oluşan Küllerin Yönetimi

Günümüzde atık malzemelerin inşaat sektöründe kullanımı yaygınlaşmaktadır. CO₂ emisyonlarının azaltılması (Whyte ve ark. 2005) ve doğal kaynak kullanımının sınırlandırılması için atık malzemelerin sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi ve geri dönüşümünün araştırılması önem kazanmaktadır (Dhir ve ark. 2006, Dyer ve ark. 2006). Son zamanlarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve arıtma çamuru külü (AÇK) gibi atıkların inşaat sektöründe kullanımı yaygınlaşmıştır (Dhir ve ark. 2016).

Arıtma çamuru külü, atıksu arıtma işleminin bir yan ürünü olan çamurun yakılmasıyla üretilmektedir. Nüfus artışı, sağlık ve yaşam standartlarının iyileştirilmesi nedeniyle, oluşan çamur miktarı artmaktadır. Geçmişte popüler olan çamurları denizde bertaraf etme yöntemi günümüzde yasaklanmıştır. Çamurların depolama alanlarında bertaraf edilmesi yasal düzenlemelerle kısıtlanmıştır. Arıtma çamurlarının tarım alanlarında kullanılması ise sağlık ve güvenlik nedeniyle sınırlandırılmıştır. Katı atık depolama alanlarını azaltmak için yasal zorunluklar getirilmiştir. Bunun sonucunda, çamurun yakılması ve geri dönüşümü gibi diğer alanların yönetimi sağlanmakta ve bu yöntemlerin gelecekte de devam etmesi beklenmektedir (Dhir ve ark. 2016).

Eurostat (2015) veri tabanından elde edilen bilgilere göre, Avrupa'da 28 ülkede, yılda 11 milyon ton arıtma çamuru olduğu tespit edilmiştir. Ancak yakma sonucu elde edilen

kül ile ilgili verilerin eksik olduğu gözlenmiştir. Avrupa ülkelerinin 20'sinin çamuru bir miktar yaktığı bildirilmiştir. En fazla miktarda çamur yakılan Almanya'yı (yılda 1,3 milyon ton), sırasıyla %99 oranında Hollanda, %97 oranında İsviçre ve %83 oranında Belçika izlemektedir. Genel olarak oluşan arıtma çamurlarının %22'lik bir kısmının yakıldığı rapor edilmiştir. Yakma işleminin atık hacminde yaklaşık %90 oranında azalma sağladığı bilinmektedir. Bu nedenle Avrupa ülkelerinde yılda yaklaşık 240 bin ton arıtma çamuru külü oluştuğu tahmin edilmektedir.

Arıtma çamurlarının yakılması ile belediye atıklarının yakılması aynı atık kategorisinde olmamasına rağmen, arıtma çamuru külü tek başına değerlendirildiğinde bile, önemli bir atık yönetimi sorunu oluşturmaktadır. Sürdürülebilir atık yönetimi anlayışında, arıtma çamuru külünün de tüm atık malzemeler gibi uygun bir şekilde geri kazanımının araştırılması gerekmektedir (Whyte ve ark. 2005).

Arıtma çamuru külü, fiziksel olarak, malzeme tanecik ebadı bakımından siltli veya ince kumla karşılaştırılabilir niteliktedir. Çimentoya ve seramik malzemelere ikameleri olarak karıştırılabilirliği araştırılmaktadır. Bu nedenle, arıtma çamuru külünün, çimento, beton, tuğla, fayans, cam, seramik, jeoteknik uygulamalar ve yol kaplamaları gibi birçok inşaat sektöründeki potansiyel uygunluğu değerlendirilmiştir (Dhir ve ark. 2016).

2.5. Arıtma Çamuru Külünün Kullanımı ve Çevre Açısından Değerlendirilmesi

İnşaat sektöründeki yüksek enerji talebi ve doğal kaynak tüketimi, çevre üzerinde büyük bir yük oluşturmaktadır. Aynı zamanda inşaat endüstrisinin depolama sahalarına gönderdiği atık miktarları artmaktadır. Buna paralel olarak, son zamanlarda, çevreye zarar verebilecek etkilerin daha fazla araştırılmasıyla, sürdürülebilirlik giderek daha önemli bir konu haline gelmiştir. Bunun sonucunda, inşaat sektöründe atık yönetimi, AB Atık Çerçeve Direktifi (European Community 2008) ve Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin (European UN General Assembly 1992) bir parçası olarak hem Avrupa hem de dünyadaki mevzuatın ana ilkelerine dâhil edilmiştir.

İnşaat uygulamalarında ikincil malzemelerin kullanılması, sürdürülebilir atık yönetimi yaklaşımına uygun kabul edilmektedir ve doğal malzemelere olan talebi ve bertaraf edilecek atık miktarını azaltmanın yanı sıra taşıma maliyetlerini de azaltmada yararlı olabilmektedir (Tyagi ve Lo 2013). Uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi ikincil malzemeler, çimentoda ikameli olarak kullanılacak değerli inşaat malzemeleri arasında sayılmaktadır. Arıtma çamuru külü gibi diğer atıklar ile ilgili araştırmalar artmaktadır. Arıtma çamuru külünün emisyon değerlerinin kontrolü ve külün yapı malzemesi olarak kullanıldıktan sonra hizmet ömrü boyunca zehirli (toksik) kimyasalları sızdırma özelliği taşıyıp taşımadığı gibi konuların araştırılması gerekmektedir. Arıtma çamuru külünün güvenilir özellik göstermesi, külün inşaat malzemesi olarak kabul edilmesinde önemli bir adımı ifade etmektedir (Dhir ve ark. 2016).

Arıtma çamuru külünün beton, seramik, jeoteknik ve yol kaplama gibi uygulamalar için teknik, çevresel ve ekonomik açıdan kullanılabilirliği aşağıda açıklanmıştır. Arıtma çamuru külünün farklı alanlarda kullanımına ilişkin standartlar ve ağır metal sızıntı suyu konsantrasyonları dikkate alınmalıdır (Dhir ve ark. 2016).

2.5.1. Betonla ilgili uygulamalar

Betonun dayanıklılık, durabilite özelliklerinden dolayı inşaat endüstrisinde en çok kullanılan malzeme olduğu bilinmektedir. Ancak üretim sırasında, ağırlıklı olarak klinker üretim aşamasından kaynaklanan yüksek karbon ayak izi meydana gelmektedir. Doğal kaynakların korunması ve CO₂ emisyonlarının düşürülmesi için ikincil kaynaklar ve geri dönüşüm malzemelerinin kullanılması teşvik edilmektedir (Collery ve ark. 2015).

Alışlagelmiş yöntemlerin dışına çıkıp atık malzemelerin kullanımı sorunsuz bir süreç olmamıştır. Ancak, doğal kaynakların tüketilmesi üzerine vergi getirilmesi gibi yeni politikalar ve artan çöp depolama maliyetleri bu ikincil ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılmasını desteklemiştir.

Arıtma çamuru külünün betonla ilgili uygulamalardaki çevresel değerlendirmesi, çimento klinker üretimi, hafif agrega üretimi, harç ve normal ağırlıktaki betonların üretimi, blokları ve düşük dayanımlı malzemeler gibi konuları kapsamaktadır (Dhir ve ark. 2016).

Çimento klinker üretiminde atık malzeme ikamesi

Çimento klinker üretimi için arıtma çamuru külü kullanımı %1 - %10 arasında değişen oldukça düşük oranlarda araştırılmıştır. 'Ekolojik çimento klinkerleri' olarak adlandırılan bu deneysel karışımlar arıtma çamuru külünün yanı sıra aynı zamanda uçucu kül, bakır cürufu, endüstriyel arıtma çamuru külü gibi çeşitli atık maddeleri de içermektedir (Lin ve Lin 2005).

TCLP, bu ürünlerin sızma davranışını değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Çimento klinkerine ikameli olarak eklenmiş arıtma çamuru külünün ve referans karışımların ilgili EPA tehlikeli atık limitleri ile karşılaştırması Çizelge 2.2'de verilmektedir.

Çizelge 2.2. Arıtma çamuru külünün ve arıtma çamuru külü kullanılarak hazırlanan klinkerin sızma konsantrasyonları

TCLP Sızma Konsantrasyonları mg/L							
	Cu	Cr	Cd	Pb	Ni	Zn	Ba
Lin ve Lin (2005)							
AÇK	1,321	0,016	0,0154	0,284	-	1,084	-
Referans (%0 AÇK)	<0,02	<0,016	<0,014	0,72	-	0,33	-
%6,84 AÇK	<0,02	<0,016	<0,014	0,56	-	0,32	-
%8,51 AÇK	<0,02	<0,016	<0,014	0,61	-	0,28	-
%9,29 AÇK	<0,02	<0,016	<0,014	0,68	-	0,46	-
EPA limit değeri	15	5	1	5	-	25	100

Arıtma çamuru külü kullanılarak hazırlanan örneklerin sızma sonuçlarının EPA tehlikeli atık limit değerlerinin altında olduğu Çizelge 2.2'de görülmektedir. Birçok çalışmada

arıtma çamuru içeren örneklerin ağır metal konsantrasyon değerleri ile referans örneğin ağır metal konsantrasyon değerleri benzer özellikler göstermiştir.

Hafif agregası üretimi

Hafif agregalar peletleme ve arıtma çamuru külünün ısı işleminde üretilmiştir. 1050°C'de sinterlendikten sonra üretilen 250 mm büyüklüğünde agregası peletleri EPA TCLP yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir (Dhir ve ark. 2016).

Serbest bırakılmış As, Ba, Cd, Cr, Pb, Hg ve Se konsantrasyonları EPA'nın tehlikeli atık sınır değerlerinden daha düşük olduğu ve dahası Cd, Pb ve Hg konsantrasyonlarının en katı AB içme suyu sınır ölçütlerinin bile altına düştüğü gözlenmiştir. Veriler, ağır metallerin, hafif agregası üretim işleminde oluşturulan sert dış yüzey tabakası içerisinde etkili bir şekilde kontrol edilebildiğini göstermektedir (Maozhe ve ark. 2013).

Harç ve beton üretimi

Arıtma çamuru külü, harç ve beton uygulamalarında ince agregası veya çimentoya ikameli olarak kullanıldığında, çimentonun veya ince agregasının sızma davranışları hem kullanımdan önce hem de betonların imha edilmesi durumunda ele alınmıştır.

Beton ve harç numuneleri için, çimento veya agregası bileşeni olarak kullanılan arıtma çamuru külünün ağır metal konsantrasyonlarının çok düşük seviyelerde ve referans örnekle karşılaştırılabilir düzeyde olduğu Çizelge 2.2'de görülmektedir. Arıtma çamuru külü kullanılan ürünlerden sızan ağır metal konsantrasyonlarının sınır değerlerin altında olduğu görülmüştür.

Lin ve Lin (2005) arıtma çamuru külü içeren çimentoya kıyasla kül içeriğine sahip betonların kırıldıktan sonra ağır metal düzeyinin arttığı gözlemiştir. Sızma konsantrasyonlarının kırılmış örnekte artmasının sebebinin örneklerin mevcut yüzey

alanlarının artması olduğu düşünölmektedir. Ağır metal düzeylerinde artış arıtma çamuru külü içeren örneklerin dışında referans örneklerde de görölmüşür.

Bloklar

Arıtma çamuru külünün bloklarda kullanımının çevresel değeriendirilmesi, külün sızma davranışları incelenerek yapılmıştır. Yapılan bir çalışmada bloklarda %20 oranında arıtma çamuru külü kullanılmıştır ve sızma davranışları 3 ay boyunca izlenmiştir (Dutch Ministry 2000, Environmental and Water Technology Centre of Innovation Ngee Ann Polytechnic 2012). Khanbilvardi ve Afshari-Tork (2002) yaptıkları çalışmada ise %40 oranında arıtma çamuru külü içeren agrega kullanmışlardır. Yapılan bu çalışmalarda aşğıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- %20 oranında arıtma çamuru külüne sahip bloklarda, As, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn ve Co gibi ağır metallerin 3 aylık izleme periyodu sonucunda sızma konsantrasyonlarının Hollanda yönetmeliklerine göre sınır değeri altıda kaldığı gözlenmiştir. Bloklardan toprağı ve yeraltı suyuna geçiş gözlenmemiştir (Dutch Ministry 2000).
- Kıyı yapılarında kullanılan %40 oranında arıtma çamuru külü içeren ince agrega blokları için, Ba ve Cd elementlerinin 12 aylık sızma davranışları TCLP metoduna göre incelenmiştir. Referans örneklerle benzer değeri elde edilmiştir. Ancak sızma davranışlarının diğıer elementler için de incelenmesi gerektiğı düşünölmektedir (Khanbilvardi ve Afshari-Tork 2002).
- 3-12 aylık izleme periyodunda salınan element konsantrasyonlarının zaman içinde tutarlı kaldığı tespit edilmiştir. Kül içeriikli beton bloklarında bulunan elementlerin çözünlüğüünün sınırlı olduğunu göstermektedir.

Düşük dayanımlı malzemeler

Genellikle çimento, kum ve uçucu kül karışımından oluşan düşük dayanımlı malzemeler, dolgu maddesi olarak kullanılabilir. Bu ürünlerin, gürültü ve titreşimleri azaltabilen avantajlara sahip olduğu bilinmektedir.

Yapılan bir çalışmada, arıtma çamuru külü, agrega olarak ezilmiş taş tozu ve bağlayıcı olarak portland çimentosu veya yüksek fırın cürufu kullanılarak karışım hazırlanmıştır. Burada, altı değerli kromun (Cr (VI)) sızma özelliklerine odaklanılmıştır (Fujita ve ark. 2011, Horiguchi ve ark. 2011). Arıtma çamuru külünün portland çimentosu ve yüksek fırın cürufu ile yaptıkları kombinasyonda sızma değerlerinin 0,13-0,02 arasında olduğu kaydedilmiştir. Yüksek fırın cürufunun portland çimentosuna göre gözenekleri doldurmada daha iyi performansa sahip olduğu tespit edilmiştir. Elementlerin çözünürlüğünü azaltmak ve sızmayı en aza indirebilmek için çamur külüne arıtma işlemleri uygulanması gerekmektedir.

2.5.2. Seramik uygulamalar

Seramik endüstrisi, dünya çapında yaklaşık 300 milyar dolar değerinde olduğu tahmin edilen dev bir pazar olarak kabul görmektedir (WinterGreen Research 2014). Geleneksel seramik uygulamaları arasında tuğlalar, fayanslar, cam eşya ve beyaz eşya bulunmaktadır. Ayrıca, seramik malzemelerin otomobil, makine, metal, mimari, elektronik, elektrik, askeri, optik, mıknatıslar, tıbbi ve nükleer enerji santralleri de dâhil olmak üzere, birçok önemli endüstride kullanılmaktadır. Seramik, bu geniş uygulamalarda termal, mekanik ve kimyasal özellikleri nedeniyle faydalı bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Örneğin, bu malzemeler uçaktaki gaz türbini motorlarında, valfler, rulmanlar ve pompalar gibi parçalarda düşük ısı iletkenliği ve yüksek sıcaklık kararlılığı, aşınma ve kimyasal saldırılara karşı yüksek dirençleri, mukavemet ve dayanıklılık özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Richerson 2006).

Seramikte en yaygın kullanılan hammaddenin kil olduğu bilinmektedir. Kil su ile karıştırıldığında plastikleşmekte ve uygulanan ısı ile dayanıklı mekanik özelliklere sahip ürünler oluşmaktadır. Silika, kuvars ve feldspat minerallerini içeren, diğeri önemli seramik malzemeler camlarda ve beyaz eşyalarda bileşen olarak kullanılmaktadır (Kingery ve ark. 1976). Arıtma çamur külünün tuğla, kiremit ve cam gibi daha geleneksel seramik uygulamalarında kullanılabilmesi için araştırmalar yapılmıştır. Arıtma çamuru külünün, hem kile ikameli olarak hem de dolgu maddesi bileşeni olarak kullanılması kabul edilmiştir.

Seramik ürünlerde kullanılan arıtma çamuru külünün çevresel etkileri değerlendirilirken sızma davranışlarına ek olarak, tuğlaların, kiremitlerin ve cam seramiklerin üretimi sırasında fırından kaynaklanan emisyonların izin verilen sınırlar içinde olması gerekmektedir. İngiltere'deki Elliott'in Brick Ltd fabrikasında arıtma çamuru külü ile yapılan seramiklerin emisyon salımı 2 gün boyunca izlenmiştir (Anderson ve ark. 2002). Bu projede, tuğla hammaddesinin %5'i kadar arıtma çamuru külü kullanılmıştır. Kükürt ve azot oksitler, florürler ve klorürler, karbon monoksit, uçucu organik bileşikler, toplam partiküller ve kadmiyum, krom, bakır, kurşun ve nikel gibi metallerin konsantrasyonları izlenmiştir. İzlenen kirletici konsantrasyonlarının, Çevre Koruma Yasası'nda belirtilen sınırların altında olduğu tespit edilmiştir (EPA 1990). Bununla birlikte, arıtma çamuru külünün daha önce bir ısı işleminden geçmesi nedeniyle organik bileşiklerinin ve uçucu maddelerin yanmış olması, külün seramik endüstrisinde kullanımı için avantaj sağlamaktadır.

2.5.3. Jeoteknik uygulamalar

Jeoteknik, zemin veya zemin içindeki mühendislik problemlerinin çözümü için jeolojik, jeofizik ve hidrolojik bilimsel prensiplerin uygulanması olarak tanımlanmaktadır. Jeoteknik mühendislik alanı, toprak işleri (kazma ve doldurma), zemin iyileştirme, şev stabilizasyonu ve istinat duvarı yapımı dâhil olmak üzere çok çeşitli uygulama türlerini kapsamaktadır. Bu jeoteknik uygulamalar, kullanılan büyük miktarlar ve genellikle daha düşük mekanik dayanım gereksinimleri göz önüne alındığında, ikincil ve geri

dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı için umut verici fırsatlar sunmaktadır. Ancak, bu tür malzemelerin kullanılmasının gerekli performans seviyesini sağlayabildiğinin gösterilmesi gerekmektedir (Ribbing 2007). Jeoteknik, zemin malzemesi olarak kullanıldığında, bu uygulamaların çevresel etkilere karşı daha hassas olduğu bilinmektedir. Zira malzemelerden salınan bileşenler yeraltı suyu sistemine girebilmekte ve canlı yaşamını olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Dermatas ve Meng 2003).

Arıtma çamur külünün jeoteknik uygulamalarda kullanımında toprak stabilizasyonu kısmına odaklanılmış ve dolgu malzemesi olarak kullanımı ele alınmıştır (Lin ve ark. 2007). 21. yüzyıldan itibaren arıtma çamuru külü jeoteknik uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır.

2.5.4. Yol kaplaması uygulamaları

Yolların, araçların seyahat etmeleri için sağlam ve dayanıklı bir yüzeye sahip olmaları gerekmektedir. Yolların yapısal işlevleri arasında, taşıt tekerleği yükünü alt zemin toprağına dağıtmak ve kaldırımın tasarım ömrü boyunca trafiği desteklemek sayılabilmektedir (Hoy ve ark. 2016). Kaldırım yapısı, farklı kalınlıklarda çok sayıda katman içermektedir. Tipik esnek yol kaplama yapılarının katmanları Şekil 2.5'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Tipik esnek yol kaplama yapılarının katmanları (Dhir ve ark. 2016)

Yol kaplamalarının taşıtların güvenli bir şekilde seyahat etmeleri için düzgün, pürüzsüz, ancak kaymaya karşı dayanıklı bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Yüzey kaplama tipik olarak, iyi döşenmiş, dayanıklı ve sürtünmeli malzemeden yapılmış, aşınmaya dayanıklı katmanlardan oluşmaktadır (O'Flaherty 2002).

Bir yol kaplama malzemesi olarak arıtma çamuru külünün potansiyel kullanımına ilişkin araştırmalar oldukça sınırlıdır. Arıtma çamuru külünün asfalt tabakalarda mineral dolgu maddesi olarak kullanılmasının en çok araştırılan seçenek olduğu bilinmektedir.

2.6. Stabilizasyon/Solidifikasyon Teknolojisi

Tehlikeli atıkların yönetiminde stabilizasyon ve solidifikasyon yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

- Tehlikeli atık alanlarının iyileştirilmesi
- Arıtma işlemlerinden geçen atıkların yönetimi
- Kirlenmiş toprakların işlenmesi S/S teknolojisinin uygulama alanları olarak sayılabilmektedir (Conner 1990).

Kararlı hale getirme (stabilizasyon) genel olarak, atığın zehirlilik içeriğini ve kirleticilerin atıktan taşınım oranını azaltmak için atıkla bazı bağlayıcıların ve katkı maddelerinin karıştırıldığı bir işlem olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla stabilizasyon, kirletici maddelerin, uygun ortam koşullarında bağlayıcılar ve katkı maddelerinin eklenmesiyle atıkların tamamen veya kısmen bağlandığı kimyasal bir işlem olarak ifade edilmektedir (Conner 1990).

Fiziksel bir süreç olan katılaştırma (solidifikasyon) atığın dayanım, sıkışma, geçirgenlik gibi fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesini sağlayan, yine bağlayıcı ve katkı maddelerinin kullanıldığı bir süreç olarak tanımlanmaktadır (Pojasek 1979). Bu

nedenle, stabilizasyon ve solidifikasyon hem atık zehirlilik miktarında ve hareketliliğinde azalmayı sağlamakta, hem de kararlı hale getirilmiş malzemenin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesini kapsamaktadır. Atığın özelliklerine uygun katılaştırma yöntemi ve özel katkı maddelerinin seçilmesi; atığın bünyesindeki tehlikeli maddelerin ön işlemlerle kararlı hale getirilmesi ve seçilen yöneteme göre katılaştırma işleminin yapılması gerekmektedir (Tajudin 2016). S/S uygulamalarının amaçları:

- Atık toksisitesinin ve hareket edebilirliğinin azaltılması,
- Atıkları sızıntı sağlamayacak şekilde daha dayanıklı hale getirebilmek,
- Malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi,
- Emniyetli bir giderim metoduyla katılaştırılmış örneklerin yapı malzemesi amacıyla tekrar kullanımı sağlamak olarak sayılabilmektedir.

Solidifikasyon ve stabilizasyon ile atığın sıkıştırıldığında dayanıklılık ve sızdırmazlık artmakta gözeneklilik ise düşmektedir. Bu sayede, solidifikasyon teknolojisinin uygulandığı atıklar deponi sahalarında deponlanabilecek kriterleri sağlamış olmaktadır (Cheeseman 1998). S/S atığın çeşitli bağlayıcı maddelerle karıştırılarak, içerisindeki kirleticilerin hareketini ve çözünürlüğünü sınırlayan bir yöntem olarak bilinmektedir. Çimento etkisiyle oluşan yüksek pH sayesinde metaller, sertleştirilmiş yapı içerisinde çözünemeyen hidroksil, karbonat vb. formlarda tutulmaktadır. Böylelikle atığın metalleri sızdırma potansiyeli azaltılmaktadır. S/S teknolojisi, özellikle ağır metal içeren inorganik atıkların arıtımında başarılı bir yöntem olarak kabul görmektedir. İlave edilen bağlayıcı, pH'ı değiştirirken çökeltme reaksiyonlarının oluşumunu sağlamakta ve kirletici çözünürlüğünü azaltmaktadır (Lasheen 2013). Çimento esaslı sistemlerde S/S teknolojisinin avantaj ve dezavantajları Şekil 2.6'da sıralanmıştır (Filibeli 2013).

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"> • Proses ekipmanları ve malzemeler kolay bir şekilde temin edilebilmektedir. • Atıktaki kimyasal değişiklik tolere edilebilmektedir. • Ağır metallerin tutulması sağlanmaktadır. • Düşük sızdırma ve geçirimsizlik sağlanmaktadır. • Atıkların çimento ile karıştırılması ve muamelesi kolay bir şekilde yapılabilmektedir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Çimento ve diğer katkı malzemeleri atığın ağırlığının ve hacminin artmasına neden olabilmektedir. • Çimentonun priz almasında olumsuz etki yapan maddeler içeren bazı atıkların karıştırılmasında pahalı ön işlemler ve çimento türleri veya katkı malzemeli gerekmektedir. • Proses basit görünmekle birlikte uzmanlık gerektirebilmektedir.

Şekil 2.6. Çimento esaslı sistemlerde S/S teknolojisinin avantaj ve dezavantajları

Stabilize edilmiş bir kütleden kirletici maddelerin potansiyel kaybı sızma testleriyle belirlenmektedir. Sızma testi, kararlı hale getirilmiş örneklerden kirletici maddelerin sıvı ortamlara geçebilmesi olarak tanımlanmaktadır (LaGrega ve ark. 1994). S/S teknolojisi ile atıklar, bağlayıcı maddeler ile karışarak katı forma sahip atık yığınları oluştururken, hem kirleticilerin sızma olasılıkları azalmakta hem de suyun neden olduğu işletme problemleri giderilmektedir (Köse ve Akyıldız 2017).

2.7. Jeopolimerizasyon Teknolojisi

‘Jeopolimer’ ilk olarak 1991 yılında Davidovits (1991) tarafından, katı alüminosilikatın yüksek konsantreli sulu alkali hidroksit ile reaksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Sentetik alüminasilikat materyalinden üretilen silikat çözeltileri genel olarak ‘inorganik polimerler’ olarak adlandırılmaktadır. Bu malzemeler, çeşitli uygulamalarda geleneksel çimentolu sera gazı emisyonlarının azaltılmasında etkili olmaktadır (Gartner 2004). Hammadde seçimi ve işleme koşullarına bağlı olarak jeopolimerler, yüksek basınç dayanımı, düşük büzülme, hızlı veya yavaş çökeltme, asit direnci, yangına dayanıklılık ve düşük ısı iletkenliği gibi çok çeşitli özelliklere sahiptirler. Jeopolimerler bu avantajlarına rağmen, belirtilen özellikler tüm jeopolimerik formülasyonlarda geçerli

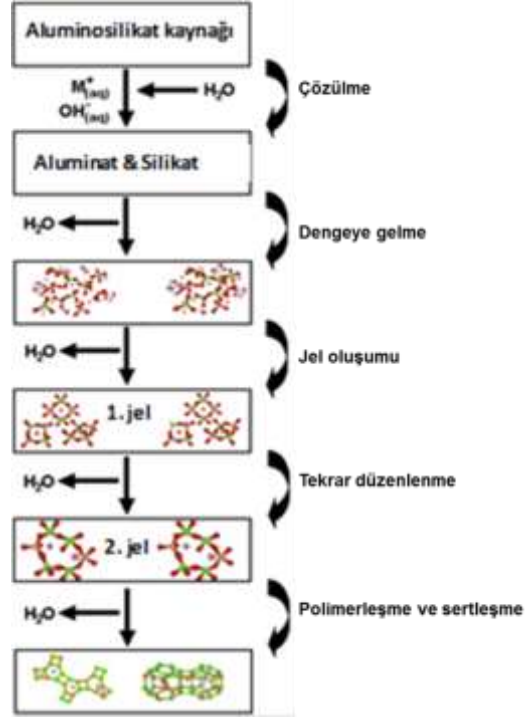
olmamaktadır. İnorganik polimerler, ancak doğru karışım ve işleme tasarımıyla bir çözüm sunmaktadır (Duxson 2007).

‘Jeopolimer’ terimi genel olarak, alkali hidroksit / alkali silikat çözeltisi ile tepkimeye girerek, alkali alüminosilikatların sentezinden elde edilen kristalin tepkimeye giren ürünlerini amorf hale getirmek için kullanılması olarak tanımlanmakta, ancak, jeopolimerik jeller ve kompozitler de yaygın olarak ‘düşük sıcaklıkta alüminosilikat cam’ (Rahier 1996), ‘alkali aktif çimento’ (Palomo 2003), ‘geocemen’ (Krivenko 1994), ‘alkali bağlı seramik’ (Mallicoat ve ark. 2005) ‘inorganik polimer beton ve ‘hidroseramik’ (Bao ve ark. 2005). Kullanılan farklı isimlendirmeye rağmen, bu terimlerin tümü, sulu reaksiyon substratta birleştirilmiş alkali kaynaklı çözünme ve çökme reaksiyonlarının karmaşık bir sistemi olarak tanımlanabilen malzemeleri ifade etmektedir.

Alüminosilikat öncüleri, özellikle sentetik alüminosilikat tozları ve doğal mineraller (Xu 2000) de bazı araştırmalara konu olmaktadır. Yüksek fırın cüruflarının alkali aktivasyonu, 65 yıldan uzun süredir çimento üretimine alternatif olarak kullanılmaktadır (Purdon 1940, Roy 1999). Çimentoya alternatif olarak kullanılan yüksek fırın cürufları genellikle jeopolimerik sistemlerin bir bileşeni olarak kullanılmaktadır. Farklı alüminosilikat kaynaklardan hazırlanan jeopolimerlerin birçok makroskopik özelliği benzer görünse de, bunların mikroyapıları ve fiziksel, mekanik, kimyasal ve termal özellikleri, esasen türetildiği ham maddeye bağlı olarak büyük ölçüde değişmektedir. (Duxson ve ark. 2005, Duxson ve ark. 2007a, Rowles 2003). Moleküler yapı ve nano yapıdaki benzerliklere rağmen, farklı hammaddelerden üretilen jeopolimerlerin özelliklerinde farklılıklar görülmektedir. Uçucu kül bazlı jeopolimerler yapılar genellikle daha dayanıklı ve daha güçlü olduğu bilinmektedir (Duxson 2007b).

1950'lerin sonunda Glukhovsky (1959), silika ve reaktif alümina içeren malzemelerin alkali aktivasyonu için genel bir mekanizma önermiştir. Gluhhovsky modeli, jeopolimerleşme sürecini: yıkım-pıhtılaşma; pıhtılaşma-yoğunlaşma; yoğunlaşma-kristalleşme olarak üç aşamaya ayırmaktadır.

Şekil 2.7'de jeopolimerizasyon mekanizması gösterilmektedir. Şekil 2.7'de gösterilen reaksiyon mekanizması, katı alüminosilikat kaynağının sentetik alkali alüminosilikat haline dönüştürülmesinde meydana gelen temel işlemleri özetlemektedir.



Şekil 2.7. Jeopolimerizasyon mekanizması (Duxson 2007b)

Alüminat ve silikatın (büyük olasılıkla monomerik formda) çözelti içinde serbest bırakılmasıyla yüzeydeki katı parçacıkların çözünmesi, jeopolimerizasyon sırasında katı parçacıkların dönüşümünden sorumlu olan mekanizma olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım, alkalın çözülme tanımlamakta ve Şekil 2.7'deki mekanizma ile açıklanmaktadır. Alüminosilikatların çözünmesi yüksek pH'da hızlı gerçekleşmektedir ve bu durum aşırı doygun alüminosilikat çözeltisi oluşturmaktadır. Sonuç olarak jel şeklinde bir çözelti oluştuğu bilinmektedir (Duxson 2007b).

Portland çimentosunun hidrasyon reaksiyonları jeopolimer yapıların alümina-silikat reaksiyonları (Şekil 2.7) ile farklılıklar göstermektedir. Jeopolimer yapılar aktivatör

çözeltisi kullanılarak üretilmektedir. Aktivatör çözeltisi alkali iyonları ve hidroksil iyonları sağlamaktadır. Yeterince çözülme meydana geldiğinde, alüminatlar ve silikatlar özelliklerin dengelenmesine uğramakta ve alüminosilikat ağı bir jel oluşturmaya başlamaktadır. Jel yeniden polimerize olur ve yüksek oranda polimerleşmiş bir jel yapısı oluşturarak sertleşmektedir. Reaksiyon tamamlandığında, su jelin gözenek yapısına girmektedir (Provis ve Van Deventer 2009, Khale ve Chaudhary 2007).

Portland çimentosu bağlayıcıları kalsiyum silikat hidratları oluşturmak için suyla reaksiyona giren kalsiyum silikat fazların hidrasyon reaksiyonlarına dayanmaktadır. Su jeopolimerler için tamamlayıcı bir bileşen olarak kabul görmektedir. Ancak jel yapısının temel bir bileşeni değildir (Provis ve Van Deventer 2009). Jeopolimerler yapılarda, alüminosilikat reaksiyonunun gerçekleşmesi için bir ortam sağlamak üzere su bulunmaktadır. Bununla birlikte, çimento esaslı malzemeler için, su hidrasyon reaksiyonu sırasında bir gereklilik olmakla birlikte, aynı zamanda hidrasyon ürünü yapısının da bir parçasıdır. Bu nedenle, portland çimentosu bağlayıcı maddesinin kimyası ile jeopolimerlerin kimyası farklılık göstermektedir (Provis ve Van Deventer 2009).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada kullanılan arıtma çamuru külü Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi'nden (BUSKİ) elde edilmiştir. Atıksuların arıtılması ile oluşan çamur yakma tesisinde yakılmakta ve kül oluşmaktadır. Atıksu arıtımından kaynaklanan çamur oluşum süreci ve yakma süreci alt bölümlerde açıklanmıştır.

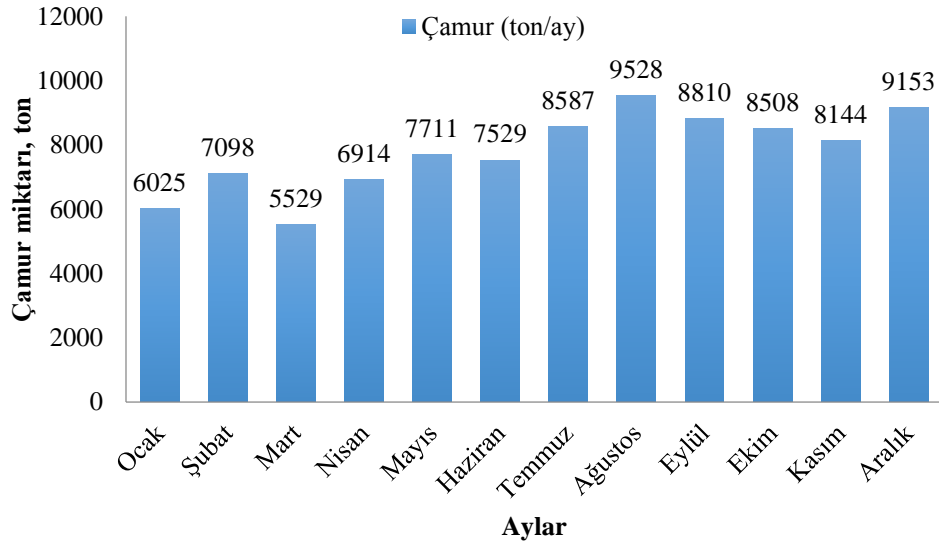
3.1. Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi Kentsel Atıksu Arıtma Tesislerinde Çamur Oluşum Süreci

BUSKİ Doğu Atıksu Arıtma Tesisi 240 000 m³/gün kapasiteye sahip olup, tesis 5 basamaklı BARDENPHO prosesine göre tasarlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan sistem olan BARDENPHO prosesi nitrifikasyon-denitrifikasyon ile azot gidermekle beraber fosfatı da gidermektedir. Beş basamaklı sistemde havalı, havasız ve anoksik bölümler fosfor, azot ve karbon gideriminde rol oynamaktadır. İkinci anoksik bölüm, aerobik bölümde oluşan nitratı elektron alıcı, içsel organik karbonu ise elektron verici olarak kullanıp ilave denitrifikasyon sağlamaktadır. Son havalı bölüm ise kalıntı azot gazını çözültiden sıyırmak ve son çöktürücüde fosfor açığa çıkmasını en aza indirmek için kullanılmaktadır. Sıvı karışım birinci aerobik bölümden anoksik bölüme geri beslenmektedir (James ve ark. 2005). Atıksu arıtma tesisinin görünümü Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. BUSKİ Doğu Atıksu Arıtma Tesisi

Doğu Atıksu Arıtma Tesisi'nden çıkan ham arıtma çamuru bertaraf edilmeden önce çeşitli proseslerden geçmektedir. Öncelikle ham arıtma çamuru son çökeltim tankından %0,86 katı madde oranıyla alınmaktadır. Akabinde arıtma çamuru, içeriğindeki suyun azaltılması için yoğunlaştırma tankından (thickener) geçirilerek %1,5-4 katı madde oranına yükseltilmektedir. Son olarak çamurdaki nemin tamamen uzaklaştırılması için çamur flokları polielektrolit ilavesi ile dekantörde susuzlaştırılarak %20-24 katı madde oranına yükselmektedir. Arıtma çamuru susuzlaştırma işleminden sonra yakma tesisine gönderilmektedir. Bursa'da 2018 yılında oluşan arıtma çamuru miktarları Şekil 3.2'de verilmektedir.



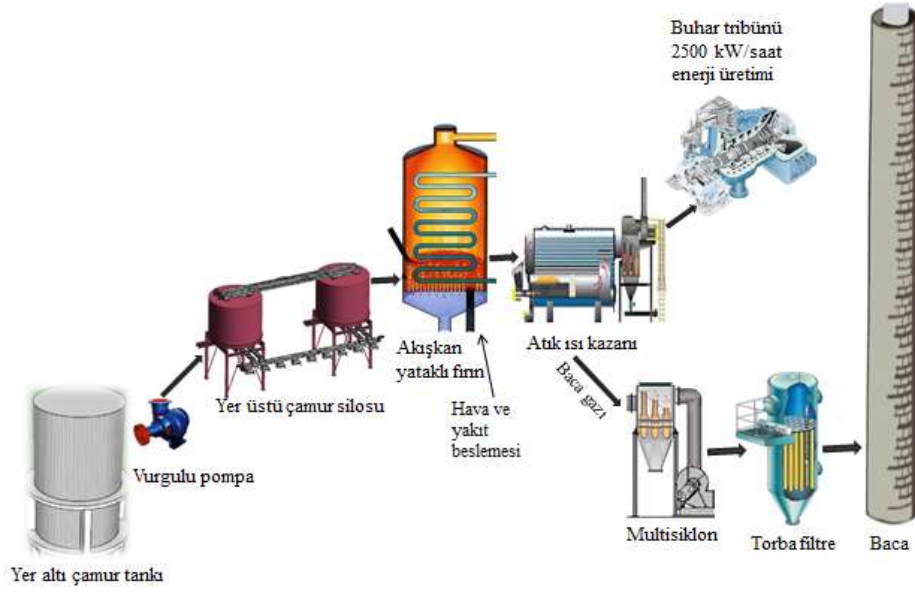
Şekil 3.2. 2018 yılında oluşan çamur miktarı

3.2. Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi Çamur Yakma Tesisi'nde Kül Oluşum Süreci

BUSKİ'ye bağlı 400 ton/gün kapasiteli Akışkan Yataklı Çamur Yakma ve Enerji Elde Etme Tesisi 2017 yılında faaliyet göstermeye başlamıştır. Tesisin genel görünümü Şekil 3.3'te, işleyiş prensibi Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. BUSKİ çamur yakma tesisi



Şekil 3.4. BUSKİ yakma tesisinin genel çalışma prensibi

BUSKİ 400 ton/gün kapasiteli akışkan yataklı yakma tesisi, enerji üretimi ve emisyon kontrolü olarak 2 ana kısımda incelenebilmektedir. Yakma tesisinin enerji üretimi kısmının akım şeması Şekil 3.5'te, emisyon kontrolü kısmının akım şeması Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5. Çamur yakma tesisi – enerji üretimi akım şeması



Şekil 3.6. Çamur yakma tesisi – emisyon kontrolü akım şeması

Dekantörde susuzlaştırılmış %22-25 kuruluktaki çamur kantarda tartıldıktan sonra kamyonlar vasıtasıyla 3000 m³ hacimli yeraltı tankına boşaltılmaktadır. Çamur, tankın altında yer alan vurgulu pompalar vasıtasıyla yerüstü ara depolama silosuna iletilmektedir. Çamur daha sonra 2 adet 118 m³'lük yerüstü silosuna aktarılmaktadır. Çamur deposu ve silolarından kaynaklanan kirli hava biyofiltre ile koku giderimine tabi tutulmaktadır.

Çamur, yerüstü silosundan pompalar vasıtasıyla akışkan yataklı fırına gönderilmektedir. Hava akımını sağlayan cihazlar (blower) ile akışkan yataklı fırının altına verilen ve atıl ısıyla ısıtılan 588°C'deki sıcak hava içerideki kum yatağını kabartarak akışkan hale getirmektedir. Fırına beslenen ve ortalama 3600 kcal/kg ısı değerine sahip çamur sıcak kum ve yanma havasıyla karışarak 868°C sıcaklıkta 5 saniye içinde tam olarak yanıp reaksiyona girmeyen (inert) bir küle dönüşmektedir.

Fırından çıkan sıcak baca gazları öncelikle birincil ısı eşanjörüne gönderilmekte ve hava akımını sağlayan cihazlardan gelen hava 588°C sıcaklığa ısıtıldıktan sonra fırındaki kum yatağının altına beslenmektedir. Böylece yanma işleminin devamlılığı sağlanmaktadır. Birincil ısı eşanjöründen çıkan ve sıcaklığı 658°C 'ye düşen baca gazı atık ısı kazanında 41 bar basınçta ve 458°C'de 12 ton/saat buhar üretiminde kullanılmaktadır. Atık ısı kazanlarında üretilen 12 ton/sa, 41 bar, 455 °C'de kızgın buhar ayrı bir binada yer alan buhar türbinine gönderilmekte ve saatte 2500 kw elektrik üretimi sağlanmaktadır.

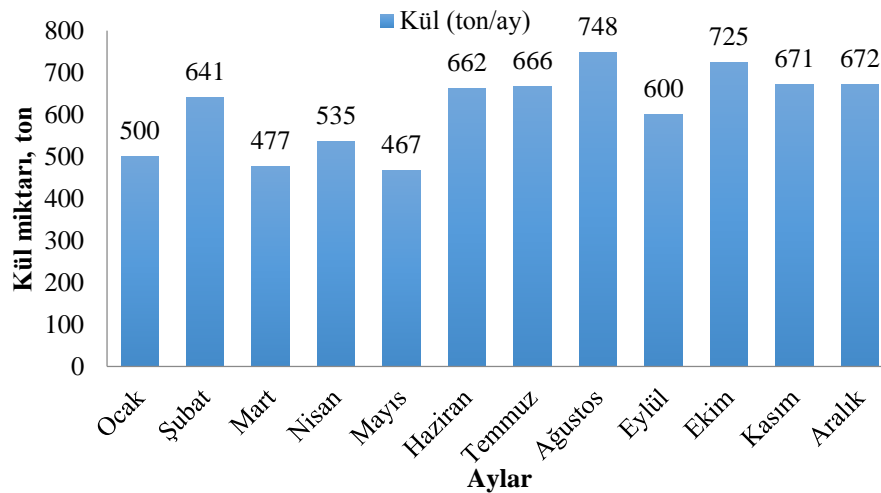
Atık ısı kazanından çıkan toz yüklü baca gazı partikül tutulması amacıyla multisiklona (çoklu siklon) verilmektedir. 81 adet küçük siklondan oluşan yapı oluşturduğu dairesel akış ve santrifüj kuvveti etkisiyle 4 mikron üzerindeki partikülleri toplamakta ve bu sayede %75-85 oranında toz giderimi sağlanmaktadır.

Multisiklon ünitesi çıkışından baca gazına gerekli görüldüğünde (kül ağır metal içeriğine sahip olduğu durumlarda) aktif karbon dozajı yapılarak gaz içerisindeki ağır metaller, dioksin ve furanlar gibi maddelerin giderimi sağlanmaktadır. Bu noktada aktif

karbonun yanı sıra kireç dozajı da yapılı ve gaz içerisindeki SO₂ gibi bileşiklerinin giderimi sağlanmaktadır.

Kireç ve aktif karbon dozajından sonra baca gazı 352 adet torbadan oluşan torba filtreye verilmektedir. Filtrelerdeki tıkanmalar hava jetiyle temizlenmektedir. Tıkanan bir filtre kompartmanı temizlenirken aynı anda sistem durmadan diğer filtre kompartmanları arıtmaya devam etmektedir.

Siklon ve torba filtreden çıkan küller ayrı olarak toplanıp bertaraf edilmektedir. Torba filtreden çıkan gaz ısı eşanjörü sistemine girmektedir. Bu sistem 3 adet farklı ısı eşanjöründen oluşmaktadır. Bu donanım sayesinde akışkanlaştırma havası ısıtılmakta ve baca gazı sıcaklığı 140°C'de tutulmaktadır. Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik'teki istenilen emisyon değerleri torba filtre çıkışında sağlanmaktadır. Ancak baca gazı emniyet amaçlı olarak dolgu yataklı yıkama kulesinde partiküllerin nihai giderimi sağlanmaktadır. NO_x arıtımıyla ilgili ise gerekli durumlarda yakma fırınına üre (CH₄N₂O) beslemesi yapılmaktadır. Sistemden baca gazının emilmesini sağlayan 2 adet emiş fanı bulunmaktadır. Emilen baca gazı 40 metre yükseklikteki bacayla atmosfere verilmektedir. Baca gazları emisyon değerleri sürekli emisyon kontrol sistemiyle takip edilmektedir. Tesiste 2018 yılında oluşan arıtma çamuru külü miktarları Şekil 3.7'de verilmektedir.



Şekil 3.7. BUSKİ 400 ton/gün kapasiteli Akışkan Yataklı Çamur Yakma ve Enerji Elde Etme Tesisi'nde 2018 yılında oluşan arıtma çamuru külü miktarları

Deneysel çalışma hamur örnekleri ve harç örnekleri olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Her iki kısımda S/S ve jeopolimerizasyon yöntemleri ile üretim yapılmıştır. Kullanılan malzemeler ve yapılan deneyler aşağıdaki başlıklarda detaylı bir şekilde verilmektedir.

3.3. Materyal

3.3.1. Hamur örneklerinde kullanılan malzemeler

Puzolanik çimento: Çalışmada kullanılan TS EN 197-1 (2002) standardına uygun CEM IV/B 32,5 N puzolanik çimento, Bursa Çimento A.Ş.'den temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan tüm kimyasal kompozisyon analizleri X-ışını floresan spektroskopisi (XRF) (Thermoelectron-ARL 8660, İsviçre) cihazı ile yapılmıştır. Kullanılan çimento Şekil 3.8'de, çimentonun kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1'de verilmiştir.



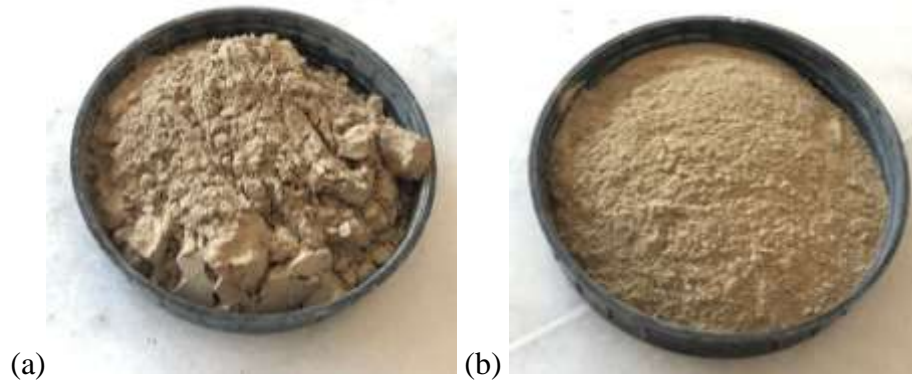
Şekil 3.8. Çimento

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal kompozisyonu

Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	KK
Ağırlıkça, %	33,75	9,47	4,86	40,35	1,62	2,72	0,79	1,22	5,10

KK: kızdırma kaybı

Arıtma çamuru külü: Deneysel çalışmalarda Bursa’da bulunan 400 ton/gün Kapasiteli Akışkan Yataklı Yakma Tesisi’nden elde edilen arıtma çamuru külü kullanılmıştır. Arıtma çamuru külü, multisiklon ve torba filtre üniteleri olmak üzere iki farklı baca gazı arıtma sisteminden elde edilmiştir. Torba filtre ünitesinden elde edilen külün incelik değeri 8790 cm²/g, özgül ağırlığı 2,73 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Multisiklon ünitesinden elde edilen külün incelik değeri 4930 cm²/g, özgül ağırlığı 2,73 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Torba filtre ünitesi külünün pH değeri 12,1, multisiklon ünitesi külünün pH değeri 12 olarak ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan arıtma çamuru külü Şekil 3.9’da, arıtma çamuru külünün kimyasal kompozisyonu ve Çizelge 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.9. (a) Multisiklon ünitesi külü (b) Torba filtre ünitesi külü

Çizelge 3.2. Multisiklon ve torba filtre baca gazı arıtma sistemlerinden elde edilen arıtma çamuru külü

Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	KK
MS külü										
Ağırlıkça, %	28,53	7,34	4,71	27,48	4,52	5,47	1,17	2,76	0,12	2,76
TF külü										
Ağırlıkça, %	21,82	7,89	5,28	29,71	4,97	6,33	1,2	2,77	0,15	2,19

MS: multisiklon ünitesi külü, TF: torba filtre ünitesi külü, KK: kızdırma kaybı

Termik santral uçucu külü: Düşük CaO’lu F sınıfı uçucu kül (ASTM C618-19 2019) Orhaneli Termik Santrali’nden temin edilmiştir. Uçucu külün incelik değeri 4300 cm²/g,

özgül ağırlığı $2,31 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüştür. Uçucu kül Şekil 3.10'da, uçucu külün kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.10. F sınıfı uçucu kül

Çizelge 3.3. Uçucu külün kimyasal kompozisyonu

Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	KK
Ağırlıkça, %	54,99	19,06	11,69	2,06	2,68	0,75	0,99	2,13	0,001	1,31

KK: kızdırma kaybı

Mermer çamuru: Çalışmada kullanılan mermer çamuru Bursa'daki bir mermer ocağından temin edilmiştir. Mermer çamuru kullanılmadan önce 105°C 'de 24 saat etüvde kurutulmuş ve 2 mm'de öğütülmüştür. Mermer çamuru Şekil 3.11'de, mermer çamurunun kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.4'te verilmiştir.



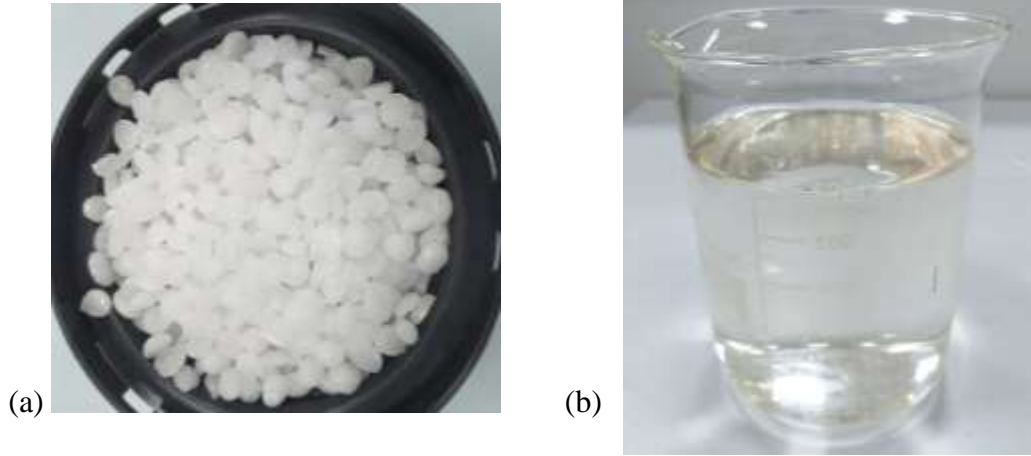
Şekil 3.11. 105°C 'de 24 saat etüvde kurutulup ve öğütülmüş mermer çamuru

Çizelge 3.4. Mermer çamurunun kimyasal kompozisyonu

Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	KK
Ağırlıkça, %	0,70	0,22	0,13	45,60	6,82	0,12	0,10	0,03	44,49

KK: kızdırma kaybı

Aktivatör: Hamur örnekleri çimento kullanılarak veya kullanılmadan hazırlanmıştır. Çimento kullanılarak hazırlanan S/S örnekleri su kullanılarak hazırlanmıştır. Çimento kullanılarak hazırlanan jeopolimer hamur örneklerinde aktivatör olarak NaSilNaOH (w/w:5) (%97 saflığa sahip granüller formdaki sodyum hidroksit ve %8 Na₂O, %27 SiO₂ ve %65 H₂O kimyasal kompozisyonuna sahip sıvı sodyum silikat (cam suyu)) çözeltisi kullanılmıştır. Çimento içermeden hazırlanan hamur örneklerinde ise aktivatör olarak NaSilNaOH ve 8M NaOH kullanılmıştır. Çalışmada çözelti hazırlamak için kullanılan NaOH paletleri ve NaSil çözeltisi Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. (a) NaOH paletleri (b) NaSil çözeltisi

3.3.2. Harç örneklerinde kullanılan malzemeler

Harç örnekleri hazırlanırken portland çimentosu, Çizelge 3.2’de kimyasal kompozisyonu verilen 2 farklı baca gazı arıtma sisteminden elde edilen arıtma çamuru

külü, Çizelge 3.3'te kimyasal kompozisyonu verilen F sınıfı uçucu kül, Çizelge 3.4'te kimyasal kompozisyonu verilen mermer çamuru kullanılmıştır.

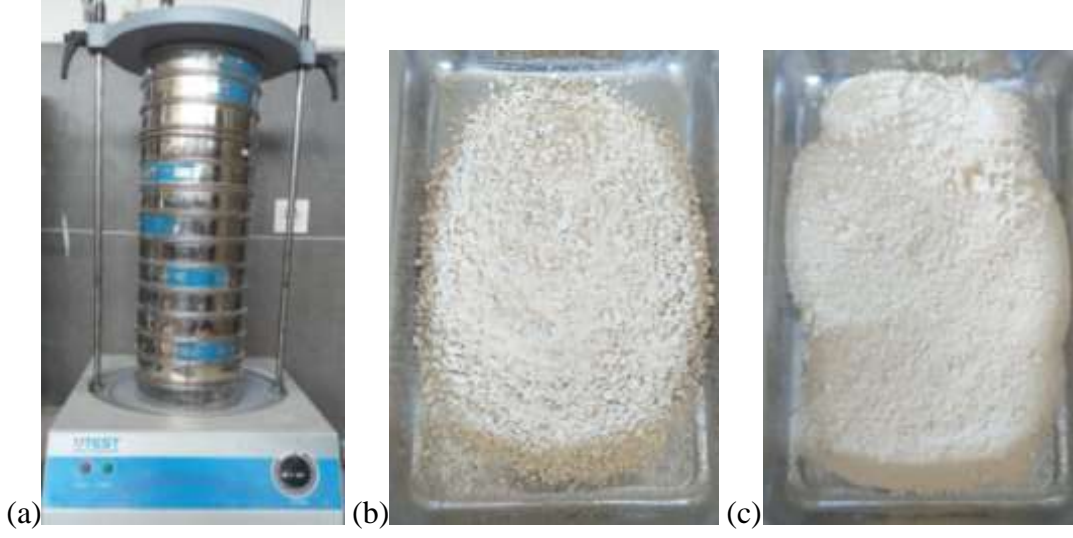
Portland çimentosu: Deneysel çalışmada harç karışımlarının hazırlandığı ikinci kısımda Bursa Çimento Fabrikası'ndan temin edilen TS EN 197-1 (2002) standardına uygun, incelik (blaine) değeri 3530 cm²/g, özgül ağırlığı 3,15 g/cm³ olan CEM I 42,5 R sınıfında portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Portland çimentosu kimyasal kompozisyonu

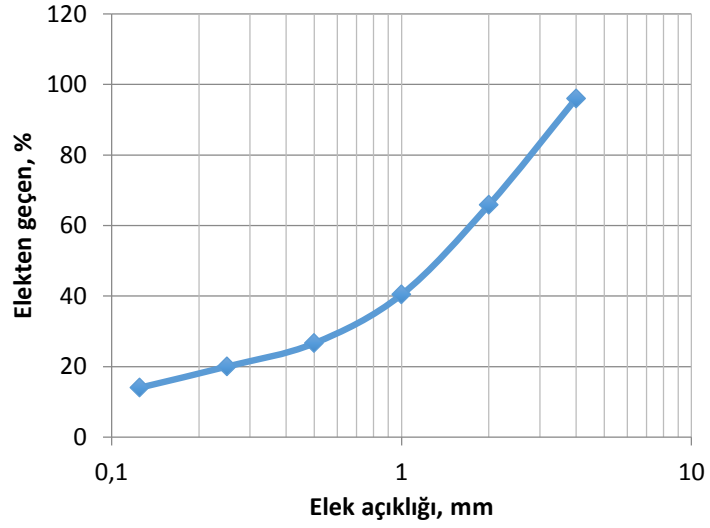
Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	KK
Ağırlıkça, %	18,86	5,71	3,09	62,71	1,16	2,36	0,54	0,59	0,01	14,7

KK: kızdırma kaybı

Agrega: S/S teknolojisi ile hazırlanan deneysel çalışmalarda maksimum tane çapı 5 mm olan kırma kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan örneklerde ise 0,125-5 mm tane çapına sahip kırma kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Çok ince agrega bağlayıcılık özelliği gösterdiğinden su ihtiyacını arttırmaktadır. Örneklerin su ihtiyacının artması harç kıvamının oluşmamasına sebep olmaktadır. Bu nedenle çalışmada agrega elenerek kullanılmıştır. Elek analizi ASTM C 136-14 (2014) standardına göre yapılmıştır. Elek analizinden sonra 0,125 mm'den geçen kısım ve eleğin üstünde kalan kısım Şekil 3.13'te, agreganın gradasyon eğrisi Şekil 3.14'de gösterilmektedir.



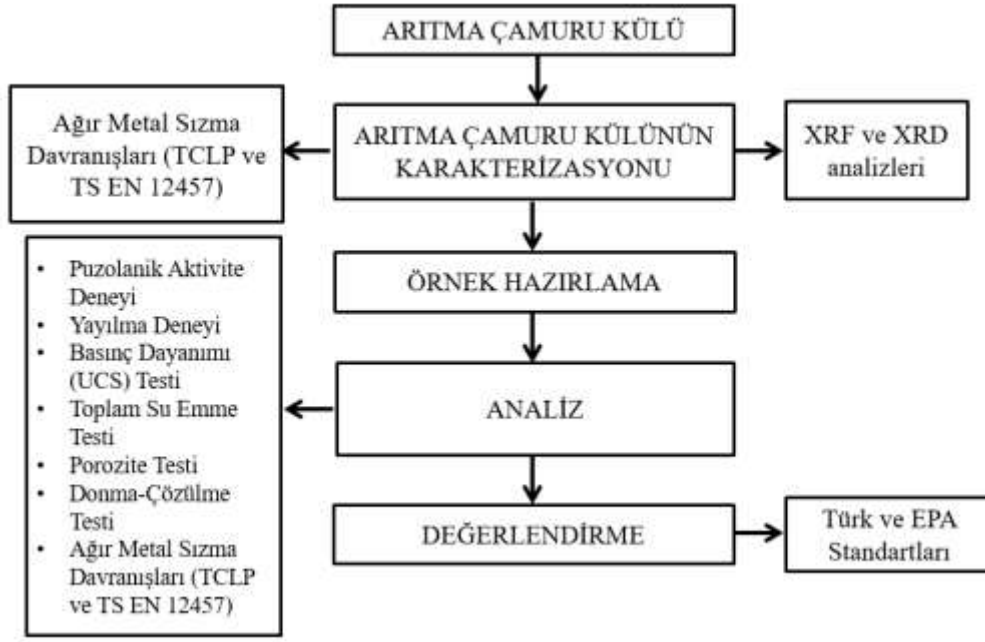
Şekil 3.13. (a) Elek analizi cihazı (b) 0,125-5 mm çap aralığıdaki agrega (c) 0-0,125 mm çap aralığıdaki agrega



Şekil 3.14. Agrega gradasyon eğrisi

3.4. Deneysel Yöntem

Çalışmada kullanılan deneysel yöntem Şekil 3.15’de verilmiştir.



Şekil 3.15. Çalışmada kullanılan deneysel yöntem

3.5. Arıtma Çamuru Külünün Karakterizasyonu

3.5.1. XRF analizi

Deneysel çalışmalarda kullanılan tüm kimyasal kompozisyon analizleri X-ışını floresan spektroskopisi (XRF) (Thermoelectron-ARL 8660, İsviçre) cihazı ile yapılmıştır.

3.5.2. XRD analizi

X ışını difraktometresi her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanmaktadır. X-ışını difraktometresi cihazıyla kayaçların, kristalin malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin nitel ve nicel incelemeleri yapılabilmektedir. Arıtma çamuru külünün kristal fazlı mineralojisi, CuK α ($\lambda = 1,54059 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılarak yüksek çözünürlüklü bir toz X ışını difraktometresi (Bruker d8 discover, USA) kullanılarak değerlendirilmiştir. Taramalar, 2θ açısında, $0,02$ aralıklarla 10° - 70° arasında yapılmıştır.

3.5.3. Ağır metal analizi

Arıtma çamuru külünün ağır metal içeriğinin belirlenebilmesi için öncelikle nitrik asit ve hidroklorik asitle mikro dalga yakma işlemi yapılarak numuneler ekstrakte edilmiştir (EPA 3015A 2007). Asitle yakma Anton Paar, Avusturya (Şekil 3.16) mikro dalga cihazı ile EPA 3015A (2007) standardına uygun olarak yapılmıştır.



Şekil 3.16. Mikro dalga cihazı

Mikro dalga ile yakma işleminden sonra külün ve örneklerin ağır metal analizi indüktif olarak eşleşmiş plazma-optik emisyon spektrometresi (Şekil 3.17) (ICP-OES 5100-Agilent Technologies, USA) ile yapılmıştır.



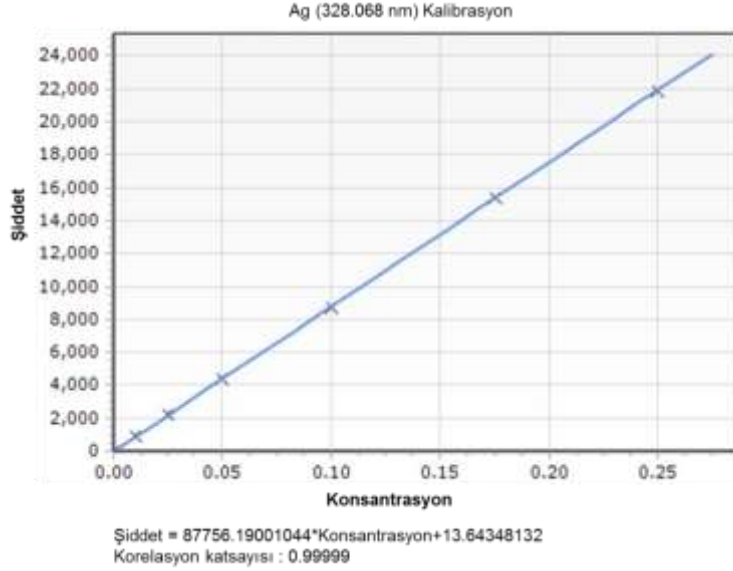
Şekil 3.17. ICP-OES cihazı

ICP-OES, su ve atıksulardaki metallerin belirlenmesi için hızlı, hassas ve yaygın olarak geliştirilmiş ileri teknolojiye sahip bir analiz metodudur. Asitlendirilmiş ve filtrelenmiş numunede çözülmüş metaller tespit edilmektedir. ICP-OES cihazı ile tam bir parçalanmadan sonra bütün metalleri belirlemek mümkün olmaktadır.

ICP-OES cihazı, 27,1 MHz' de tipik olarak titreşen radyo frekans alanında revize edilen Ar gazının uygulanmasıyla elde edilen bir kanal akımından oluşmaktadır. Bu radyo frekans alanı, plazma ile sınırlanan ve desteklenen bir kuvars torchun çevrelediği soğutulmuş su bobini (coil) tarafından iyonize gaza indüktif olarak eşleşmiştir. Numune aerosolü nebulizer ve spray chamber aşamalarından geçtikten sonra ve torchun içerisine yerleştirilmiş bir enjektör tüpü ile plazma içine taşınmaktadır. Numune aerosolleri ICP'nin içine direkt olarak enjekte edilerek atomlar yaklaşık olarak 6000°K – 8000°K sıcaklık derecesine maruz bırakılmaktadır. Moleküllerin neredeyse tamamen ayrışmasından dolayı, kimyasal girişimlerde önemli bir azalma sağlanmaktadır.

Analizler multi element stok çözeltisi kullanılarak yapılmıştır. 6 noktalı bir kalibrasyon grafiği kullanılarak yapılan analizlerde kalibrasyon aralığı 0-0,25 ppm'dir. Örnek olarak

Ag için elde edilen kalibrasyon grafiği Şekil 3.18'de verilmiştir. Diğer metallerin kalibrasyon grafikleri EK-1'de verilmiştir.



Şekil 3.18. Ag için elde edilen kalibrasyon grafiği

Çamur külünün ağır metal içeriği ve yapı malzemesi olarak geri kazanılması durumunda tehlike sunup sunmayacağı sızma testleriyle TS EN 12457-4 (2004) ve EPA TCLP 1311 (1992) standartlarında belirtilen ekstraksiyon ve analiz yöntemlerine göre araştırılmıştır. Analiz sonuçları Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik Ek-2'de (2010) belirtilen evsel atık ve tehlikeli atık sınır değerleri ve EPA TCLP 1311 (1992) standardındaki toksisite sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır. Analizler 2 tekrarlı olarak yapılmış sonuçların ortalaması alınmıştır.

3.6. Hamur Örneğlerinin Hazırlanması

3.6.1. S/S teknolojisi uygulama yöntemi

Örneğler arıtma çamuru külü, puzolanik çimento, F sınıfı uçucu kül, mermer çamuru ve su kullanılarak hazırlanmıştır. Örneğlerde sıvı/katı oranı 0,4 olarak kullanılmıştır. Örneğleri hazırlamak için ilk olarak tüm kuru materyal 5 dk karŐıtırılmıŐ, daha sonra

aktivatör ya da su eklenip 5 dk daha karıştırılmıştır. Elde edilen harç numuneleri 50×50×50 mm boyutlarındaki metal kalıplarda 28 gün boyunca oda sıcaklığında (22-23°C'de) hava kürüne tabi tutulmuştur. S/S teknolojisi sadece çimento içeren örnekler için kullanılmıştır. Çimento içeren örneklerde toplam ağırlığın %30'u oranında arıtma çamuru külü kullanılmıştır. S/S teknolojisi ile hazırlanan hamur örnekleri Şekil 3.19'da verilmiştir. S/S teknolojisi kullanılarak hazırlanan hamur örneklerinin içeriği Çizelge 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.19. S/S teknolojisi ile hazırlanan hamur örnekleri

Çizelge 3.6. S/S teknolojisi kullanılarak hazırlanan hamur örneklerinin içeriği

Çimento	Uçucu Kül	Arıtma Çamuru Külü	Mermer Çamuru	Aktivatör
%10	%30	%30	%30	Su
%40	-	%30	%30	Su
%40	%30	-	%30	Su
%70	-	-	%30	Su
%40	%30	%30	-	Su
%70	-	%30	-	Su
%70	%30	-	-	Su

3.6.2. Jeopolimerizasyon teknolojisi uygulama yöntemi

Örnekler arıtma çamuru külü, puzolanik çimento, F sınıfı uçucu kül, mermer çamuru ve çözeltiler kullanılarak hazırlanmıştır. Jeopolimer örnekler için NaSi1NaOH ve 8M NaOH çözeltileri kullanılmıştır. Örneklerde sıvı/katı oranı 0,4 olarak kullanılmıştır. Örnekleri hazırlamak için ilk olarak tüm kuru materyal 5 dk karıştırılmış, daha sonra aktivatör ya da su eklenip 5 dk daha karıştırılmıştır. Elde edilen harç numuneleri

50×50×50 mm boyutlarındaki metal kalıplarda 28 gün boyunca oda sıcaklığında (22-23°C'de) hava kürüne tabi tutulmuştur. Jeopolimer örnekler hem çimento kullanılarak hem de çimento kullanılmadan hazırlanmıştır. Çimento içeren örneklerde toplam ağırlığın %30'u oranında, çimento içermeyen örneklerde toplam ağırlığın %20'si oranında arıtma çamuru külü kullanılmıştır. Jeopolimerizasyon teknolojisi ile hazırlanan hamur örnekleri Şekil 3.20'de verilmiştir. Jeopolimerizasyon teknolojisi kullanılarak hazırlanan hamur örneklerinin içeriği Çizelge 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.20. Jeopolimerizasyon teknolojisi ile hazırlanan hamur örnekleri

Çizelge 3.7. Jeopolimerizasyon teknolojisi kullanılarak hazırlanan hamur örneklerinin içeriği

Çimento	Uçucu Kül	Arıtma Çamuru Külü	Mermer Çamuru	Aktivatör
%10	%30	%30	%30	NaSiNaOH
%40	-	%30	%30	NaSiNaOH
%40	%30	-	%30	NaSiNaOH
%70	-	-	%30	NaSiNaOH
%40	%30	%30	-	NaSiNaOH
%70	-	%30	-	NaSiNaOH
%70	%30	-	-	NaSiNaOH
-	%40	%20	%40	NaSiNaOH
-	-	%20	%80	NaSiNaOH
-	%50	-	%50	NaSiNaOH
-	-	-	%100	NaSiNaOH
-	%80	%20	-	NaSiNaOH
-	-	%100	-	NaSiNaOH
-	%100	-	-	NaSiNaOH
-	%40	%20	%40	8M NaOH
-	-	%20	%80	8M NaOH
-	%50	-	%50	8M NaOH
-	-	-	%100	8M NaOH
-	%80	%20	-	8M NaOH
-	-	%100	-	8M NaOH
-	%100	-	-	8M NaOH

3.7. Harç Örneklerinin Hazırlanması

3.7.1. S/S teknolojisi uygulama yöntemi

Örnekler arıtma çamuru külü, mermer çamuru, portland çimentosu ve en çok 5 mm tane çapına sahip agrega kullanılarak hazırlanmıştır. Örnekleri hazırlamak için ASTM C 109-16a (2016) standardı kullanılmıştır. Hazırlanan örneklerde su/bağlayıcı oranı 0,485, kum/bağlayıcı oranı 2,75 olarak belirlenmiştir. Karışımlar 20 tokmak darbesi ile kalıplara yerleştirilmiştir. Hazırlanan harçlar 50×50×50 mm boyutlarındaki metal kalıplarda 1 gün 20±2°C'de %95-97 bağıl neme sahip kabinde (Şekil 3.21), toplamda 28 ve 90 gün boyunca 20±2°C'de su kürüne tabi tutulmuştur. Çimentoya atık malzeme eklenmesi ile oluşan sıcaklık değişimleri Flir marka termal kamera ile görüntülenmiştir. Görüntüler harç karışımlarından alınmış ve çekim yapılırken ortam koşulları sabit tutulmuştur.



Şekil 3.21. Kür kabini

S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinin içerikleri Çizelge 3.8'de verilmiştir. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri Şekil 3.22'de verilmiştir. Çizelgede 'TF' torba filtre ünitesinden elde edilen arıtma çamuru külünü, 'MS' multisiklon ünitesinden elde edilen arıtma çamuru külünü, 'MÇ' mermer çamurunu ifade etmektedir. '15' kullanılan bağlayıcının %15'i oranında arıtma çamuru külü veya mermer çamuru kullanıldığını,

'30' kullanılan bağlayıcının %30'u oranında arıtma çamuru külü veya mermer çamuru kullanıldığını göstermektedir.



Şekil 3.22. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri

Çizelge 3.8. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinin içerikleri

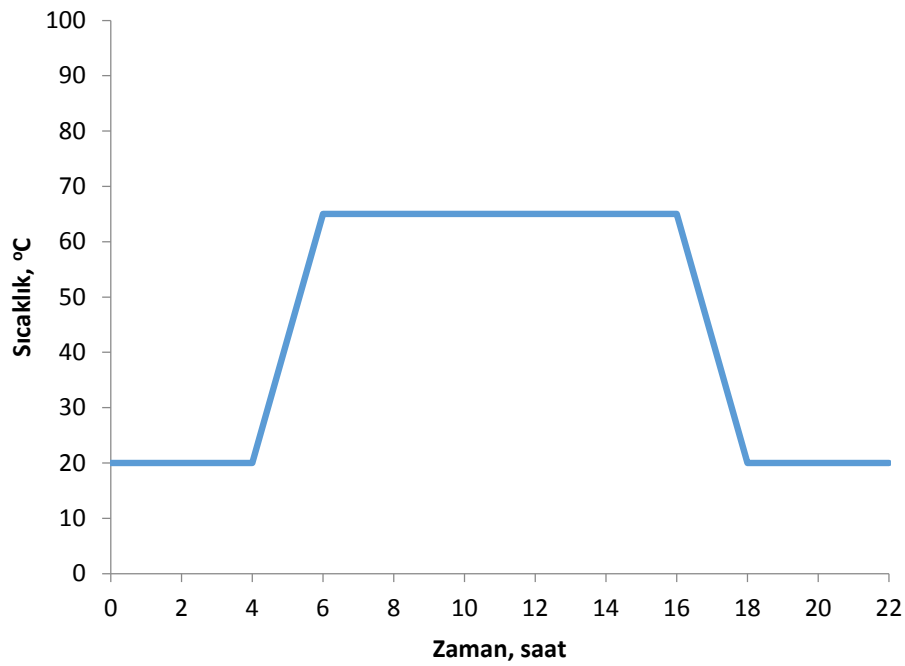
	Referans	TF15	TF30	MS15	MS30	MÇ15	MÇ30
Bağlayıcı-Portland çimento (g)	500	425Ç+ 75TF	350Ç+ 150TF	425Ç+ 75MS	350Ç+ 150MS	425Ç+ 75MÇ	350Ç+ 150MÇ
Kum (g)	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375
Su (g)	242,5	242,5	242,5	242,5	242,5	242,5	242,5

TF: torba filtre ünitesi külü, MS: multisiklon ünitesi külü, MÇ: mermer çamuru, Ç: çimento, 15: %15, 30: %30

3.7.2. Jeopolimerizasyon teknolojisi uygulama yöntemi

Örnekler arıtma çamuru külü, F sınıfı uçucu kül, mermer çamuru ve 0,125-5 mm tane çapına sahip agrega kullanılarak hazırlanmıştır. Referans örnek portland çimentosu ve su ile jeopolimer örnekler NaSiNaOH çözeltisi ile hazırlanmıştır. Çözelti hazırlanırken $M_s=1,6$ (Si_2O/Na_2O) %8 Na_2O oranları kullanılmıştır. Hazırlanan referans örneğinde su/bağlayıcı oranı 0,5, jeopolimer örnekte su/bağlayıcı oranı 0,6, kum/bağlayıcı oranı 2,75 olarak belirlenmiştir. Homojen bir karışımın elde edilebilmesi için bağlayıcı malzemeler ve kırma kireçtaşı agregası karışımı 1 dakika düşük devirde karıştırılmıştır.

Karıştırma işlemi devam ederken alkali aktivatör çözeltisi kuru karışımın üzerine yavaş yavaş ilave edilmiştir. Yaklaşık 3 dakikalık karıştırma işleminin ardından (2 dakika yavaş devir ve 1 dakika hızlı devir) örnekler 30 tokmak darbesi ile kalıplara yerleştirilmiştir. Elde edilen harç numuneleri 50×50×50 mm boyutlarındaki metal kalıplarda 65°C'de 10 saat buhar kürüne tabi tutulmuştur. Buhar küründen sonra örneklerde mikro çatlaklar oluşup oluşmadığı Dino-Lite marka dijital mikroskopla görüntüler alınarak belirlenmiştir. Buhar küründe uygulanan ısıl işlem çevrimi Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23. Buhar küründe uygulanan ısıl işlem çevrimi

Buhar kürü uygulanırken örnekler 4 saat 20°C'de bekletilmiş, cihaz 2 saatte 65°C'ye çıkarılmış, 10 saat 65°C'de bekletilmiştir. Daha sonra sıcaklık 2 saatte 20°C'ye düşürülmüş ve 4 saat 20°C'de bekletilmiştir. Buhar kürü süresince %95 bağıl neme sahip kabin kullanılmıştır.

Jeopolimerizasyon teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri Şekil 3.24'te verilmiştir. Jeopolimerizasyon teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinin içerikleri Çizelge 3.9'da

verilmiştir. Çizelgede ‘MS’ multisiklon ünitesinden elde edilen arıtma çamuru külünü, ‘TF’ torba filtre ünitesinden elde edilen arıtma çamuru külünü, ‘MÇ’ mermer çamurunu ifade etmektedir. ‘100’ %100 oranında arıtma çamuru külü kullanıldığını, ‘50’ %50 arıtma çamuru külü, uçucu kül, mermer çamuru kullanıldığını, ‘20’ %20 oranında arıtma çamuru külü kullanıldığını, ‘40’ ise %20 oranında arıtma çamuru külü kullanılan örneklerde %40 oranında uçucu kül ve mermer çamuru kullanıldığını göstermektedir.



Şekil 3.24. Jeopolimerizasyon teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri

Çizelge 3.9. Jeopolimerizasyon teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinin içerikleri

Örnekler	Çimento (g)	Aritma Çamuru Külü (g)	Uçucu Kül (g)	Mermer Çamuru (g)	Aktivatör (g)
Referans	300	0	0	0	150 (su)
MS100	0	300	0	0	248
TF100	0	300	0	0	248
MSUK50	0	150	150	0	248
TFUK50	0	150	150	0	248
MSMÇ50	0	150	0	150	186
TFMÇ50	0	150	0	150	186
TF20UKMÇ40	0	60	120	120	198,4
MS20UKMÇ40	0	60	120	120	198,4

MS: multisiklon ünitesi külü, TF: torba filtre ünitesi külü MÇ: mermer çamuru (100: %100, 50: %50, 40: %40, 20: %20)

3.8. Yayılma Değerleri ve İşlenebilirlik

S/S ve jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri için yayılma değerlerine bakılmıştır. Deney sonuçlarının karşılaştırılabilirliği açısından örneklerin yayılma değerleri ASTM C 230-14 (2014) standardına göre belirlenmiştir. Cetvel ile birbirine dik konumda iki çap ölçülmüş ve bu iki değerlerin ortalaması yayılma çapı olarak hesaplanmıştır.

S/S teknolojisi ile hazırlanan örneklerin yayılma çapları 20 ± 2 cm'de sabit tutulmuş, bu değeri sağlamak için polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı marka süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan örneklerde yayılma çapları 15 ± 2 cm'de sabit tutulmuş, bu değeri sağlamak için farklı miktarlarda çözelti kullanılmıştır. Yayılma değerlerinin belirlendiği yayılma tablası Şekil 3.25'te gösterilmiştir.



Şekil 3.25. Yayılma tablası

3.9. Puzolanik Aktivite Deneyi

Tek başına bağlayıcılık özelliği göstermeyen, sönmüş kireçle ve suyla birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık gösteren silisli ve alüminli malzemeler puzolanik malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için,

ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda “silis + alümin + demir oksit” içermesi gerekmektedir. Puzolanik aktivite “dayanım aktivite indeksi” olarak adlandırılan değerin hesaplanmasıyla ifade edilmektedir. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Gündeşli 2008).

$$\text{Dayanım aktivite indeksi} = (A/B) \times 100 \quad (3.2)$$

Burada;

A: puzolanlı harç numunelerin ortalama basınç dayanımı,

B: kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımıdır.

Puzolanik aktivite deneyi 7, 28 ve 90 günlük standart su küründen sonra ASTM C 618-19 (2019) standardına uygun olacak şekilde yapılmıştır. Deney sonuçları 3 numune üzerinde gerçekleşen ölçümlerin ortalaması olarak verilmiştir. Puzolanlı harç numuneler ile kontrol harç numunelerini oluşturan malzemelerin miktarları ve deneylerin yapılma şekilleri ASTM C 311-18 (2018) ve TS EN 450-1 (2013) standartlarında belirtilmektedir. 28 günlük dayanım aktivite indeksinin ASTM C 618-19’a (2019) göre %75’ten, 90 günlük dayanım aktivite indeksinin ASTM C 618-19’a (2019) göre %85’ten düşük olmaması gerekmektedir.

3.10. Basınç Dayanımı Deneyi

S/S ve jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan hamur örnekleri 28 günlük hava küründen sonra ASTM C109-16a’ya (2016) göre serbest basınç dayanım testine (UCS) tabi tutulmuştur. Çalışma kapsamında hamur örnekler için yapılan deneysel tasarım için Minitab 17 yazılımı kullanılmıştır.

S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri 28 ve 90 günlük standart su küründen sonra ASTM C 109-16a (2016) standardına uygun olacak şekilde basınç dayanımı (UCS) testine tabi tutulmuştur.

Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri 10 saatlik buhar küründen sonra ASTM C109-16a'ya (2016) göre basınç dayanımı (UCS) testine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları 3 numune üzerinde gerçekleşen ölçümlerin ortalaması olarak verilmiştir. Basınç dayanımları otomatik çimento presi ile 250 kN yük uygulanarak ölçülmüştür.

Basınç dayanımı düzeylerinin belirlendiği cihaz (UTEST, Türkiye) Şekil 3.26'da gösterilmiştir. Deney sonuçları 3 numune üzerinde gerçekleşen ölçümlerin ortalaması olarak verilmiştir. Tüm örneklerin basınç dayanımı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$\sigma = P/A \quad (3.1)$$

Burada;

σ : Örneğin basınç dayanımı (MPa)

P: Deney presinde kırılma anındaki en büyük yük (N),

A: Örneğin kesit alanı (mm²)



Şekil 3.26. Basınç dayanımı düzeylerinin belirlendiği cihaz

3.11. Su Emme Deneyi

S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri 28 ve 90 günlük standart su küründen sonra toplam su emme testine tabi tutulmuştur.

Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri 10 saatlik buhar küründen sonra toplam su emme testine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları 3 numune üzerinde gerçekleşen ölçümlerin ortalaması olarak verilmiştir. Her numunenin kütlesi $\pm 0,01$ gram hata payı olan tartıda ölçülmüştür. Örneklerin kurutma işlemi etüvde (Şekil 3.27) yapılmıştır.



Şekil 3.27. Etüv

Örneklerin suya doymuş ağırlığı (B) ile kuru ağırlığı (A) arasındaki farkın kuru ağırlığına oranının yüzde olarak değeri örneğin ağırlıkça su emme yüzdesini vermektedir. Hesaplama ASTM C 642-13 (2013) standardına göre aşağıdaki formülle yapılmıştır:

$$\text{Toplam su emme (\%)} = (B-A)/A * 100 \quad (3.3)$$

3.12. Gözeneklilik (Porozite) Deneyi

S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri 28 ve 90 günlük standart su küründen sonra TS EN 772-4 (2000) standardına uygun olacak şekilde örnekler gözeneklilik (porozite) testine tabi tutulmuştur.

Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri 10 saatlik buhar küründen sonra gözeneklilik (porozite) testine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları 3 numune üzerinde gerçekleşen ölçümlerin ortalaması olarak verilmiştir. Her numunenin kütlesi $\pm 0,01$ gram hata payı olan tartıda ölçülmüştür.

Hesaplama, aşağıdaki denklem kullanılarak örneklerde bulunan boşluk hacminin örneklerin tüm hacmine oranı şeklinde yapılmıştır:

$$\text{Gözeneklilik (\%)} = V_b/V_t * 100 \quad (3.4)$$

Burada,

V_t : örneğin tüm hacmini (boşluk dâhil)

V_b , boşluk hacmini ifade etmektedir.

3.13. Donma-Çözülme Deneyi

S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri 28 günlük standart su küründen sonra UTEST, Türkiye cihazı ile ASTM C 666-15 (2015) standardına uygun olacak şekilde örnekler donma-çözülme testlerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları 3 numune üzerinde gerçekleşen ölçümlerin ortalaması olarak verilmiştir. Her numunenin kütlesi $\pm 0,01$ gram hata payı olan tartıda ölçülmüştür. Donma-çözülme deneyinde 100 çevrim ve 200 çevrimden sonra örneklerin basınç dayanımlarına bakılmış, 200 çevrimden sonra ağırlık kayıpları kaydedilmiştir. Donma-çözülme deneyi -20°C , $+20^\circ\text{C}$ aralığında yapılmış, bir çevrim yaklaşık 6 saat sürmüştür. Dondurma işlemi havada, çözme işlemi ise suda yapılmıştır. Donma çözülme deneyinin yapıldığı cihaz şekil 3.28'de gösterilmektedir.



Şekil 3.28. Donma çözülme deneyinin yapıldığı cihaz ve örnekler

3.14. Sızma Testi

Çamur külünün yapı malzemesi olarak geri kazanılması durumunda tehlike sunup sunmayacağı sızma testleriyle TS EN 12457-4 (2004) ve EPA TCLP 1311 (1992) standartlarında belirtilen ekstraksiyon ve analiz yöntemlerine göre araştırılmıştır. Analiz sonuçları Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik Ek-2’de (2010) belirtilen evsel atık ve tehlikeli atık sınır değerleri ve EPA TCLP 1311 (1992) standardındaki toksisite sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır. Analizler 2 tekrarlı olarak yapılmış sonuçların ortalaması alınmıştır. Bu deneyde malzeme parçacık boyutu 4 mm’den küçük hale getirilerek saf su ile sıvı/katı oranı 10 L/kg olacak şekilde özütleme yapılmaktadır. Katı madde ve çözücü arasındaki temas süresi 24 saattir. Elde edilen eluat 0,45 µm’lik filtre kağıdı yardımıyla süzülerek ağır metal yönünden analiz edilir. EPA TCLP 1311 testi de benzer amaçlarla Amerika’da uygulanan bir sızma testidir. Bu testte uygulanan çözücü TS EN 12457’den farklı şekilde saf su değil, pH’ı 2,88 düzeyinde olan bir asetik asit çözeltisidir. Çözgenin asidik olmasının temel nedeni depolama alanlarının anaerobik koşullarında oluşan asidik ortamı simule etmektir. Parçacık boyutu 9,5 mm’den küçük hale getirilen malzemeye uygulanan sıvı/katı oranı 20 L/kg, katı madde ve çözücü arasındaki temas süresi 18 saattir. Bu testlerin yapılması malzemelerin çevrede oluşturacağı sızma davranışının ve riskin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Arıtma Çamuru Külünün Karakterizasyonu

4.1.1. XRF analizi

Torba filtre ve multisiklon ünitelerinden alınan arıtma çamuru küllerinin kimyasal kompozisyonu literatür değerleriyle karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.1’de verilmektedir. Çamur külündeki başlıca oksit bileşenlerinin puzolan karakterdeki CaO, SiO₂ ve Al₂O₃ bileşenleri olduğu görülmektedir. Torba filtre ünitesi külü için SiO₂/Al₂O₃ oranının 2,77, multisiklon ünitesi külü için 3,88 olduğu görülmektedir. Çizelge 3.3’de görüleceği gibi bu oran uçucu külde 2,88 düzeyindedir.

Çizelge 4.1. Çamur küllerinin kimyasal kompozisyonu

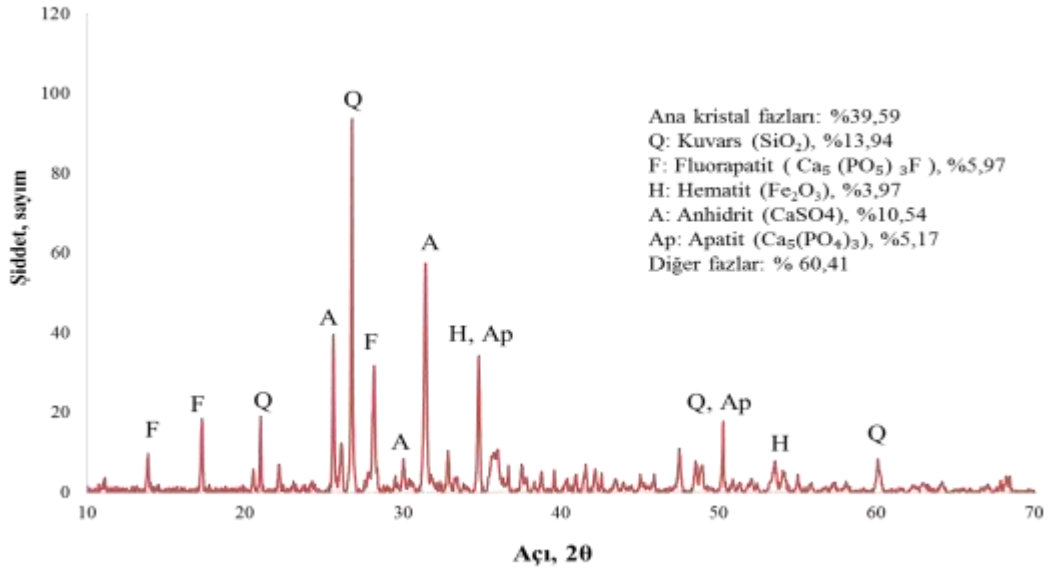
Referans	Kimyasal Bileşen							
	SiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	CaO, %	MgO, %	SO ₃ , %	Na ₂ O, %	K ₂ O, %
Torba Filtre	21,82	7,89	5,28	29,71	4,97	6,33	1,20	2,77
Multisiklon	28,53	7,34	4,71	27,48	4,52	5,47	1,17	2,76
Brotons ve ark. (2014)	17,27	9,64	8,52	30,24	3,22	8,95	0,94	1,28
Krejcirikova ve ark. (2019)	14,40-65,40	4,40-34,20	2,10-30,0	1,10-40,10	0,02-23,40	0,01-12,00	0,01-6,80	0,10-3,10
Chen ve ark. (2006)	43,60	16,60	10,40	5,61	1,40	0,24	0,82	2,34
Chen ve ark (2018)	27,91	12,26	18,32	10,47	3,16	6,13	7,32	1,89

Lynn ve ark. (2015) 157 çamur külü örneğinin kimyasal kompozisyonunu incelemiş, CaO, SiO₂ ve Al₂O₃ içeriklerinin sırasıyla %13,6 ±8,6, %33,8±12,7 ve %14,4±6,5 düzeyinde olduğunu ve puzolanik bir bileşen olarak bir potansiyel sunduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada sunulan çamur külünün CaO içeriğinin Lynn ve ark. (2015) tarafından belirtilen ortalama düzeyin oldukça üzerinde olduğu, SiO₂ ve Al₂O₃ düzeyinin literatürdeki aralığın düşük kısmına yakın olduğu görülmüştür.

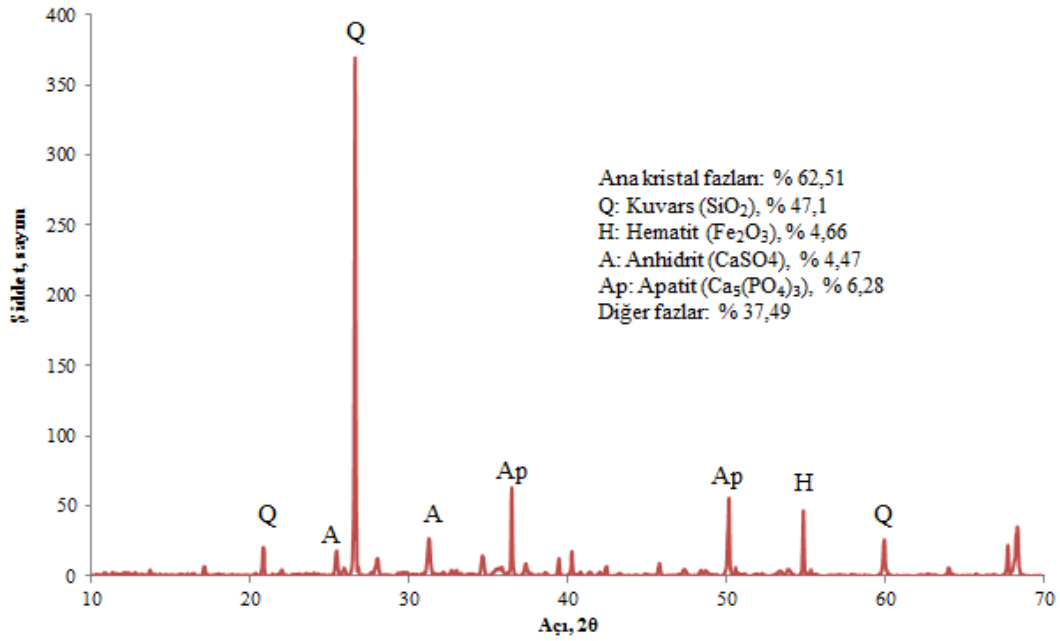
4.1.2. XRD analizi

Çamur külü içindeki başlıca elementler olan Ca, Si, Al ve Fe elementlerinin kristal formları bir kalsiyum fosfat türü olan whitlockite ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), kuvars (SiO_2) ve hematit (Fe_2O_3) olarak karşımıza çıkmakta, alüminyum tipik olarak feldspar ve amorf camı fazlarda bulunmaktadır (Mahieux ve ark 2010). Kuvars ve hematitin çamur külünde en çok bulunan mineraller olduğu, demir fosfat, kalsiyum fosfat ve alüminyum fosfat gibi bileşenlerin daha düşük düzeylerde bulunabildiği rapor edilmiştir (Lynn ve ark. 2015). Çamur küllerinin puzolanik bir katkı olup olamayacağını değerlendirirken amorf camı fazın büyüklüğü önemli bir parametredir. Bu fazın büyüklüğünün farklı çamur küllerinde önemli düzeyde salınım gösterdiği bilinmektedir (Donatello ve ark. 2013). Lynn ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada çamur küllerinin amorf içeriğinin %35-75 aralığında değiştiği, reaktif olduğu ve bir çimento sistemi bileşeni olarak potansiyel sunduğu belirtilmiştir. Chen ve ark. (2018) çamur külündeki amorf fazın %53,11 düzeyinde olduğunu, Frattini standardına göre puzolan grubunda yer alabileceğini, orta derecede puzolanik aktivite gösterebileceğini belirtmiştir.

Torba filtre ünitesi külü için yapılan XRD analiz sonuçları Şekil 4.1'de multisiklon ünitesi külü için yapılan XRD analiz sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil. 4.1. Torba filtre baca gazı arıtma sisteminden elde edilen kül için XRD grafiği



Şekil 4.2. Multisiklon baca gazı arıtma sisteminden elde edilen kül için XRD grafiği

Şekil 4.1 incelendiğinde torba filtre ünitesinden elde edilen çamur külündeki kristal yapının çoğunlukla kuvars (Q, SiO₂: %13,94), fluorapatit (F, Ca₅(PO₄)₅F: %5,97), hematit (H, Fe₂O₃: %3,97), anhidrit (A, CaSO₄: %10,54) ve apatit (Ap, Ca₅(PO₄)₅: %5,17) olduğu görülmektedir. Amorf fazın yaklaşık %60,41 düzeyinde olduğu bulunmuştur. Şekil 4.2 incelendiğinde (Q, SiO₂: %47,1), hematit (H, Fe₂O₃: %4,66), anhidrit (A, CaSO₄: %4,47) ve apatit (Ap, Ca₅(PO₄)₅: %6,28) olduğu görülmektedir. Amorf fazın yaklaşık %37,49 düzeyinde olduğu bulunmuştur. Bu değer literatürde belirtilen değerlerle (Chen ve ark. 2018) uyumludur. Amorf fazın yüksekliği çamur külünün bir puzolan adayı olarak değerlendirilebileceğine işaret etmektedir.

4.1.3. Ağır metal analizi

Önerilen analitik dalga boyları kullanılarak tipik tahmini cihaz deteksiyon seviyeleri elde edilmektedir. Çizelge 4.2'de önerilen dalga boyu ve cihaz deteksiyon limit değerleri verilmektedir. Analiz sonuçları sıvı ağırlık olarak ifade edilmiş ve birimler mg/L cinsinden verilmiştir.

Çizelge 4.2. Arıtma çamuru külünde ölçülen ağır metal düzeyleri ve yasal sınır değerlerle karşılaştırması

Parametre (mg/L)	Multisiklon Çamur Külü	Torba Filtre Çamur Külü	EPA TCLP 1311	Sınır Değer (Tehlikeli Atık Depolama)	Cihaz Deteksiyon Limiti	Önerilen Dalga Boyu (nm)
Gümüş (Ag)	<0,003	<0,003	5	*	0,007	328,07
Alüminyum (Al)	0,053	0,051	*	*	0,04	308,22
Arsenik (As)	<0,012	<0,012	5	2,5	0,05	193,70
Bor (B)	0,030	0,043	*	*	0,005	249,77
Kadmiyum (Cd)	<0,003	<0,003	1	0,5	0,004	226,50
Toplam Krom (Cr)	1,629	1,380	*	7	0,007	267,72
Bakır (Cu)	<0,003	0,004	*	10	0,006	324,75
Toplam Demir (Fe)	<0,004	0,007	*	*	0,007	259,94
Mangan (Mn)	<0,005	<0,005	*	*	0,002	257,61
Nikel (Ni)	<0,005	<0,005	*	4	0,015	231,60
Kurşun (Pb)	<0,012	<0,012	5	5	0,04	220,35
Antimon (Sb)	0,018	<0,012	*	0,5	0,03	206,83
Kalay (Sn)	<0,009	<0,009	*	*	-	-
Çinko (Zn)	0,052	0,051	*	20	0,002	213,86
Selenyum (Se)	0,026	0,032	1	0,7	0,075	196,03
Toplam Fosfor (TP)	<0,012	<0,012	*	*	-	-

* Bu parametrelerle ilgili yasal sınır değer bulunmamaktadır.

Elde edilen sonuçlara göre Bursa'da üretilen arıtma çamuru külünün Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik ve EPA standartlarına göre tehlikeli atık özellikleri taşımadığı görülmüştür.

4.2. Arıtma Çamuru Külü İçeren Örneklerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Çamur külünün yapısal özelliklerini belirleyebilmek için bazı fiziksel ve mekanik deneyler yapılmış, yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği tartışılmıştır. Bu amaçla puzolanik aktivite deneyi, yayılma deneyi, basınç dayanımını deneyi, toplam su emme deneyi, porozite deneyi, donma çözülme deneyleri yapılmıştır. Çamur külünün geri kazanımı S/S ve jeopolimerizasyon olmak üzere iki ana teknoloji ile incelenmiştir.

4.2.1. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinin puzolanik aktivite değerleri

Multisiklon ve torba filtre baca gazı arıtma sistemlerinden elde edilen kül ile hazırlanan harç örneklerinin puzolanik aktivite değerleri Çizelge 4.3'te görülmektedir.

Çizelge 4.3. Puzolanik aktivite değerleri

	7 günlük puzolanik aktivite, %	28 günlük puzolanik aktivite, %	90 günlük puzolanik aktivite, %
TF kül	73,64	85,60	86,13
MS kül	73,56	84,75	85,60

MS: multisiklon ünitesi külü, TF: torba filtre ünitesi külü

Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi deneysel çalışmada kullanılan arıtma çamuru külünün dayanım aktivite indeksleri ASTM C 618-19 (2019) standardındaki değerleri sağlamaktadır. Standarda göre 28 günlük dayanım aktivite indeksi %75'ten, 90 günlük dayanım aktivite indeksi %85'ten düşük olmaması gerekmektedir ASTM C 618-19 (2019). Dayanım aktivite indeksinin ASTM standardını sağlaması çalışmada kullanılan külün amorf bir yapıya sahip olduğunu ve puzolan bir malzeme olarak nitelendirilebileceğini göstermektedir (Mardani-Aghabaglou ve ark. 2016). Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi torba filtre ve multisiklon ünitelerinden alınan kül ile hazırlanan örneklerde dayanım aktivite indeksleri birbirine yakındır.

4.2.2. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde yayılma değerleri ve işlenebilirlik

S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinin yayılma değerleri ve kullanılan süper akışkanlaştırıcı miktarları Çizelge 4.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.4. S/S teknolojisi ile hazırlanan örneklerin yayılma değerleri ve kullanılan süper akışkanlaştırıcı miktarları

	Çap (cm)	Süper akışkanlaştırıcı (ml)
Referans	20	0,5
TF15	19,5	0,75
TF30	18	1,25
MS15	18	0,75
MS30	18	1,5
MÇ15	19,5	0,5
MÇ30	20,5	0,75

TF: torba filtre ünitesi külü, MS: multisiklon ünitesi külü, MÇ: mermer çamuru, 15: %15, 30: %30

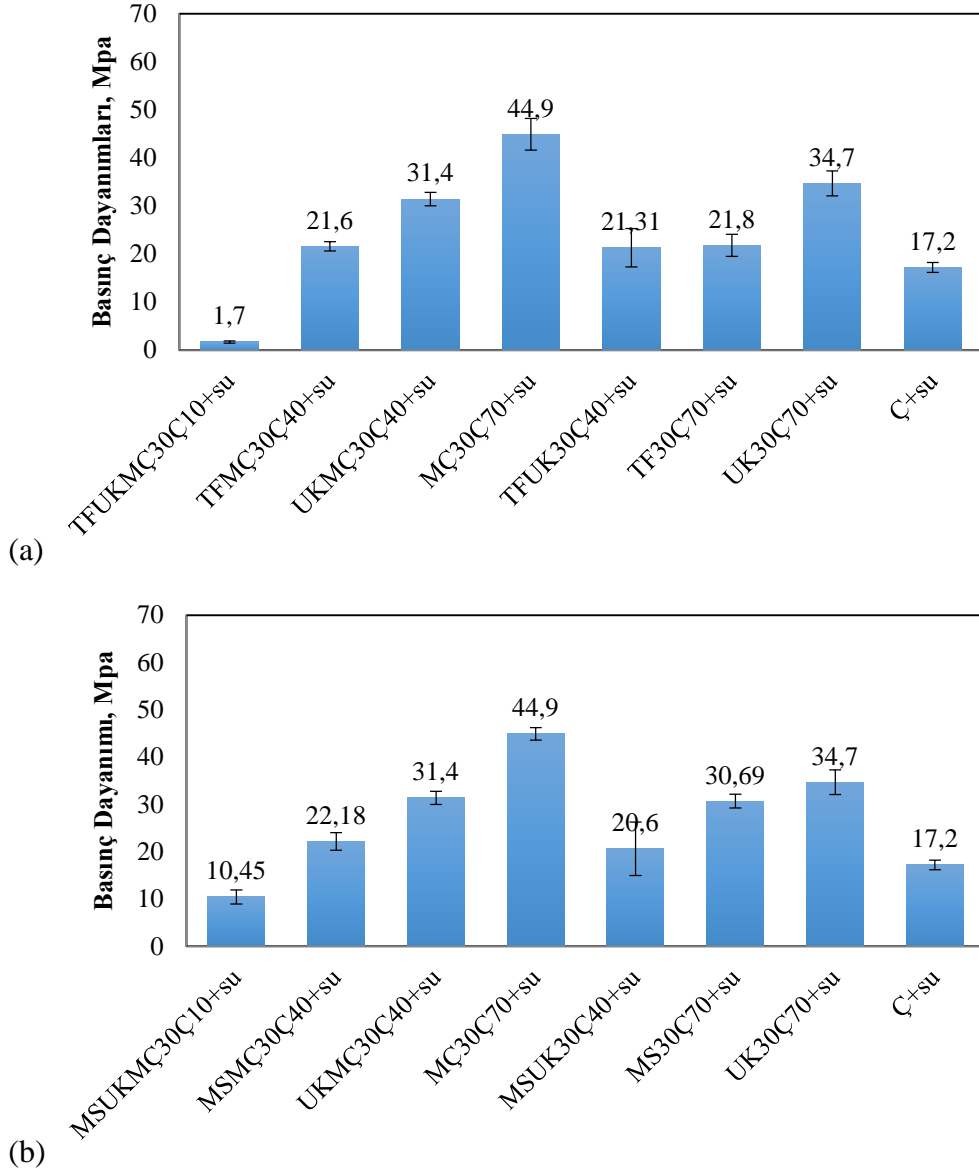
Çalışmada yayılma değerleri 20 ± 2 cm'de süper akışkanlaştırıcı kullanılarak sabitlenmiştir. Çizelge 4.4'te görüldüğü gibi atık miktarı arttıkça kullanılan süper akışkanlaştırıcı miktarı da artmıştır. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı miktarının artması o içeriğe sahip örneklerin işlenebilirliğinin daha zor olduğunu göstermektedir. Kappel ve ark. (2017) arıtma çamuru külünü öğütülmesinin işlenebilirliği üzerine çalışmışlar, külü öğüttükçe işlenebilirliğin arttığını gözlemlemişlerdir. Torba filtre ünitesi külünün incelik (blaine-özellik yüzey alanı) değeri $8790 \text{ cm}^2/\text{g}$, multisiklon ünitesi külünün incelik değeri $4930 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak ölçülmüştür. Torba filtre ünitesi külünün incelik değerinin multisiklon ünitesi külünün incelik değerinden daha yüksek olması nedeniyle işlenebilirliğinin artması bu görüşü desteklemektedir.

4.2.3. S/S teknolojisiyle hazırlanan örneklerde basınç dayanımı gelişimi

Arıtma çamuru külünün S/S yoluyla geri kazanımı sürecinde basınç dayanımını etkileyen unsurlar araştırılmıştır.

Hamur örneklerinde basınç dayanımı gelişimi

Torba filtre ve multisiklon ünitelerinden alınan külle ve S/S teknolojisi kullanılarak hazırlanan çimento içeriğine sahip örneklerin basınç dayanımı düzeyleri Şekil 4.3'te verilmektedir. Çimento kullanılarak hazırlanan hamur örneklerinde arıtma çamuru külü %30 oranında kullanılmıştır.



Şekil 4.3. S/S teknolojisi ve çimento kullanılarak hazırlanan örneklerin basınç dayanımı düzeyleri (a: torba filtre külü ünitesi ile hazırlanan örnekler, b: multisiklon ünitesi külü ile hazırlanan örnekler, TF: torba filtre ünitesi külü, MS: multisiklon ünitesi külü, UK: uçucu kül, MÇ: mermer çamuru, Ç: Çimento, 10: %10, 30: %30, 40: %40, 70: %70)

S/S teknolojisi ile hazırlanan ve çimento içeren hamur örnekleri içinde en yüksek basınç dayanımlarının sırasıyla mermer çamuru+çimento+su (44,9 MPa) ve uçucu kül+çimento+su (34,7 MPa) kombinasyonu ile elde edildiği görülmüştür. Tüm örneklerin (TFUKMÇ30Ç10+su kombinasyonu hariç) basınç dayanım düzeyinin atık içermeyen kontrol örneğinden (Ç+su) yüksek olduğu göze çarpmaktadır. Torba filtre ünitesinden elde edilen arıtma çamuru külü içeren S/S örneklerinde basınç dayanımı düzeyleri 1,7-21,8 MPa aralığında değişirken (Şekil 4.3a), multisiklon ünitesinden elde edilen arıtma çamuru külü içeren S/S örneklerinde basınç dayanımı düzeyleri 10,45-30,69 MPa (Şekil 4.3b) aralığında değişmektedir. Çalışmada TF30Ç70+su içeriğine sahip örnekler diğer arıtma çamuru kullanılan örneklere göre daha başarılı olmuştur. S/S hamur örneklerinde arıtma çamuru külü içeren örneklere uçucu kül ve mermer çamuru eklenmesi basınç dayanımlarını düşürmüştür. Multisiklon ünitesinden elde edilen arıtma çamuru külü ile hazırlanan S/S hamur örneklerinin basınç dayanımlarının torba filtre ünitesinden elde edilen arıtma çamuru külü ile hazırlanan S/S hamur örneklerinin basınç dayanımlarından daha yüksek olduğu Şekil 4.3'de görülmektedir. Bunun temel sebebinin multisiklon ünitesi külünün $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ oranının torba filtre ünitesi külünden daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. İleri yaşlarda $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ oranının yüksek olması basınç dayanımını arttırmaktadır (Mardani-Aghabaglou ve ark. 2016).

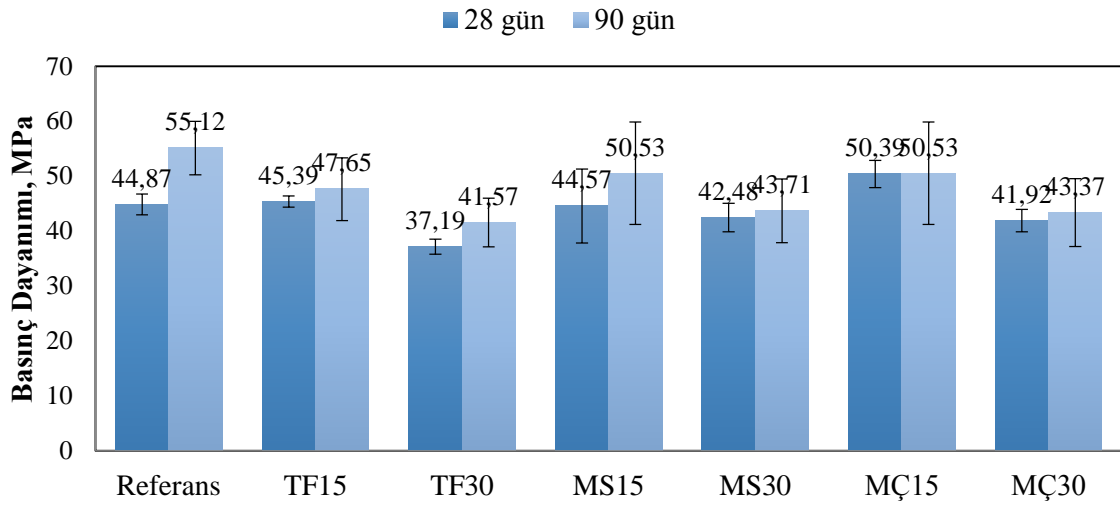
Krejcirikova ve ark. (2019) arıtma çamuru külünü çimento ile %10 ikameli eklenerek hazırladığı harç örneğinde basınç dayanım düzeyini 48 MPa olarak ölçmüştür. Bu çalışmada %30 çimento ikameli olarak hazırlanan hamur örneğinde elde edilen 21,8 MPa (torba filtre külü) ve 30,69 MPa (multisiklon külü) değerleri Krejcirikova ve ark. (2019) tarafından rapor edilen değerden düşüktür. Bunun temel nedeninin bu çalışmadaki çamur külü oranının yüksekliği ve örneklerde ince agreganın kullanılmamış olması olduğu düşünülmektedir.

Brotons ve ark. (2014), çimentoya %10 oranında arıtma çamuru külü ekleyerek hamur örnekleri hazırlamış ve en yüksek basınç dayanımını 14,4 MPa olarak ölçmüştür. Brotons ve ark.'nın (2014) elde ettiği değer bu çalışmada elde edilen değerden düşük

olduğu ve bunun nedeninin de külün kimyasal kompozisyonunda farklılıklar bulunması olduğu düşünülmektedir.

Harç örneklerinde basınç dayanımı gelişimi

Hazır betonlarda aranan en yaygın özelliğin basınç dayanımı olduğu bilinmektedir. 28 ve 90 günlük standart su küründen sonra örneklere basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Örneklerin basınç dayanımı değerleri Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları (TF: torba filtre, MS: multisiklon, MÇ: mermer çamuru, 15: %15, 30: %30)

Tüm karışım tipleri için en yüksek basınç dayanımları %15 oranında atık içeriğine sahip örneklerde gözlenmiştir. Atık miktarı arttıkça basınç dayanımlarında azalma gözlenmiştir. 28 günlük kürlenme sonucunda mermer çamuru içeriğine sahip örneklerde arıtma çamuru külü içeren örneklere göre daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. 28 günlük örneklerde %15 torba filtre külü içeren örnekte 45,39 MPa, %15 multisiklon külü içeren örnekte 44,57 MPa basınç dayanımları elde edilmiştir. 90 günlük örneklerde multisiklon ünitesi külü daha başarılı olmuştur. Bunun temel sebebinin multisiklon ünitesi külünün $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%40,58) oranının torba filtre ünitesi külünden daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. İleri yaşlarda

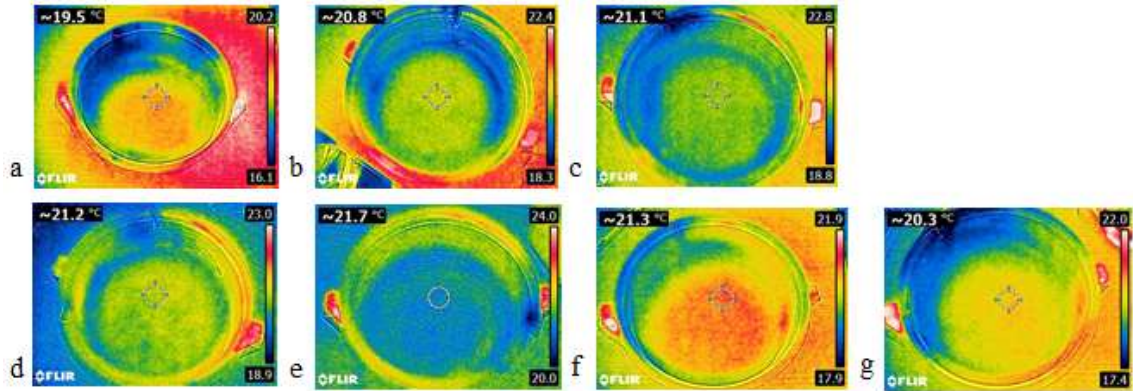
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ (% 34,99) oranı basınç dayanımında etkilidir. 28 günlük kür sonunda mermer çamuru kullanılarak elde edilen en yüksek basınç dayanımları MÇ15 örneği için 50,39 MPa, MÇ30 örneği için 41,92 MPa olarak ölçülmüştür. 90 günlük kür sonunda mermer çamuru kullanılarak elde edilen en yüksek basınç dayanımları MÇ15 örneği için 50,53 MPa, MÇ30 örneği için 43,37 MPa olarak ölçülmüştür. Mermer çamuru miktarı arttıkça dayanımlarda azalma gözlenmiştir.

Bu çalışmadaki bulgulara benzer şekilde, Chen ve ark. (2018) çimento yerine %10 oranında çamur külü koydukları beton bloklarda basınç dayanımının hafifçe düştüğünü, çamur külünün %20'ye çıkardıklarında basınç dayanımının daha da düştüğünü ancak yine de 28 günün sonunda 34,6 MPa'ya yaklaşan bir basınç dayanımı elde ettiklerini belirtmişlerdir. Chen ve ark. (2018) basınç dayanımının bu şekildeki gelişimini çamur külünün puzolanik aktivitesine dayandırmışlardır. Farklı mineral katkıların çimento sistemleri üzerindeki etkisi, puzolanik aktiviteleri ve su absorpsiyon özellikleriyle ilişkilidir (Li ve ark. 2017, Dorum ve ark. 2010, Yıldız ve ark. 2010). Araştırmacılar (Li ve ark. 2017, Chen ve ark. 2018) çamur külü ile hazırladıkları örneklerin çamur külü içermeyenlerle kıyaslandığında su absorpsiyon oranlarının yüksek olduğunu, bunun da basınç dayanımını etkilediğini belirtmişlerdir. Li ve ark. (2017) çamur külü ile hazırladıkları örneklerde yayılma tablası değerlerinin diğer örneklere göre daha düşük olduğunu, çamur külü ilavesinin işlenebilirlik oranını düşürdüğünü belirtmişlerdir. Bu çalışmada da spesifik yüzey alanı çimentoya veya uçucu küle göre oldukça yüksek olan çamur külünün yüksek derecede su absorpladığı, bunun kuruma büzülmesini artırdığı ve basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir. Yüzey alanı yüksek olan çamur külü absorpladığı yüksek miktarda suyu kuruma esnasında bıraktığında diğer örneklerde görülenden daha yüksek düzeyde bir kuruma büzülmesi gerçekleşmektedir.

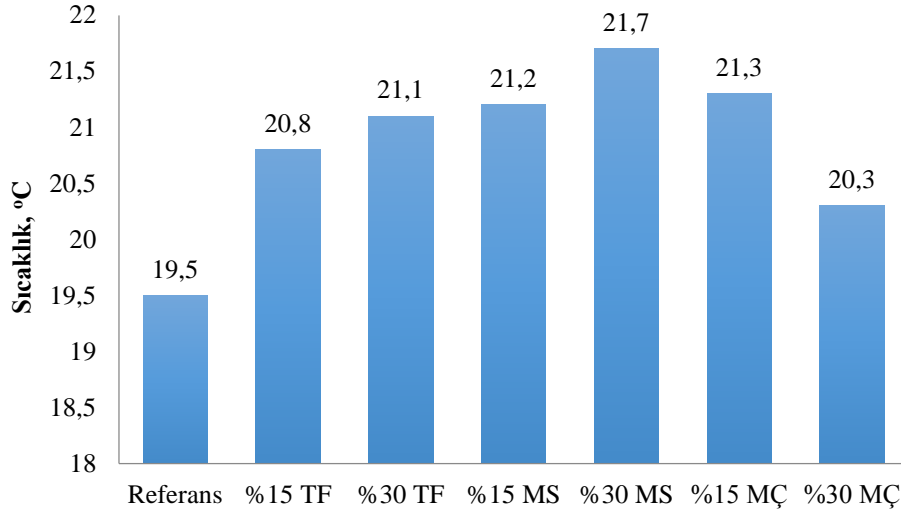
Su kullanılarak hazırlanan S/S teknolojisinde harç örneklerinin basınç dayanımı düzeylerinin hamur örneklerine göre daha yüksek olduğu Şekil 4.3 ve 4.4'de görülmektedir. S/S örneklerinde agrega kullanımının basınç dayanımını arttırdığı düşünülmektedir. Hamur örneklerinden torba filtre ünitesi külü+çim+su örneğinde basınç dayanımı 21,8 MPa, harç örneklerinden TF15 örneğinde 47,65 MPa olarak

ölçülmüştür. Hamur örneklerinden torba filtre ünitesi külü+çim+su örneğinde basınç dayanımı 30,69 MPa, harç örneklerinden TF15 örneğinde 50,53 MPa olarak ölçülmüştür. Ayrıca hava kürüne tabi tutulan hamur örneklerinde kuruma büzülme gözlemlendiğinden su kürü uygulanan harç örneklerine göre basınç dayanımlarının düştüğü düşünülmektedir. Seçilen kür yönteminin ve agrega kullanımının basınç dayanımını etkilediği düşünülmektedir.

Çimentoya atık malzeme eklenmesi ile oluşan sıcaklık değişimleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Atık materyal eklendikten sonra hazırlanan harç karışımlarının sıcaklık değişimi grafiği ile Şekil 4.6'da verilmiştir. Termal kamera görüntüleri karıştırma işleminden sonra, harç kalıplara konmadan önce alınmıştır. Görüntüler alınırken ortam koşulları sabit tutulmuştur. Atık malzemelerin eklenmesi ile referans örneğe göre sıcaklığın yaklaşık 2°C arttığı gözlenmiştir.



Şekil 4.5. Hazırlanan örneklerin sıcaklık değişimlerinin kaydedildiği termal kamera görüntüleri (a: referans, b: %15 torba filtre ünitesi külü eklenmiş örnek c: %30 torba filtre külü ünitesi eklenmiş örnek d: %15 multisiklon ünitesi külü eklenmiş örnek, e: %30 multisiklon ünitesi eklenmiş örnek, f: %15 mermer çamuru eklenmiş örnek, g: %30 mermer çamuru eklenmiş örnek)

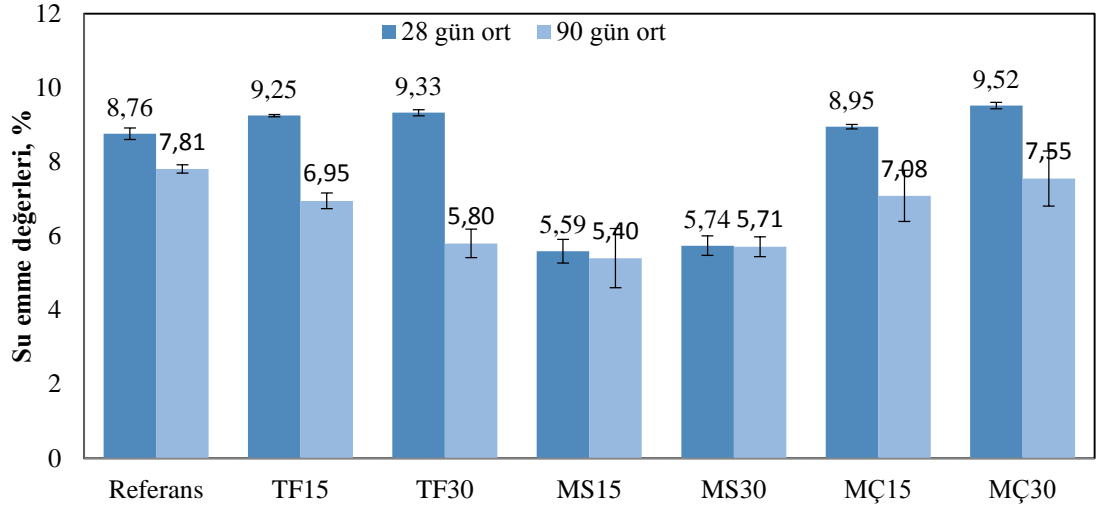


Şekil 4.6. Hazırlanan örneklerin sıcaklık değişimlerinin kaydedildiği termal kamera görüntüleri grafiği (a: referans, b: %15 torba filtre ünitesi külü eklenmiş örnek c: %30 torba filtre külü ünitesi eklenmiş örnek d: %15 multisiklon ünitesi külü eklenmiş örnek, e: %30 multisiklon ünitesi eklenmiş örnek, f: %15 mermer çamuru eklenmiş örnek, g: %30 mermer çamuru eklenmiş örnek)

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 incelendiğinde arıtma çamuru külü ile hazırlanan örneklerde kül miktarı arttıkça sıcaklığın da arttığı gözlenmiştir. Arıtma çamuru külü eklenmesiyle ortamın alkalinitesinin artması sebebiyle sıcaklıkta artma gözlenmiştir. %30 torba filtre ve multisiklon ünitesi külü içeriğine sahip örneklerin %15 torba filtre ve multisiklon ünitesi külü içeriğine sahip örneklerden daha düşük basınç dayanımları verdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.2). Çamur külü miktarının artmasıyla sıcaklık arttığı bilinmektedir. Harç örneklerinde hidrasyon reaksiyonlarının tam olarak tamamlamadığı, bu nedenle de %30 kül içeriğine sahip örneklerin %15 kül içeriğine sahip örneklere göre basınç dayanımlarında azalma meydana geldiği düşünülmektedir.

4.2.4. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde toplam su emme değerleri

Toplam su emme deneyinin sonuçlarının gösterildiği grafik Şekil 4.7’de verilmiştir.



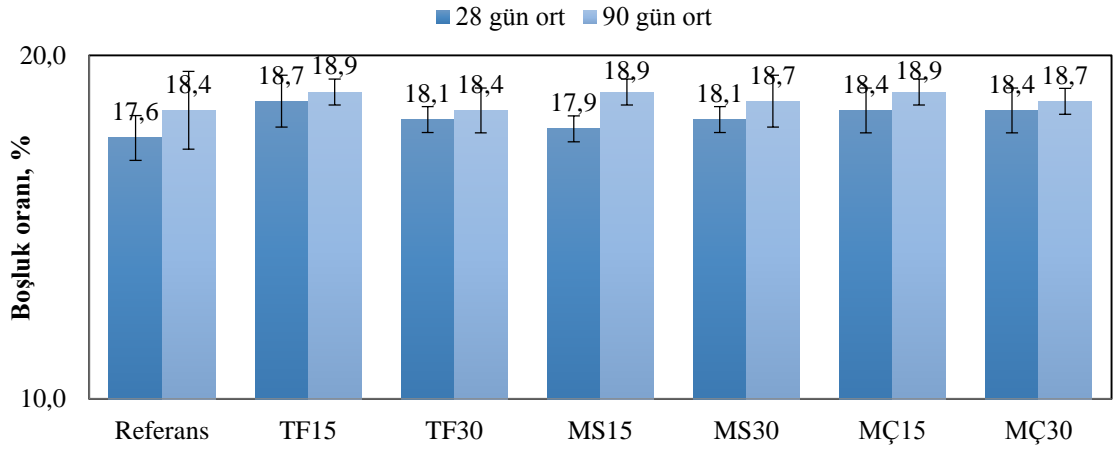
Şekil 4.7. 28 ve 90 günlük toplam su emme değerleri (TF: torba filtre, MS: multisiklon, MÇ: mermer çamuru, 15: %15, 30: %30)

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi 90 günlük örneklerde su emme yüzdelerinde azalma meydana gelmiştir. Su emme yüzdesinin en düşük olduğu örnek %15 multisiklon külü içeriğine sahip 90 günlük örnekte %5,40 olarak kaydedilmiştir. Multisiklon ünitesi külü ile yapılan örnekler torba filtre ünitesi külü ile yapılan örneklerden daha başarılıdır. Bunun sebebinin torba filtre külünde 28 günde hidrasyon reaksiyonlarının tam olarak gerçekleşmediğinden kaynaklanmaktadır. Çalışmada 90 günlük tüm örneklerde referansa göre daha az su emme ihtiyacı olduğu gözlenmiştir. Torba filtre külü içeren örneklerin su emme yüzdelerinde 90 günlük kür işlemi sonunda 28 günlük örneklere göre %5’lere varan azalmalar gözlenmiştir.

4.2.5. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde gözeneklilik deneyi sonuçları

Bir malzemenin gözenekliliği fiziksel özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Harç, doğası gereği kimyasal reaktivitelere dayanabilen özelliklere sahip gözenekli bir katıdır. Su ile malzemenin hidratlaşmasına izin verildiğinde, reaksiyon ürünleri uyumlu bir matris halinde gelmektedir. Hidrasyon işlemi, belirlenmiş sertleşme süresinden sonra bile uzun bir süre boyunca gerçekleşebilmekte ve hidrasyon devam ederken matris gözenekli yapısını korumaktadır (Hewlett, 2003). Bu, malzemenin yoğunluğunun ve

gözenekliliğinin, harcın hidrasyon durumunu yansıttığı anlamına gelmektedir. Sertleşmiş çimento harçlarında dayanım ve gözeneklilik arasında ilişki olduğu bilinmektedir (Röbler ve Odler, 1985). Katı bir malzemede gözenekliliğin azaltılması, genel olarak çimento esaslı malzemelerin mukavemetini arttırmaktadır (Etris ve ark. 1973, Yudenfreund ve ark. 1972). Gözeneklilik deneyi sonucunda belirlenen boşluk oranları Şekil 4.8’de gösterilmektedir.

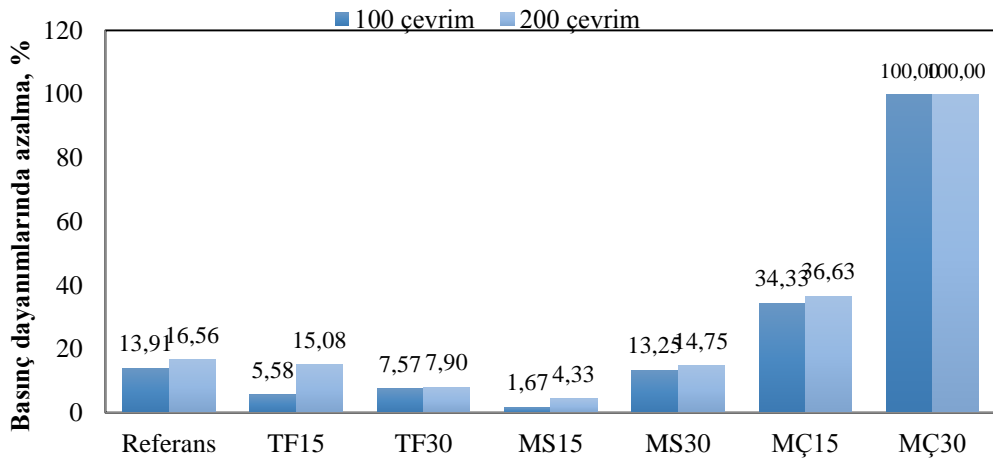


Şekil 4.8. 28 ve 90 günlük örneklerde boşluk oranları (TF: torba filtre, MS: multisiklon, MÇ: mermer çamuru, 15: %15, 30: %30)

28 günlük örneklerde boşluk oranları %17,6-18,7, 90 günlük örneklerde boşluk oranları 18,4-18,9 arasında değiştiği Şekil 4.8’de görülmektedir. Tüm örneklerin porozite değerlerinin referans örneğe göre yüksek olduğu belirlenmiştir. Örneklerin su emme yüzleri ve boşluk oranları kıyaslandığında en az su emme yüzdesinin ve en az boşluk oranının multisiklon külü kullanılarak hazırlanan örnekte olduğu gözlenmiştir. Torba filtre külünün daha ince bir yapıya sahip olmasına rağmen multisiklon külünden daha fazla su emme ve porozite yüzdesine sahip olması multisiklon külünün ile hazırlanan örneklerde daha iyi dayanımlar elde edilmesiyle açıklanabilmektedir. Multisiklon ünitesi külü ile yapılan örneklerde boşluklar oluşmadığı düşünülmektedir.

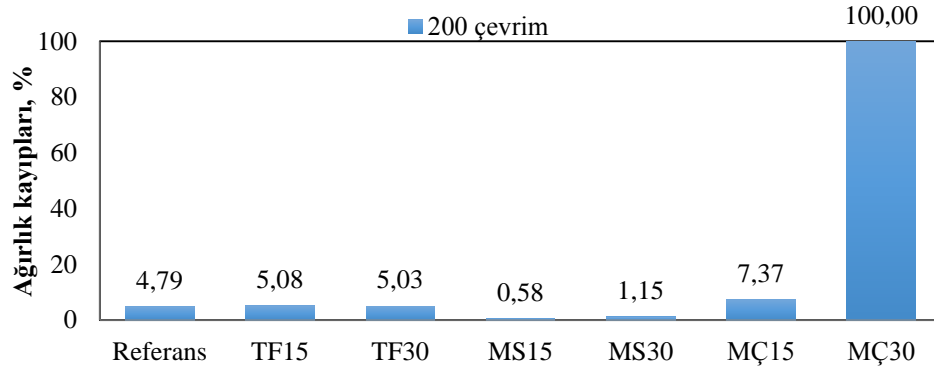
4.2.6. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde donma-çözülme deneyi sonuçları

Örneklerin 200 çevrim sonucunda ağırlıkları kaydedilmiştir. İlk ağırlıklarına göre % kayıpları kaydedilmiştir. Örneklerin 100 çevrim ve 200 çevrim sonunda basınç dayanımları değişimleri incelenmiştir. Basınç dayanımının yüzdece kayıpları kaydedilmiştir. 100 ve 200 çevrim sonunda gözlenen basınç dayanımlarındaki kayıplar Şekil 4.9'da, 200 çevrim sonunda gözlenen ağırlık kayıpları ise Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.9. 100 çevrim ve 200 çevrim sonunda basınç dayanımlarında azalma (TF: torba filtre, MS: multisiklon, MÇ: mermer çamuru, 15: %15, 30: %30)

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi donma çözülme cihazında gerçekleşen 100 çevrim sonunda örneklerin basınç dayanımlarındaki azalma %1,67-34,33 arasında, 200 çevrim sonunda örneklerin basınç dayanımlarındaki azalma %4,33-36,63 arasında değişmektedir. 100 çevrim sonunda %15 mermer çamuru içeriğine sahip örnek dışında tüm örneklerin basınç dayanımlarındaki azalmanın referanstan düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.10. Donma-çözülme 200 çevrim sonunda ağırlık kayıpları (TF: torba filtre, MS: multisiklon, MÇ: mermer çamuru, 15: %15, 30: %30)

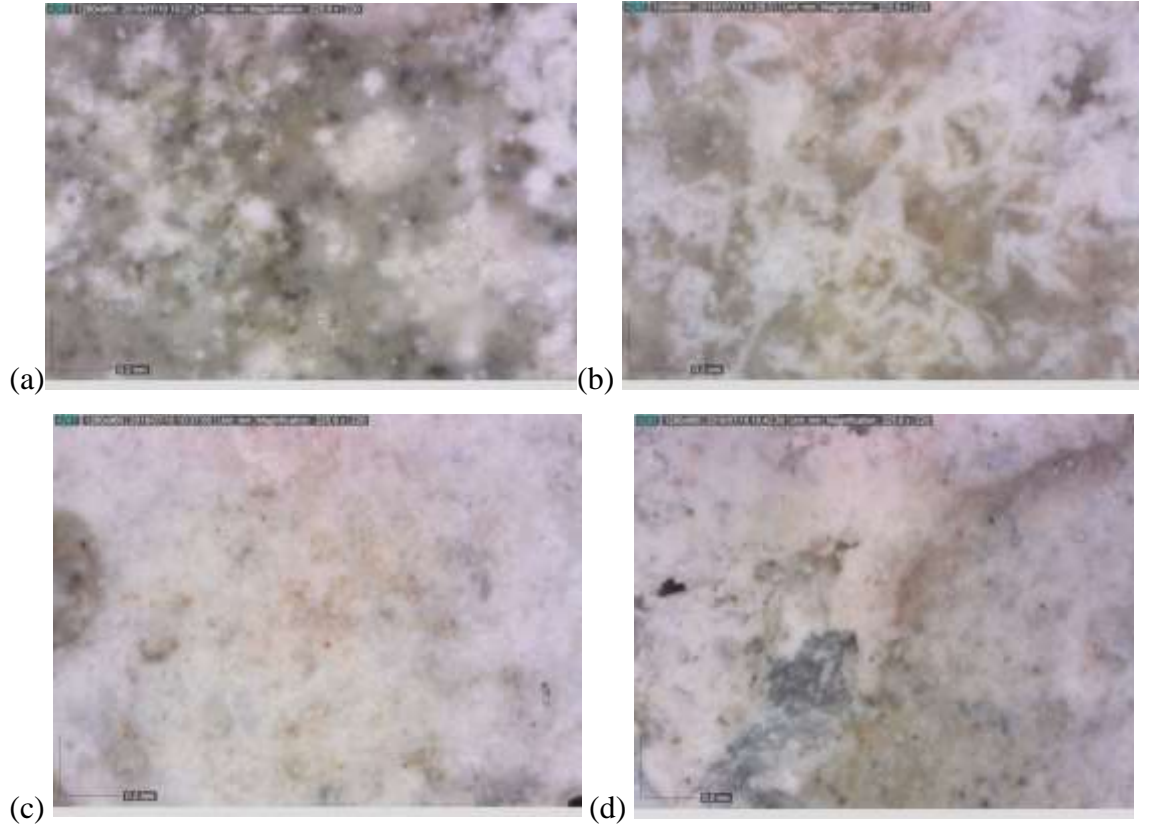
Şekil 4.10'da görüldüğü gibi donma-çözülme cihazında gerçekleşen 200 çevrim sonunda örneklerin ağırlık kayıpları %0,58-7,37 arasında değişmektedir. En az kayıp %15 oranında multisiklon ünitesinden elde edilen kül ile yapılan örnekte %0,58 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da görüldüğü gibi donma çözülme deneylerinde hem ağırlık kayıpları hesabında hem de basınç dayanımı kaybı hesabında multisiklon ünitesi külü daha başarılıdır. 100 çevrim sonunda %30 mermer çamuru içeriğine sahip örnekte tamamen dağılma gözlenmiştir (Şekil 4.11).



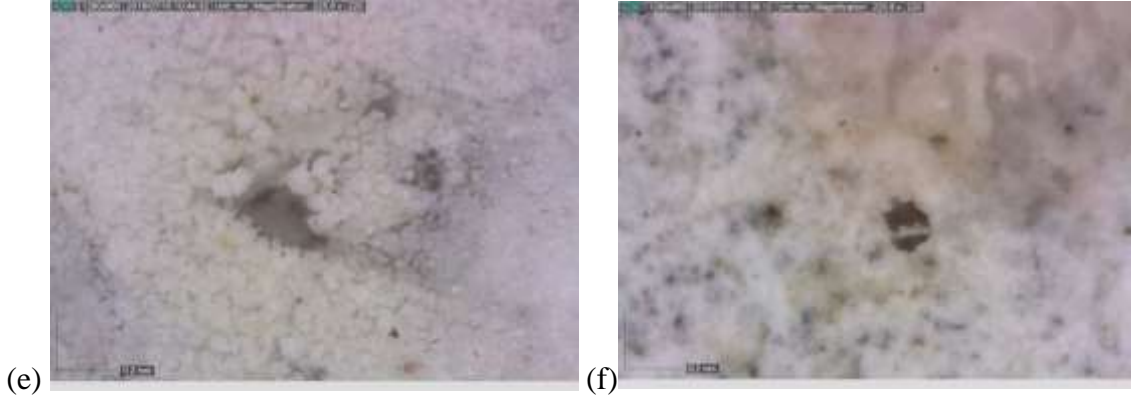
Şekil 4.11. 100 çevrim sonunda dağılan %30 mermer çamuru içeriğine sahip örnekler

%15 mermer çamuru içeriğine sahip örnekte herhangi bir dağılma gözlenmemiştir. Ancak örneklerin ağırlıklarında ve basınç dayanımlarında arıtma çamuru kullanılan örnekler ve referansa göre önemli oranlarda azalma gözlenmiştir.

Donma-çözülme deneyi 200 çevrim sonucunda mikroskop görüntüleri çekilmiştir. Mikroskop görüntüleri 220 kat büyütme yapılarak alınmıştır. Mikroskop görüntüleri ile donma-çözülme deneyi sonucunda örneklerde mikro çatlaklar olup olmadığı, örneklerin hasar alıp almadıkları incelenmiştir. Şekil 4.12'de örneklerin mikroskop görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 4.12. 200 çevrim sonunda örneklerin mikroskop görüntüleri (a: referans, b: %15 torba filtre ünitesi külü, c: %30 torba ünitesi filtre külü, d: %15 multisiklon ünitesi külü, e: %30 multisiklon ünitesi külü, f: %15 mermer çamuru)



Şekil 4.12. 200 çevrim sonunda örneklerin mikroskop görüntüleri (a: referans, b: %15 torba filtre ünitesi külü, c: %30 torba ünitesi filtre külü, d: %15 multisiklon ünitesi külü, e: %30 multisiklon ünitesi külü, f: %15 mermer çamuru)

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi 200 çevrim sonunda örneklerde mikro çatlaklar oluşmamıştır. %15 mermer çamuru içeriğine sahip örnekte çatlaklar oluşmamasına rağmen 200 çevrim sonunda %7,37 oranında ağırlık kaybı, %36,63 oranında basınç dayanımında kayıp olduğu gözlenmiştir. %30 mermer çamuru içeriğine sahip örnek ise tamamen dağılmıştır. Mermer çamuru içeren örneklerde kapiler boşluklar oluşması nedeniyle basınç dayanımlarında ve ağırlıklarda önemli ölçüde azalma gözlemlendiği düşünülmektedir.

Mermer çamurunun yüksek CaO içeriği sebebiyle daha iyi dayanımlar verdiği bilinmektedir (Singh ve ark. 2017). Ancak bu çalışmada mermer çamuru içeriğine sahip S/S harç örnekleri basınç dayanımlarında başarılı olurken, diğer deneylerde (su emme, porozite, donma-çözülme) referans örneğe ve arıtma çamuru külü ile hazırlanan örneklere göre başarısız olmuştur. Bunun temel sebebinin mermer çamurunun kimyasal yapısıyla ilgili olduğu düşünülmektedir.

4.2.7. Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde yayılma değerleri ve işlenebilirlik

Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan örneklerin yayılma değerleri ve kullanılan aktivatör miktarları Çizelge 4.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan örneklerin yayılma çapları

Örnekler	Yayılma çapı (cm)	Aktivatör (g)
Referans	17	150 (su)
MS100	13	248
TF100	13	248
MSUK50	15	248
TFUK50	17	248
MSMÇ50	16	186
TFMÇ50	16,1	186
MS20UKMÇ40	15,2	198,4
TF20UKMÇ40	15	198,4

MS: multisiklon ünitesi külü, TF: torba filtre ünitesi külü MÇ: mermer çamuru, UK: uçucu kül, 100: % 100, 50: % 50, 40: %40, 20: %20

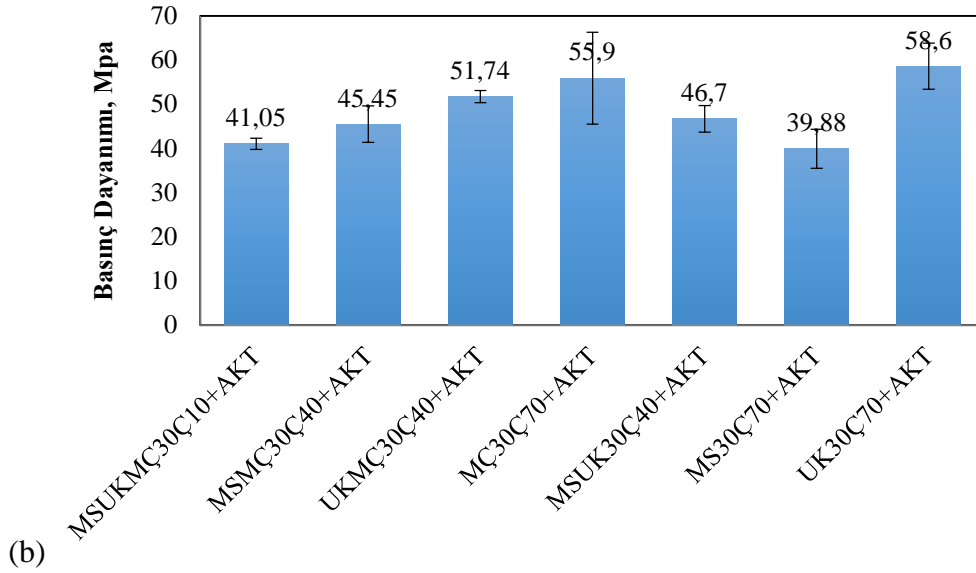
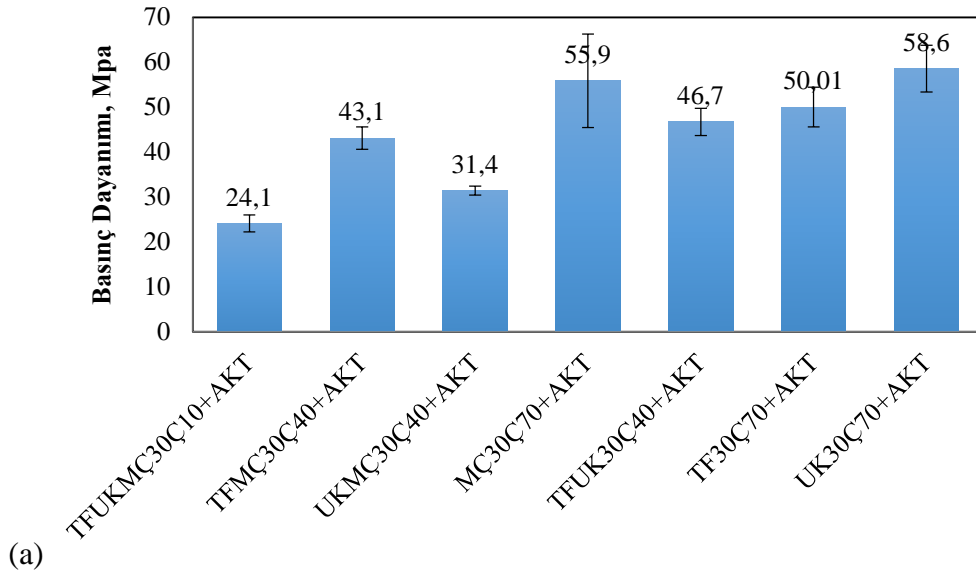
Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi %100 arıtma çamuru külü ile hazırlanan örneklerde yayılma çapları diğer örneklere göre düşüktür. Bunun nedeninin külün kimyasal kompozisyonu ve inceliği olduğu düşünülmektedir. Arıtma çamuru külü ile uçucu kül kombinasyonlarında yayılma çaplarının arttığı gözlenmiştir. Mermer çamuru kullanılan kombinasyonlarda, belirlenen yayılma çapını sağlamak amacıyla (15±2) çözelti miktarı azaltılmıştır.

4.2.8. Jeopolimerizasyon teknolojisiyle hazırlanan örneklerde basınç dayanımı gelişimi

Arıtma çamuru külünün jeopolimerizasyon yoluyla geri kazanımı sürecinde basınç dayanımını etkileyen unsurlar araştırılmıştır.

Hamur örneklerinde basınç dayanımı gelişimi

Torba filtre ve multisiklon baca gazı arıtma sistemlerinden elde edilen ve jeopolimerizasyon teknolojisi kullanılarak hazırlanan çimento içeriğine sahip örneklerin basınç dayanımı düzeyleri Şekil 4.13'te verilmektedir. Çimento kullanılarak hazırlanan hamur örneklerinde %30 oranında arıtma çamuru külü kullanılmıştır.



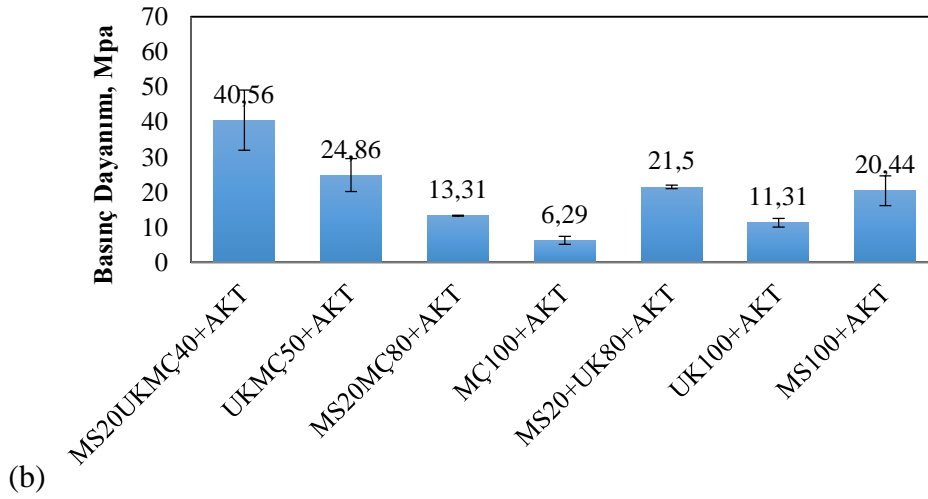
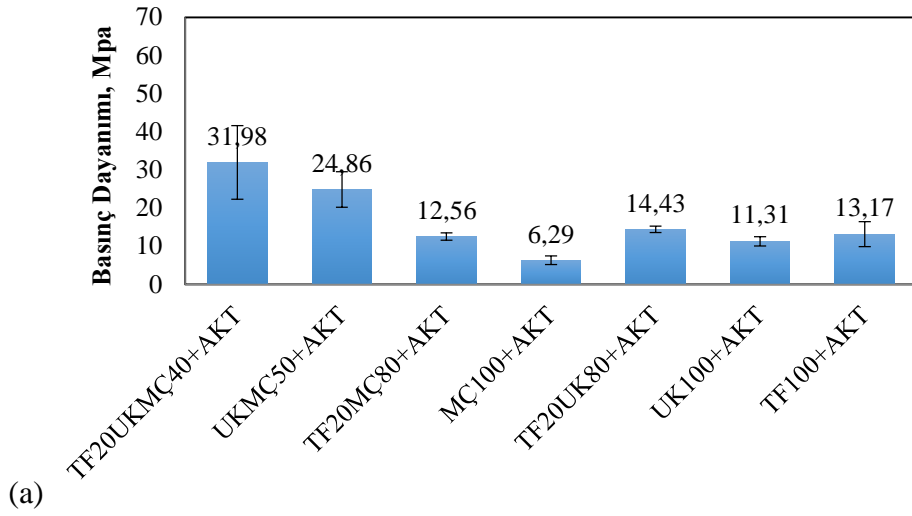
Şekil 4.13. Jeopolimer teknolojisi ve çimento kullanılarak hazırlanan örneklerin basınç dayanımı düzeyleri (a: torba filtre ünitesi külü ile hazırlanan örnekler, b: multisiklon ünitesi külü ile hazırlanan örnekler, TF: torba filtre ünitesi külü, MS: multisiklon ünitesi külü, UK: uçucu kül, MÇ: mermer çamuru, Ç: çimento, AKT: aktivatör- NaSilNaOH, 10: %10, 30: %30, 40: %40, 70: %70)

Jeopolimer örnekleri içinde en yüksek basınç dayanım değerlerinin sırasıyla uçucu kül+çimento+aktivatör (58,6 MPa) ve mermer çamuru+çimento+aktivatör (55,9 MPa) kombinasyonlarıyla elde edilmiştir. Torba filtre ünitesinden elde edilen arıtma çamuru külü içeren jeopolimer örneklerinde basınç dayanım düzeyleri 24,1-50 MPa aralığında

değişmiştir (Şekil 4.13a). Torba filtre ünitesinden elde edilen arıtma çamuru külü+çimento+aktivatör (NaSilNaOH) kombinasyonunun çamur külü içeren örneklerde içinde en yüksek basınç dayanımını (50 MPa) gösterdiği Şekil 4.13a'da görülmektedir. Multisiklon ünitesinden elde edilen arıtma çamuru külü içeren jeopolimer örneklerinde basınç dayanım düzeyleri 39,88-46,7 MPa aralığında değişmiştir (Şekil 4.13b). Multisiklon ünitesinden elde edilen arıtma çamuru külü+uçucu kül+çimento+aktivatör (NaSilNaOH) kombinasyonunun çamur külü içeren örneklerde içinde en yüksek basınç dayanımını (46,7 MPa) gösterdiği Şekil 4.13'de görülmektedir.

Çimento içeren S/S ve jeopolimer örnekleri incelendiğinde arıtma çamuru külü ile birlikte kullanılan uçucu külün basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Davidovits (1991), uçucu külü çoğunlukla amorf silika ve alüminadan oluşması nedeniyle jeopolimerizasyon için uygun bir atık madde olduğunu rapor etmiştir. Bu görüş, bu çalışmadaki jeopolimer örneklerinde uçucu külün basınç dayanımını arttırdığı sonucunu desteklemektedir.

Çimentosuz jeopolimer örneklerde NaSilNaOH ve 8M NaOH olmak üzere iki farklı çözelti kullanılmıştır. Torba filtre ve multisiklon baca gazı arıtma sistemlerinden elde edilen ve jeopolimerizasyon teknolojisi kullanılarak hazırlanan çimento içeriğine sahip olmayan hamur örneklerinin basınç dayanımı düzeyleri Şekil 4.14'te verilmektedir. Şekil 4.14'te çözelti olarak NaSilNaOH kullanılmıştır. Çimento kullanılmadan hazırlanan hamur örneklerinde %20 oranında arıtma çamuru külü kullanılmıştır.

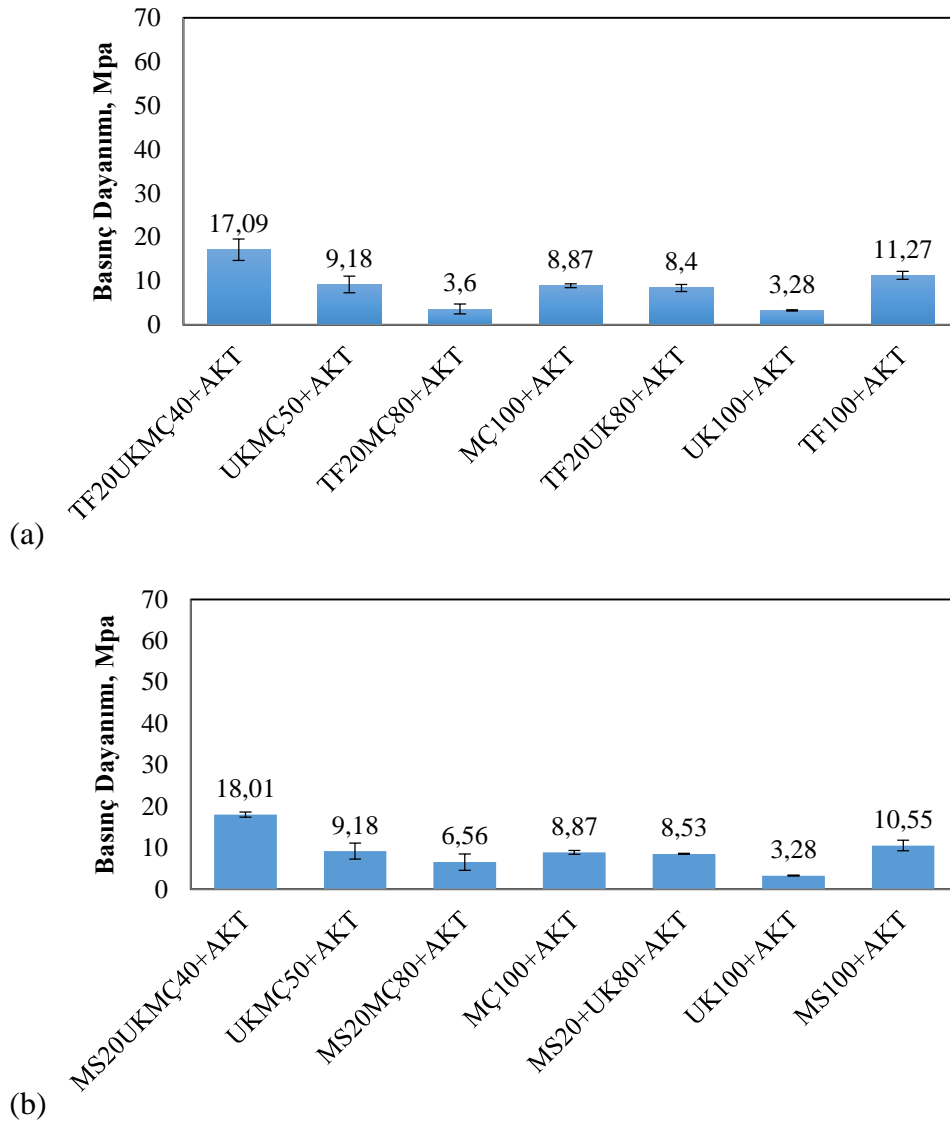


Şekil 4.14. Jeopolimer teknolojisi ve çimento kullanılmadan hazırlanan örneklerin basınç dayanımı düzeyleri (a: torba filtre ünitesi külü ile hazırlanan örnekler, b: multisiklon ünitesi külü ile hazırlanan örnekler, TF: torba filtre ünitesi külü, MS: torba filtre ünitesi külü, UK: uçucu kül, MÇ: mermer çamuru, AKT: aktivatör- NaSiNaOH, 20: %20, 40: %40, 50: %50, 80: %80, 100: %100)

Şekil 4.14'te görüldüğü gibi multisiklon ünitesinden elde edilen ve çimento içermeyen örnekler içerisinde en yüksek basınç dayanımı 40,56 MPa MS20UKMÇ40+AKT (NaSiNaOH) kombinasyonundan elde edilmiştir. Çimento içeren örneklerde bu kombinasyon en düşük basınç dayanımını verirken (Şekil 4.13), çimento içermeyen örneklerde en yüksek basınç dayanımını vermektedir. Bunun temel sebebinin çimento yokluğunda atık maddelerin kimyasal kompozisyonu bileşenlerinin birbirini

tamamladığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çimento kullanılmadığı durumda tüm atık malzemelerin kullanıldığı kombinasyonunun başarısı dikkat çekmektedir.

Torba filtre ve multisiklon baca gazı arıtma sistemlerinden elde edilen ve jeopolimerizasyon teknolojisi kullanılarak hazırlanan çimento içeriğine sahip olmayan hamur örneklerinin basınç dayanımı düzeyleri Şekil 4.15'te verilmektedir. Şekil 4.15'te çözelti olarak 8M NaOH kullanılmıştır.



Şekil 4.15. Jeopolimer teknolojisi ve çimento kullanılmadan hazırlanan örneklerin basınç dayanımı düzeyleri (a: torba filtre ünitesi külü ile hazırlanan örnekler, b: multisiklon ünitesi külü ile hazırlanan örnekler, TF: torba filtre ünitesi külü, MS: torba filtre ünitesi külü, UK: uçucu kül MÇ: mermer çamuru, AKT: aktivatör- 8M NaOH, 20: %20, 40: %40, 50: %50, 80: %80, 100: %100)

Şekil 4.15'te görüldüğü gibi multisiklon ünitesinden elde edilen kül ile hazırlanan ve çimento içermeyen örnekler içerisinde en yüksek basınç dayanımı 18,01 MPa MS20UKMÇ40+AKT (8M NaOH) kombinasyonundan elde edilmiştir. Çimento içeren örneklerde bu kombinasyon en düşük basınç dayanımını verirken (Şekil 4.15), çimento içermeyen örneklerde en yüksek basınç dayanımını verdiği gözlenmiştir. Çimentosuz örneklerde uçucu kül, mermer çamuru ve arıtma çamuru külünün tek başlarına kullanıldıklarında basınç dayanımı üzerindeki negatif etkileri bu atıkların birlikte kullanılması ile kısmen engellenmiştir. Uçucu külün yüksek SiO₂ içeriği mermer çamurunun yüksek CaO oranı ile dengelenmiş, bu atıkların birlikte kullanımları basınç dayanımında artış sağlamıştır.

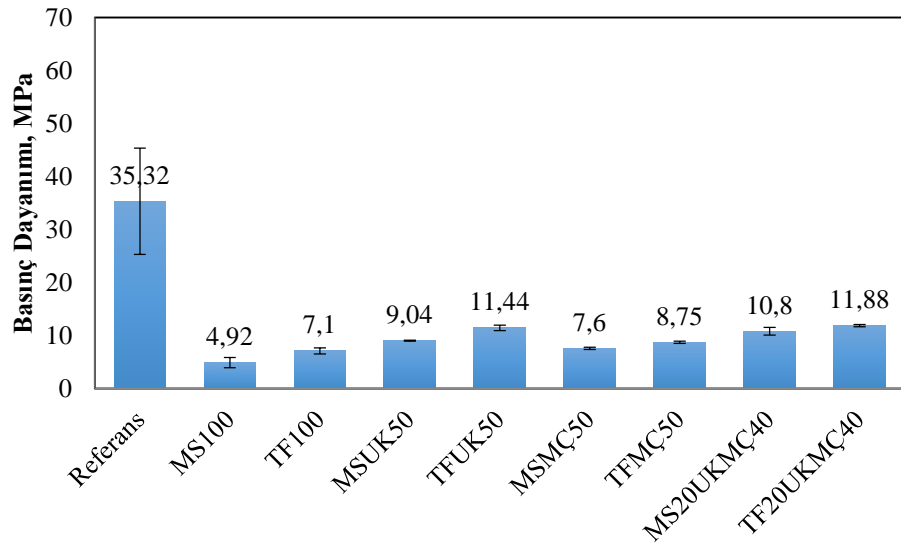
Şekil 4.14 ve 4.15'te görüldüğü gibi çimentonun kullanımının tamamen kaldırılması durumunda basınç dayanımında azalma görülmüştür. Dassekpo ve ark. (2017), uçucu kül ve tamamen ayrılmış granit kullanarak hazırladığı jeopolimer hamur örneklerinde 18,42 MPa düzeyinde basınç dayanımı elde etmiştir. Bu çalışmada NaSiNaOH kullanılarak elde edilen yüksek basınç dayanımında uçucu külün yanında çamur külü ve mermer çamuru kullanımının jeopolimerizasyona olumlu etkisi olduğunu düşünülmektedir.

Fernández-Jiménez ve ark. (2006) 8M NaOH ve NaSiNaOH kullandıkları çalışmalarında hazırladıkları beton örneklerde alkali çözelti ile hazırladıkları örneklerde 60 MPa, su ile hazırladıkları örneklerde 35 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir. Alkali çözeltilerle elde ettikleri jeopolimer yapıların su ile hazırlanan yapılara göre daha az boşluklu olduğunu ve bu nedenle daha yüksek dayanımlar elde edildiğini belirtmişlerdir (Fernández-Jiménez ve ark. 2006). Uçucu kül içindeki silika ve alümina bileşenleri alkali çözelti ile ilk temas ettiğinde hızla çözünmekte, bu da hızlanan bir jeopolimerizasyon sürecine neden olmaktadır. Çamur külü içindeki silika ve alümina bileşenlerinin uçucu kül bileşenlerine benzer şekilde davrandığı ve jeopolimerizasyona girdiği düşünülmektedir. Alkali çözeltiler ilave edildiğinde karışımdaki sodyum içeriği artış göstermektedir; sodyum yük dengeleyici iyon olarak davranış gösterdiği için jeopolimer yapısı için önemlidir (Morsy ve ark. 2014). Uçucu kül veya çamur külü

içindeki silika ve alümina bileşenleri üzerindeki alkali madde hücumu sonucunda ortaya çıkan reaksiyon ürününün yoğun ve katı yapısı basınç dayanımının hızlı gelişmesine neden olmaktadır (Fernández-Jiménez ve ark. 2006). Partiküllerin koloidal boyutu Van der Waals kuvvetlerinin ortaya çıktığını düşündürmektedir (Fernández-Jiménez ve ark. 2006). Alkali sistemlerdeki boşlukların ortalama boyutunun çimento sistemlerindeki boşluklardan daha küçük olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmektedir (Fernández-Jiménez ve ark. 2006).

Harç örneklerinde basınç dayanımı gelişimi

Torba filtre ve multisiklon baca gazı arıtma sistemlerinden elde edilen ve jeopolimerizasyon teknolojisi kullanılarak hazırlanan harç örneklerin basınç dayanımı düzeyleri Şekil 4.16'da verilmektedir.

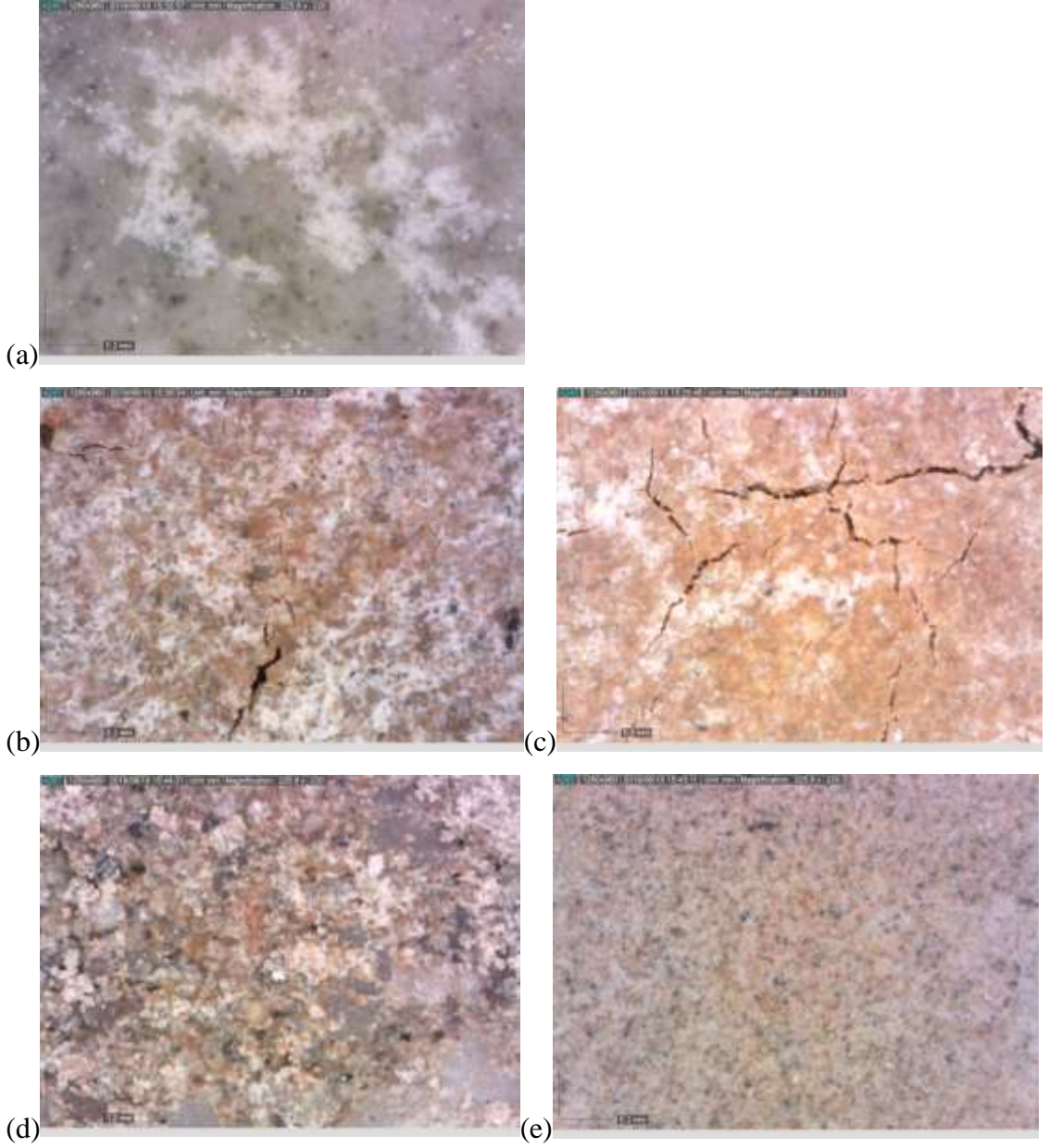


Şekil 4.16. Jeopolimer harç örneklerinde basınç dayanımı değerleri (MS: multisiklon ünitesi külü, TF: torba filtre ünitesi külü MÇ: mermer çamuru, 100: %100, 50: %50, 40: %40, 20: %20)

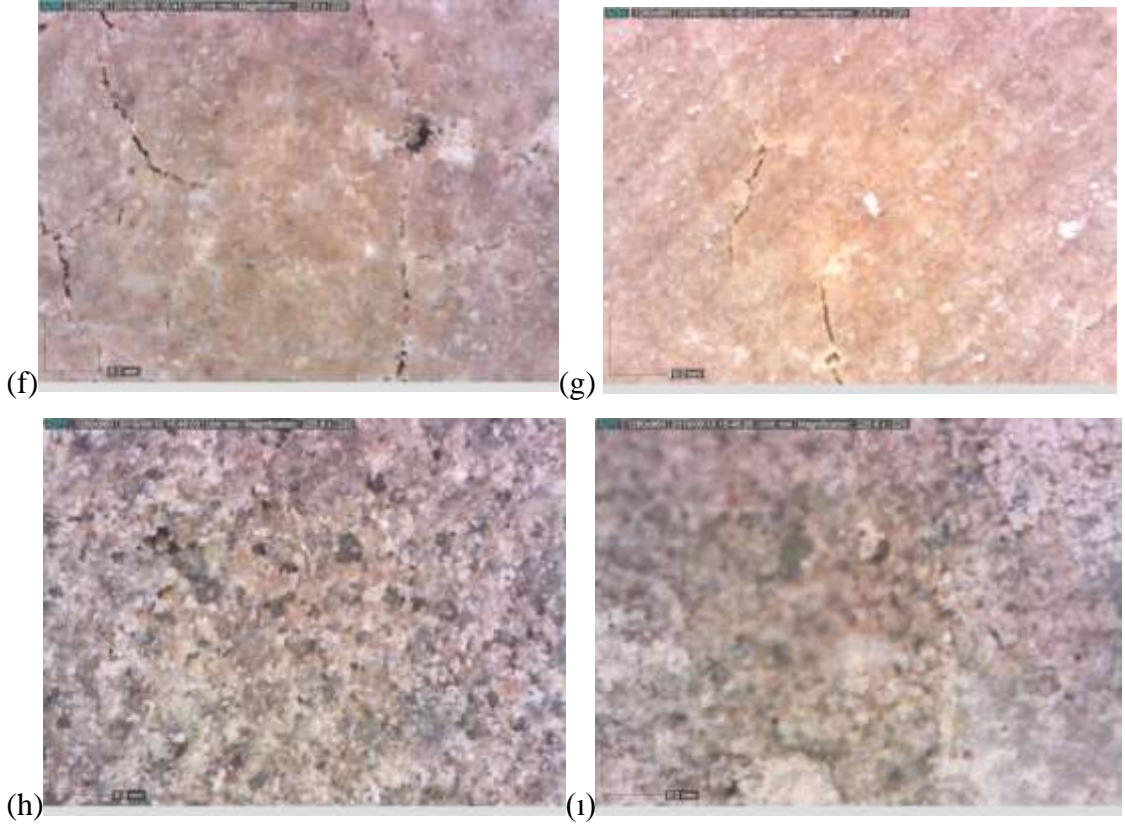
Referans (0,5 su/bağlayıcı oranı kullanıldı. Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadı. Buhar kuru uygulandı. Bu sebeplerden basınç dayanımı Şekil 4.4'teki referans örneğin basınç dayanımından düşüktür.) örneğe kıyasla jeopolimer örneklerin basınç dayanımlarının

oldukça düşük olduğu Şekil 4.16’da görölmektedir. Referans örneğın basınç dayanımı 35,32 MPa iken, jeopolimer örneklerin basınç dayanımları 4,92-11,88 MPa arasında değışmektedir. En yüksek basınç dayanımı 11,88 MPa ile TF20UKMÇ40 kombinasyonunda olduğu görölmektedir. Uçucu külün ve mermer çamurunun arıtma çamuru külü ile kullanılması durumunda basınç dayanımlarının arttığı gözlenmiştir. Basınç dayanımlarındaki düşüşün temel sebebinin örneklerde çimento kullanılmaması olduğu düşünölmektedir. Aynı zamanda jeopolimer yapılarda agrega kullanımının basınç dayanımını olumsuz etkilediğı gözlenmiştir.

Jeopolimer örneklerin kür işleminde sonra mikroskop görüntüleri çekilmiştir. Mikroskop görüntüleri 220 kat büyütme yapılarak alınmıştır. Mikroskop görüntüleri ile buhar kuru sonucunda örneklerde mikro çatlaklar olup olmadığı incelenmiştir. Çatlak oluşumunun basınç dayanımını etkileyip etkilemediğı araştırılmıştır. Şekil 4.17’de örneklerin mikroskop görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 4.17. Buhar küründen sonra jeopolimer örneklerin mikroskop görüntüleri (a: referans, b: %100 multisiklon ünitesi külü, c: %100 torba ünitesi filtre külü, d: %50 multisiklon külü+%50 uçucu kül, e: %50 torba filtre külü +%50 uçucu kül, f: %50 multisiklon külü+%50 mermer çamuru, g: %50 torba filtre külü+%50 mermer çamuru, h: %20 multisiklon külü+%40 uçucu kül+%40 mermer çamuru, ı: %20 torba filtre külü +%40 uçucu kül+%40 mermer çamuru)

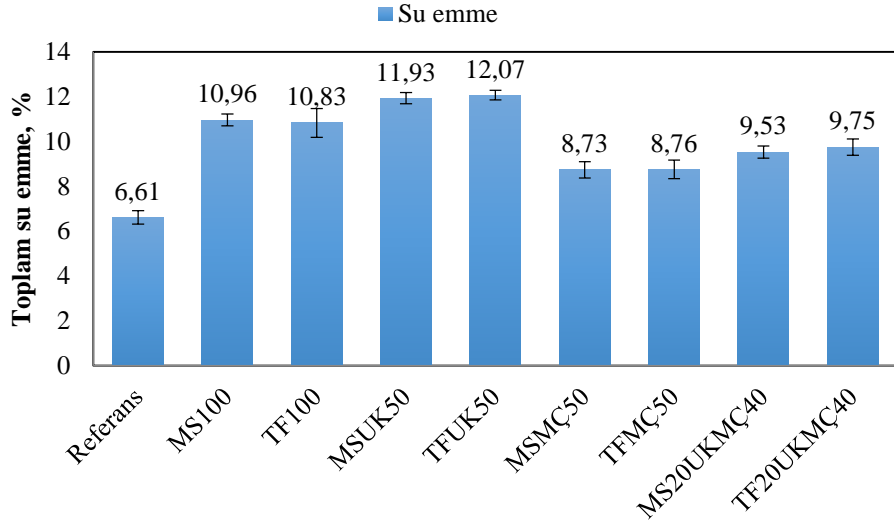


Şekil 4.17. Buhar küründen sonra jeopolimer örneklerin mikroskop görüntüleri (a: referans, b: %100 multisiklon ünitesi külü, c: %100 torba ünitesi filtre külü, d: %50 multisiklon külü+%50 uçucu kül, e: %50 torba filtre külü +%50 uçucu kül, f: %50 multisiklon külü+%50 mermer çamuru, g: %50 torba filtre külü+%50 mermer çamuru, h: %20 multisiklon külü+%40 uçucu kül+%40 mermer çamuru, ı: %20 torba filtre külü +%40 uçucu kül+%40 mermer çamuru)

Şekil 4.17’de görüldüğü gibi uçucu kül içeren örneklerde çatlak görülmezken, uçucu kül içermeyen örneklerde çatlaklar oluştuğu gözlenmiştir. Bu durum uçucu külün jeopolimer örnekler için kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Çatlak oluşan örneklerin çatlak oluşmayan örneklere göre daha düşük basınç dayanımlarına sahip olduğu gözlenmiştir. Çatlakların erken termal büzülme sebebiyle oluştuğu, bu nedenle de basınç dayanımlarında azalmalar meydana geldiği düşünülmektedir. Mikroskop görüntülerinde görüldüğü gibi jeopolimer örneklerde buhar kürü sonrası çatlak oluşumunun basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir.

4.2.9. Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde toplam su emme değerleri

Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan örneklerin toplam su emme değerleri Şekil 4.18’de verilmektedir.

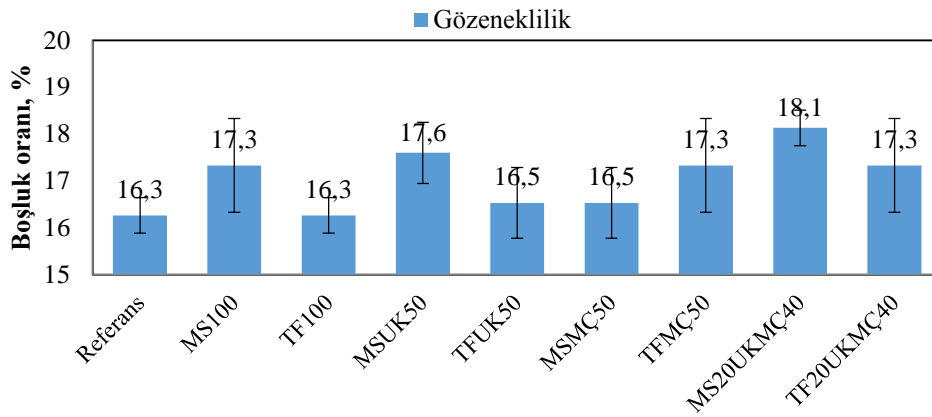


Şekil 4.18. Jeopolimer örneklerde toplam su emme değerleri (MS: multisiklon ünitesi külü, TF: torba filtre ünitesi külü, MÇ: mermer çamuru, UK: uçucu kül, 100: %100, 50: %50, 40: %40, 20: %20)

Tüm örneklerin su emme oranlarının referans örneğe kıyasla daha yüksek olduğu Şekil 4.13’de görülmektedir. Şekil 4.18’de görüldüğü gibi örneklerin su emme yüzdeleri %7,17-12,07 arasında değişmektedir. Örneklerin su emme yüzdelerinin referans örneğinden düşük olduğu görülmektedir. En az su emme yüzdesine (%7,14) sahip örnek TFMÇ50 kombinasyonuna gözlenmiştir. Arıtma çamuru külünün mermer çamuru ile olan kombinasyonlarında daha düşük su emme yüzdeleri elde edilirken, arıtma çamurunun uçucu kül ile olan kombinasyonlarında daha yüksek su emme yüzdeleri elde edilmiştir. Jeopolimer harç örneklerinde mermer çamuru kullanılarak hazırlanan örneklerin su/bağlayıcı oranlarının düşük olması nedeniyle daha az su emme yüzdesine sahip olduğu düşünülmektedir. Uçucu kül kullanılan örneklerde ise hava boşluğu oluştuğu, bu nedenle de su emme yüzdelerinin arttığı tespit edilmiştir.

4.2.10. Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde gözeneklilik değerleri

İnşaat sektöründe kullanılan yapı malzemelerin su geçirimsizliği, içindeki boşluk oranına bağlı olmaktadır. Hazırlanan örnekler katı cisim olmalarına rağmen, çoğu yapı malzemesinin içyapısında, gözle görülebilen veya görülemeyen boşlukların bulunduğu bilinmektedir. Boşluklu yapının betonun dayanımını ve dayanıklılığını etkilediği bilinmektedir. Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan örneklerin gözeneklilik deneyi sonucunda belirlenen boşluk oranları Şekil 4.19’da verilmektedir.



Şekil 4.19. Jeopolimer örneklerde boşluk oranı (MS: multisiklon ünitesi külü, TF: torba filtre ünitesi külü, MÇ: mermer çamuru, UK: uçucu kül, 100: %100, 50: %50, 40: %40, 20: %20)

Tüm örneklerin boşluk oranı yüzdelерinin referans örneğe kıyasla daha yüksek olduğu Şekil 4.19’da görülmektedir. Örneklerin Boşluk oranları %16,3-18,1 arasında değişmektedir. En düşük boşluk oranının %16,3 ile TF100 kombinasyonundan elde edildiği gözlenmiştir. Örneklerin referans örneğe göre daha fazla boşluk oranına sahip olmasında çimento kullanımının etkili olduğu düşünülmektedir.

4.3. S/S ve Jeopolimerizasyon Teknolojisi ile Hazırlanan Hamur Örneklerinde Sızma Davranışları

Ağır metal düzeylerinin giriş örneklerinde sınır değerlerin altında ölçülmüş olmasına rağmen, S/S ve jeopolimerizasyon yöntemlerinde yüksek alkali ortamın bazı amfoterik

metalleri sızdırmış olabileceği düşüncesiyle deneysel süreç sonunda elde edilen örneklerde ağır metal sızma düzeyleri tekrar incelenmiştir. EPA TCLP 1311 (1992) sızma testiyle yapılan analiz sonuçları Çizelge 4.6'da, TS EN 12457-4 (2004) sızma testiyle yapılan analiz sonuçları Çizelge 4.7'de verilmektedir. Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi örneklerin pH'ı 11,4-13,1 aralığında değişmektedir. Çalışmada sızma davranışları çimento içeren ve torba filtre ünitesinden elde edilen kül ile yapılan örneklerde incelenmiştir.

Çizelge 4.6. EPA TCLP 1311 (1992) yöntemine göre örneklerdeki sızma davranışı

Örnek İçerikleri	Ag (mg/L)	As (mg/L)	Cd (mg/L)	Pb (mg/L)	Se (mg/L)	pH
Ç+AÇK+su	<0,010	0,102	<0,010	<0,010	0,041	12
Ç+AÇK+MÇ+su	<0,010	0,018	<0,010	<0,010	0,043	11,4
Ç+AÇK+UK+su	<0,010	0,021	<0,010	<0,010	0,036	13,1
Ç+AÇK+MÇ+UK+su	<0,010	<0,015	<0,010	<0,010	0,028	11,9
Ç+AÇK+AKT	<0,010	0,503	<0,010	<0,010	0,056	13,1
Ç+AÇK+MÇ+AKT	<0,010	0,740	<0,010	<0,010	0,054	12,1
Ç+AÇK+MÇ+AKT	<0,010	0,203	<0,010	<0,010	0,051	13
Ç+AÇK+UK+AKT	<0,010	0,034	<0,010	<0,010	0,043	13
EPA TCLP 1311	5	5	1	5	1	

(UK: uçucu kül, AÇK: arıtma çamuru külü (torba filtre), MÇ: mermer çamuru, Ç: çimento)

Çizelge 4.7. TS EN 12457-4 (2004) yöntemine göre örneklerdeki sızma davranışı

Örnek İçerikleri	As, (mg/L)	Cd, (mg/L)	Cr, (mg/L)	Cu, (mg/L)	Ni, (mg/L)	Pb, (mg/L)	Zn, (mg/L)
Ç+AÇK+su	<0,015	<0,010	0,347	<0,010	<0,015	<0,010	<0,010
Ç+AÇK+MÇ+su	<0,015	<0,010	0,240	<0,010	<0,015	<0,010	0,029
Ç+AÇK+UK+su	<0,015	<0,010	0,866	<0,010	<0,015	<0,010	0,018
Ç+AÇK+MÇ+UK+su	<0,015	<0,010	0,592	<0,010	<0,015	<0,010	0,047
Ç+AÇK+AKT	<0,015	<0,010	0,244	<0,010	<0,015	<0,010	0,023
Ç+AÇK+MÇ+AKT	1,269	<0,010	0,112	<0,010	<0,015	<0,010	0,024
Ç+AÇK+MÇ+AKT	0,231	<0,010	0,172	<0,010	<0,015	<0,010	0,049
Ç+AÇK+UK+AKT	0,096	<0,010	0,446	0,011	<0,015	<0,010	0,048
Sınır Değer (evsel atık depolama)	0,2	0,1	1	5	1	1	5
Sınır Değer (tehlikeli atık depolama)	2,5	0,5	7	10	4	5	20

(UK: uçucu kül, AÇK: arıtma çamuru külü (torba filtre), MÇ: mermer çamuru, Ç: çimento)

Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi atık çamur külünün S/S ve jeopolimerizasyon yöntemleriyle muamele edilmesi sonucunda elde edilen örnekler gerek EPA TCLP 1311’e (1992) gerekse TS EN 12457-4’e (2004) göre tehlikeli atık özelliği göstermemektedir. Bu şekilde elde edilen ürünlerin yapı malzemesi olarak kullanımı ağır metallerin sızması açısından bir sorun oluşturmayacaktır.

Chen ve ark. (2013) arıtma çamuru külünden Al, B, Ba, Co, Cr, Cu, Mo, Se, Sr, V, Zn, elementlerinin sızma davranışını EN 12457 yöntemiyle araştırmıştır. Mo ve Se elementleri dışındaki elementlerin sızma oranının yasal sınır değerlerin altında olduğu gözlenmiştir.

Li ve ark. (2017) arıtma çamuru külünün sızma davranışlarını EPA TCLP 1311 yöntemi ile araştırmıştır. Yapılan harç karışımlarında Pb, Zn, Cu, As, Ni, Cr ve Cd gibi ağır metallerin sızma oranlarının sınır değerlerin çok altında olduğu görülmüştür. Ayrıca, uçucu kül, arıtma çamuru külü gibi mineral katkılarının kullanımının ağır metal sızma oranlarını düşürdüğünü belirtmişlerdir. Araştırmacıların bulguları bu çalışmadaki sonuçlarla uyumludur.

5. SONUÇ

Bu çalışmada arıtma çamuru küllerinin yapı malzemesi olarak geri kazanım durumu araştırılmıştır. Bir atık olarak çıkan arıtma çamuru küllerinin ekonomik bir değer sağlayıp sağlayamayacağı değerlendirilmiştir.

Çimento üretiminin, insan faaliyetinden kaynaklanan CO₂ emisyonuna en çok sebep olan sektörlerden biri olduğu, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %5-7'sinin çimento fabrikalarından kaynaklandığı bilinmektedir (Benhelal, 2013). İnşaat endüstrisinin bu çalışmada uygulanan arıtma çamuru külü gibi atık maddelere yer vermesi, sektörün karbon ayak izini azaltırken atık yönetimi için de alternatif bir çözüm adımı sunmuş olacaktır.

Atık olarak nitelendirilen arıtma çamuru külünün başka bir atık türü olan mermer çamuru ve termik santral uçucu külüyle, çimento kullanmadan jeopolimer hamursı haline getirilebileceği ve yaklaşık 40,56 MPa'lık bir dayanıma ulaşılacağı görülmüştür. Arıtma çamuru külünün çimentoya ikameli olarak hazırlanan harç örneklerinde ise 50,53 MPa'lık basınç dayanımı elde edilmiştir. Bu malzemenin amacına uygun olarak çeşitli ilave testler de yapıldıktan sonra yapı malzemesi olma potansiyeli bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

5.1. Hamur Örneklerinden Elde Edilen Sonuçlar

5.1.1. S/S teknolojisi ile hazırlanan hamur örneklerinden elde edilen sonuçlar

- Hamur örneklerinde basınç dayanımını etkileyen en önemli faktörün kullanılan aktivatör olduğu belirlenmiştir.
- Multisiklon ünitesi külü ile hazırlanan S/S örneğinde basınç dayanımı 30,69 MPa, torba filtre ünitesi külü ile hazırlanan S/S örneğinde basınç dayanımı 21,8 olarak ölçülmüştür.

5.2.2. Jeopolimerizasyon teknolojisi ile hazırlanan hamur örneklerinden elde edilen sonuçlar

- Arıtma çamuru külü kullanılarak hazırlanan hamur örneklerinde en yüksek basınç dayanımı torba filtre ünitesinden elde edilen arıtma çamuru külü+çimento+aktivatör (NaSiNaOH) (50MPa) kombinasyonundan elde edilmiştir.
- Çimentolu örneklerde, aktivatör olarak NaSiNaOH çözeltisinin kullanıldığı jeopolimerizasyon örneklerinin su ile hazırlanan S/S örneklerine göre daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği gözlenmiştir.
- Çimentosuz örneklerde aktivatör olarak NaSiNaOH çözeltisinin kullanıldığı jeopolimerizasyon örneklerinin 8M NaOH ile hazırlanan jeopolimerizasyon örneklerine göre daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği gözlenmiştir.
- Jeopolimerizasyon yöntemi ile hazırlanan hamur örneklerinde kullanılan çözelti nedeniyle örneklerin priz sürelerinin kısaldığı, bu durumun basınç dayanımını arttırdığı ancak işlenebilirliği azaltıp hava kürünün de etkisiyle kuruma büzülme ve mikro çatlaklara sebep olduğu tespit edilmiştir.
- Çimento kullanımının tamamen kaldırılması durumunda basınç dayanımlarında önemli ölçüde düşüş gözlenmiştir.
- Atık çamur külünün S/S ve jeopolimerizasyon yöntemleriyle muamele edilmesi sonucunda elde edilen örnekler gerek EPA TCLP 1311'e gerekse TS EN 12457-4'e göre tehlikeli atık özelliği göstermemektedir. Bu şekilde elde edilen ürünlerin yapı malzemesi olarak kullanımı ağır metallerin sızması açısından bir sorun oluşturmayacaktır.

5.2. Harç Örneklerinden Elde Edilen Sonuçlar

- S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinin basınç dayanımlarının jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan örneklerin basınç dayanımlarından daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

- Jeopolimerizasyon teknolojisinde agreganın ve çözelti hazırlanırken eklenen fazladan suyun kullanılması durumunda basınç dayanımlarında önemli oranlarda düşüş gözlenmiştir.

5.2.1. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinden elde edilen sonuçlar

- En yüksek basınç dayanımı %15 oranında multisiklon ünitesi külü ile hazırlanan 90 günlük örnekte 50,53 MPa olarak ölçülmüştür.
- Atık kül miktarı arttıkça basınç dayanımlarında azalma gözlenmiştir.
- 90 günlük tüm örneklerin su emme yüzdelerinin referans örneğe göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. En düşük su emme yüzdesi multisiklon ünitesi külü ile hazırlanan örneklerde meydana gelmiştir.
- En az boşluk oranının multisiklon ünitesi külü kullanılarak hazırlanan örnekte olduğu gözlenmiştir. Tüm örneklerin porozite değerlerinin referans örneğe göre yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Donma-çözülme deneyi sonucunda en az basınç dayanımı ve ağırlık kayıpları %15 oranında multisiklon ünitesi külü kullanılarak hazırlanan örnekte gözlenmiştir.
- 100 çevrim sonunda %30 mermer çamuru içeriğine sahip örnekte tamamen dağılmıştır. En fazla basınç dayanımı ve ağırlık kayıpları %15 mermer çamuru içeriğine sahip örnekte gözlenmiştir.

5.2.2. Jeopolimerizasyon teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinden elde edilen sonuçlar

- Silisyum ve sodyum içerikli alkali çözeltilerin eklenmesi harç karışımlarının işlenebilirliklerini ve yayılma çaplarını azaltmıştır. Süper akışkanlaştırıcı ile denemeler yapılmış ancak süper akışkanlaştırıcı kullanımının jeopolimer matrislerinde işe yaramadığı tespit edilmiştir.
- Agregaya ve fazladan su kullanılarak hazırlanan jeopolimer harç örneklerinde basınç dayanımlarında azalmalar görülmüştür. Referans örneğe kıyasla daha düşük dayanımlar elde edilmiştir.

- En yüksek basınç dayanımı %50 oranında torba filtre külü ve %50 oranında uçucu kül kullanılarak hazırlanan örnekte 11,44 MPa olarak kaydedilmiştir.
- Uçucu külün jeopolimer yapılarda kullanımının basınç dayanımını arttırdığı ve mikro çatlaklar oluşturmadığı tespit edilmiştir.
- Su emme ve porozite deneylerinde referansa göre daha yüksek yüzdeler hesaplanmıştır.

5.3. Genel Değerlendirme ve Öneriler

- BUSKİ’de faaliyet gösteren yakma tesisinde arıtma çamurlarının yakılmasıyla oluşan külün geri kazanımı ekonomik açıdan önem taşımaktadır.
- Çalışmada kullanılan çamur külünün ağır metal içermemesi, amorf ve kristal yapıya sahip olması ve literatürdeki arıtma çamuru külleri ile kimyasal kompozisyonunun benzer özellikler göstermesi gibi gerekçelerle külün geri kazanımı gelecek vadetmektedir.
- Hamur örneklerinde jeopolimer teknolojisi S/S teknolojisine göre daha başarılı olmuştur. Çimento kullanılan örnekler de çimento kullanılmayan örneklere göre daha başarılıdır.
- Jeopolimer teknolojisi çözelti kullanılmasını gerektirdiğinden maliyetli bir yöntem olarak kabul görmektedir. Jeopolimerizasyonda çimento kullanımı maliyetin artması ve CO₂ oluşumuna neden olduğundan önerilmemektedir. Jeopolimerizasyon, tehlikelilik durumunda atığın bertarafını sağlamakta, tehlikeli bir atık kullanılmadığında ise %100 atık geri kazanımını hedeflemektedir.
- Hamur örneklerinde kullanılan çözelti malzemelerin çok kısa sürede priz almasını ve suyun buharlaşmasını sağladığından ve hava kürünün de etkisiyle örneklerde kuruma büzülme ve çatlaklar meydana gelmiştir. Bunun yanında agrega kullanılmamasının da büzülme sebepleri bilinmektedir. Aynı zamanda jeopolimer hamur örneklerinde erken priz sebebiyle işlenebilirlik sorunları gözlenmiştir. Jeopolimer teknolojisinde kullanılan çözeltiler nedeniyle priz geciktiricilerin işe yaramadığı belirlenmiştir.

- S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri hamur örneklerine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Harç örneklerinde yüksek oranlarda (%85 ve %70) 42,5 R sınıfında portland çimento kullanılması nedeniyle hamur örneklerinde göre daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.
- Hamur örneklerine uygulanan jeopolimerizasyonda çözelti eklenmesiyle oluşan alüminosilikat kimyasal bileşikler nedeniyle sıcaklığın arttığı ve örneklerin çok kısa sürede priz aldığına değinilmiştir. Ortam sıcaklığının düşürülmesi ile priz alma süresinin uzatılması bu çalışma için önerilmektedir.
- Agregada kullanılmadan hazırlanan hamur yönteminde kuruma büzülmelerin ve çatlak oluşumunun önüne geçebilmek için buhar kürü, standart, su kürü veya etüv kürü gibi farklı kür yöntemleri denenmelidir.
- NaSiNaOH çözeltisinin 8M NaOH çözeltisine göre daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Ancak alüminosilikat içeriğinden dolayı NaSiNaOH işlenebilirliği azaltmıştır. NaSiNaOH çözeltisi belirli oranlarda su ile hazırlandığında işlenebilirlik probleminin azalacağı düşünülmektedir.
- S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde standart su kürü uygulandığından ve agregada kullanıldığında kuruma büzülme meydana gelmemiş, çatlaklar oluşmamıştır. Yapılan basınç dayanımı, su emme, porozite, donma çözülme gibi deneyler bu atık külün kullanılabilir özellikte olduğunu göstermektedir. Ancak bu konuda kesin bir yorum yapabilmek için eğilme deneyleri, yüksek sıcaklıklara dayanım deneyleri, alkali-silika deneyleri, sülfata direnç deneyleri gibi deneylerin de yapılması önerilmektedir. Harç deneylerinin sonucunda beton deneylerinin de yapılması gerekmektedir.
- Multisiklon ünitesinden elde edilen çamur külünün öğütülerek blaine değeri daha yüksek bir kül elde edilebilmesi halinde daha yüksek dayanımlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Külün öğütülerek çalışmalar yapılması önerilmektedir.
- Jeopolimer teknolojisi ile hazırlanan harç örneklerinde agregada kullanımı ve çözelti hazırlanırken eklenen fazladan su basınç dayanımlarını önemli ölçüde düşürmüştür. Örnekler hazırlanırken kullanılan su/bağlayıcı (0,6) oranının düşürülerek daha iyi sonuçlar alınabileceği düşünülmektedir. Ancak yüksek

incelik (blaine) değerine sahip arıtma çamuru külünün su ihtiyacı fazla olduğundan su/bağlayıcı oranı düşürüldüğünde harç kıvamı oluşmayacaktır. NaSilNaOH çözeltisi hali hazırda %65 oranında su içermektedir. Çözeltide kullanılan su miktarının azaltılması durumunda NaSilNaOH çözeltisi eklenerek bu durumun dengelenmesi önerilir. NaSilNaOH miktarının artması, örnek içeriğindeki Si_2O , Na_2O miktarlarını da arttıracığından basınç dayanımını olumlu yönde etkilemesi beklenmektedir.

- Çalışmada jeopolimer hamur örneklerinde kullanılan NaSilNaOH çözeltisinin M_s (Si_2O/Na_2O) oranı 3,375 iken jeopolimer harç örneklerinde 1,6'dır. Jeopolimer hamur örneklerinin jeopolimer harç örneklerine göre daha başarılı olduğuna değinilmiştir. Bunun temel sebebinin jeopolimer harç örneklerinde kullanılan Si_2O/Na_2O oranının düşük olmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. M_s oranının artırılması durumunda basınç dayanımlarının da artacağı düşünülmektedir. M_s oranının artırılması çözelti miktarını arttırmak anlamına geldiğinden maliyet de artacaktır. Ancak çamur külünün kullanılabilir olması açısından yüksek dayanımlar vermesi önem taşımaktadır.
- Bunun yanında karışımlara yüksek fırın cürufu (YFC) eklenmesi önerilmektedir. YFC'nin çimentoya en yakın atık olduğu ve basınç dayanımlarını olumlu etkilediği bilinmektedir.
- Jeopolimerizasyon, sadece atık malzemeler kullanılarak yapı malzemeleri üretebilmeyi hedeflediğinden, jeopolimer yapılar 'Yeşil Yapı' olarak adlandırılmaktadır. Çimento kullanımını ortadan kaldıran bu yöntem klinker üretimi sırasında oluşan CO_2 üretimini sıfıra indirdiğinden çevre dostu olarak görülmektedir. Ancak çözelti hazırlama, ortam koşullarından kolay etkilenme gibi uygulama zorluklarına sahip olduğundan ve arıtma çamuru külünün jeopolimerizasyonu ile ilgili yeterli çalışma olmamasından bu yöntem önerilmemektedir.
- Mineral katkıli çimentolara (puzolanik çimento) uçucu kül gibi atık maddelerin eklendiği bilinmektedir. Uçucu külün çimentoda kullanıldığı gibi arıtma çamuru külünün de çimentoya ikameli olarak eklenebileceği düşünülmektedir. S/S teknolojisi ile hazırlanan harç örnekleri için yapılan deneyler külün kullanılabilir

olduğunu göstermektedir. Sera gazına sebep olan CO₂ emisyonu üretiminin azaltılması için imento sektörüne kısıtlamalar getirilmeli, arıtma çamuru külü, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi atıkların imento sektöründe kullanımının arttırılması için teŗvikler sağlanmalıdır.

- Çimento sektöründe kabul gören arıtma çamuru külünün daha sonraki alıŗmalarda uygulama kolaylığının geliŗtirilmesi halinde daha çevreci bir yöntem olan jeopolimerizasyon teknoloğisi ile araŗtırmalar yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdelouahed, A., Belachia, M., Sebbagh, T., 2016.** Effect of SCMs on mechanical, chemical and microstructural properties of SRC in acidic medium. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22(2): 212–225
- Anderson, M., Elliot, M., Hickson, C., 2002.** Factory-scale proving trials using combined mixtures of three by-products wastes (including incinerated sewage sludge ash) in clay building bricks. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 77: 345-351.
- Arslanhan, M., 2016.** Çimento üretim proseslerinde eritiş metoduyla hazırlanmış numunelerin WDXRF analizleri ve hata etkilerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, BTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Aruntaş, H.Y., 2006.** Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(7): 481-486.
- Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, 2010.** <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/03/20100326-13.htm>. Erişim tarihi: 24.07.2019.
- ASTM C204 – 11, 2011.** Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus.
- ASTM C642 – 13, 2013.** Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- ASTM C 136 – 14, 2014.** Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- ASTM C 230-14, 2014.** Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.
- ASTM C 666-15, 2015.** Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.
- ASTM C 109-16a, 2016.** Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
- ASTM C 311 - 18, 2018.** Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete.
- ASTM C618 – 19, 2019.** Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- Bao, Y., Grutzeck M,W., Jantzen, C.M., 2005.** Preparation and properties of hydro ceramic waste forms made with simulated Hanford low-activity waste. *Journal of American Ceramic Society*, 88(12): 3287-3302.
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., Bahadori, A., 2013.** Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 51: 142-161.
- Bittencourt, S., 2018.** Agricultural Use of Sewage Sludge in Paraná State, Brazil: A Decade of National Regulation. *Recycling*, 3 (53): 1-8.
- Brotos, F.B., Garces, P., Paya, J., Saval, J.M., 2014.** Portland cement systems with addition of sewage sludge ash: Application in concretes for the manufacture of blocks. *Journal of Cleaner Production journal*, 82: 112-124.

- Carrere, H., Dumas, C., Battimelli, A., Bastone, D.J., Delgenes, J.P., Steyer, J.P., Ferrer, I., 2010.** Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review, *Journal of Hazardous Material*, 183: 1-15.
- Cheesman, C.R., Asavapisit, S., Knight, J., 1998.** Effect of uniaxially pressing ordinary portland cement pastes containing metal hydroxide on porosity, density, and leaching. *Cement Concrete Research*, 28 (11): 1639-1653.
- Chen, C.H., Chiou, I.J., Wang, K.S., 2006.** Sintering effect on cement bonded sewage sludge ash. *Cement & Concrete Composites*, 28(1): 26-32.
- Chen, M.Z., Denise, B., Mathieu, G., Jacques, M., Rémy, G., 2013.** Environmental and technical assessments of the potential utilization of sewage sludge ashes (SSAs) as secondary raw materials in construction. *Waste Management*, 33(5): 1268-1275.
- Chen, Z., Li, J.S., Poon, C.S., 2018.** Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, 171: 1447-1459.
- Chen Z., Li J.S., Poon C.S., 2018.** Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, 171: 1447-1459.
- Collery, D.J., Paine, K.A., Dhir, R.K., 2015.** Establishing regional use of recycled aggregates in concrete: a performance related applications approach. *Magazine of Concrete Research*, 67 (11): 559-574.
- Conner, J.R., 1990.** Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes, Van Nostrand Reinhold, New York, 692 pp.
- Davidovits, J., 1991.** Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37: 1633-1656.
- Dassekpo, J.B.M., Zha, X., Zhan, J., 2017.** Compressive strength performance of geopolymer paste derived from Completely Decomposed Granite (CDG) and partial fly ash replacement. *Construction and Building Materials*, 138: 195–203.
- Dermatas, D., Meng, X., 2003.** Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils. *Engineering Geology*, 70: 377 – 394.
- Dhir, R.K., McCarthy, M.J., Tittle P.A.J., Zhou S., 2006.** Role of cement content in specifications for concrete durability: aggregate type influences. *Proceeding of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 159 (4): 229-242.
- Dhir, R.K., Ghataora, G.S., Lynn, C.J., 2016.** Sustainable Construction Materials: Sewage Sludge Ash, Elsevier Science & Technology, 288 pp.
- Donatello, S., Cheesman, C.R., 2013.** Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review. *Waste Management*, 33 (11): 2328-2340.
- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B., Ucar, A., 2010.** Uçucu Kül Katkılı Çimento Hidratasyonuna Elektrokinetik Özelliklerin Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(3): 449-457.
- Dryden, I.G.C., 1982.** Chapter 5- Fluidized-bed combustion. *The Efficient Use of Energy* (second edition), 58–63 pp.
- Dutch Ministry, 2000.** Dutch Target and Intervention Values. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. http://esdat.net/Environmental%20Standards/Dutch/annexS_I2000Dutch%20Environmental%20Standards.pdf. Erişim tarihi: 08.07.2019.

- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Mallicoat, S.W., Kriven, W.M., Van Deventer, J.S.J., 2005.** Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269 (1-3): 47-58.
- Duxson, P., Mallicoat, S.W., Lukey, G.C., Kriven, W.M., Van Deventer J.S.J., 2007a.** The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 292 (1): 8-20.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., Van Deventer, J.S.J., 2007b.** Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Material Science*, 42: 2917–2933.
- Dyer, T.D. Dhir, R.K., Halliday, J.E., 2006.** Influence of solid solution on chloride leaching from waste forms. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, *Waste and Resource Management*, 159 (3), 131-139.
- Environmental and Water Technology Centre of Innovation, Ngee Ann Polytechnic, 2012.** Direct Use of Sewage Sludge Ash in Paving Materials. ECO Industrial Environmental Engineering Pte Ltd. Singapore, 18 pp.
- EPA (Environmental Protection Agency), 1990.** ISBN: 0105443905 (SSI 2001/99). Erişim tarihi: 08.07.2019.
- EPA (Environmental Protection Agency) 3015A, 2007.** Microwave Assisted Acid Digestion Of Aqueous Samples and Extracts. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3015a.pdf>. Erişim tarihi: 05.06.2019.
- EPA (Environmental Protection Agency) TCLP 1311, 1992.** Toxicity Characteristic Leaching Procedure. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/1311.pdf>. Erişim tarihi: 24.07.2019.
- Etris, S., Lieb, K., Sisca, V., Moore, I., Batik, A., Auskern, A., Horn, W., 1973.** Capillary porosity in hardened cement paste, *Journal of Testing and Evaluation*, 1 (1): 74-79.
- European Community, 2008.** Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 Kasım 2008 on Waste and Repealing Certain Directives, 312. pp
- European UN General Assembly, 1992.** <http://www.worldlii.org/int/other/UNGA/1992/>. Erişim tarihi: 28.07.2019.
- Eurostat, 2015.** <https://ec.europa.eu/eurostat/home?>. Erişim tarihi: 27.06.2019.
- Fernández-Jiménez, A.M., Palomo, A., Lopez-Hombrados, C., 2006.** Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. *ACI Materials Journal*, 103 (2): 106-112.
- Filibeli, A., 2013.** Arıtma Çamurlarının İşlenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Basım Ünitesi, İzmir, 289 pp.
- Fleming, G., 1986.** Sludge: A Waste or a Resource, Proceedings of the Scottish Centre's Annual Symposium (Sludge Disposal into the 1990s), Hamilton, 10 Aralık 1986.
- Fujita, R., Horiguchi, T., Shimura, K., 2011.** Applicability of CSLM with incinerated sewage sludge ash and crushed stone powder. Second International Conference on Sustainable Constructions Materials and Technologies, 13: 28-30.
- Gartner, E., 2004.** Industrially Interesting Approaches to “Low-CO2”. *Cements Cement and Concrete Research*, 34 (9): 1489-1498.

- Glukhovsky, V.D., 1959.** Geopolymer technology: the current state of the art, Soil silicates, Gosstroyizdat, Kiev, 154 pp.
- Gordon, M., Bell, J.L., Kriven, W.M., 2005.** Comparison of Naturally and Synthetically-Derived, Potassium-Based Geopolymers. *Ceramic Transaction*, 165: 95-106.
- Gurjar, B.R., Tyagi, V.K., 2017.** Sludge Management, CRC Press LLC, pp: 1-30.
- Gündeşli, U., 2008.** Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Hewlett, P.C., 2003.** Physicochemical and mechanical properties of portland cements, Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th ed., pp. 343–419.
- Horiguchi, T., Fujita, R., Shimura, K., 2011.** Applicability of controlled low-strength materials with incinerated sewage sludge ash and crushed stone powder. *Journal of Materials Civil Engineering*, 23 (6): 767-771.
- Hoy, M., Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A., 2016.** Recycled asphalt pavement – fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material: Strength and toxic leaching investigations. *Science of the Total Environment*, 573: 19–26.
- Jaarsveld, J., Deventer, J., 1999.** The effect of alkali metal activator on the properties of the fly ash-based. *Industrial & Engineering Chemistry Research*,. 38 (10): 3932-3941.
- James, L., Barnard, P., Stephen, A., 2005.** Biological Nutrient Removal (BNR) Operation Wastewater Treatment Plants, 165 pp.
- Jensen J., Jepsen S.E., 2005.** The production, use and quality of sewage sludge in Denmark. *Waste Management*, 25 (3), 239-47.
- Kacprzaka M., Neczaja E., Fijałkowska K., Grobelaka A., Grossera A., Worwaga M., Rorata, A., Brattebob H., Almåsc A., Singhc B.R., 2017.** Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, 156: 39-46
- Kappel, A., Ottosen, L.M., Kirkelund, G.M., 2017.** Colour, compressive strength and workability of mortars with an iron rich sewage sludge ash. *Construction and Building Materials*, 157: 1199–1205.
- Khale, D. Chaudhary, R., 2007.** Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Material Science*, 42: 729-746.
- Khanbilvardi, R., Afshari-Tork, S., 2002.** Ash use from Suffolk Country Wastewater Treatment Plant Sewer District No:3 Phase:2, New York State Energy Research and Development Authority, 112 pp.
- Kingerly, W.D., Bowen H.K., Uhlmann D.R., 1976.** Intruction to Ceramics, second ed. John Wiley&Sons, New York, 1032 pp.
- Köse, E.T., Akyıldız, A., 2017.** Kırmızı Çamurun Çimento Bazlı Solidifikasyon/Stabilizasyonu: Ağır Metallerin Sızma Özellikleri, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 23 (6), 741-747.
- Krejcirikovaa, B., Ottosena, L.M., Kirkelunda, G.M., Rodea, C., Peuhkuri, R., 2019.** Characterization of sewage sludge ash and its effect on moisture physics of mortar. *Journal of Building Engineering*, 21: 396–403.

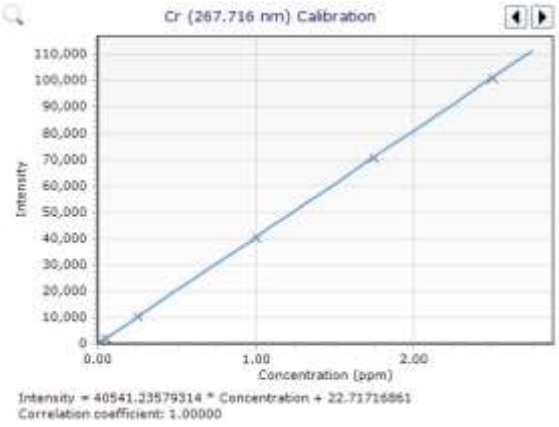
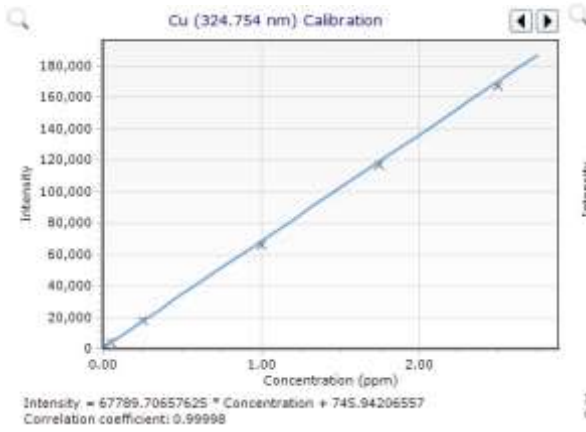
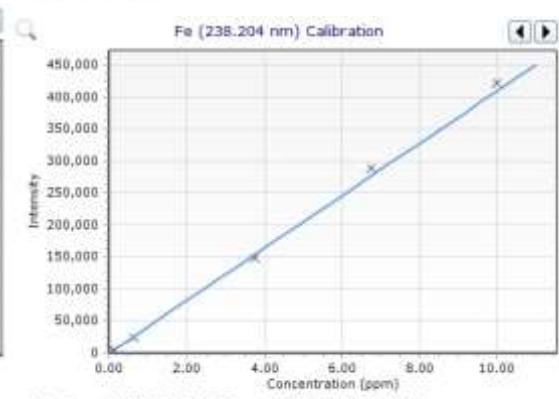
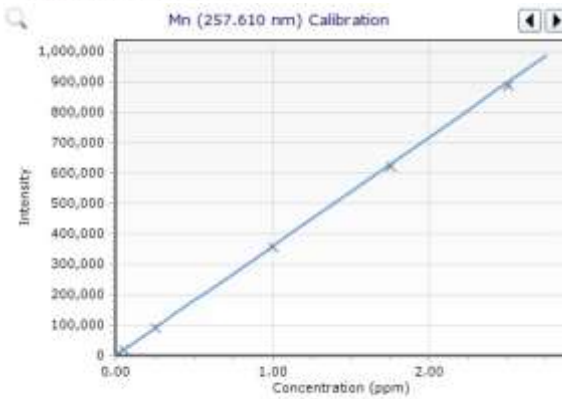
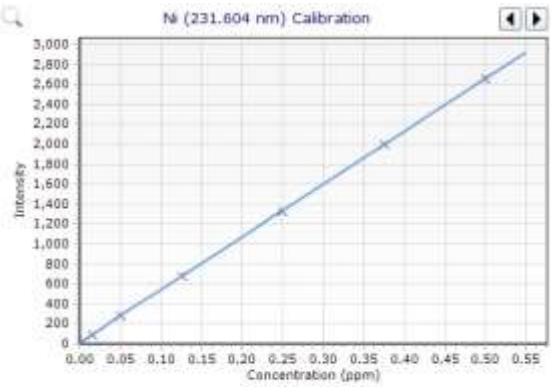
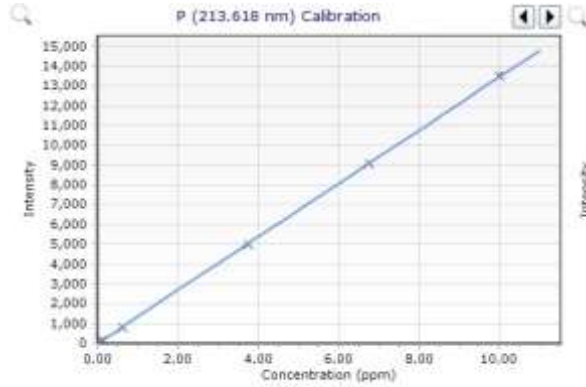
- Krivenko, P.V., 1994.** Krivenko PV (ed) Proceedings of the first international conference on alkaline cements, concretes. VIPOL Stock Company, Kiev, Ukraine, 11-129 pp.
- LaGrega, M.D., Michael, D., 1994.** Hazardous Waste Management, New York, 641-642 pp.
- Lasheen, M.R., Ashmawy, A.M., Ibrahim, H.S., Moniem, S.M.A., 2013.** Pozzolanic based materials for stabilization/solidification of contaminated sludge with hazardous heavy metal: case study. *Desalination and Water Treatment*, 51 (13-15): 2644–2655.
- Li, J.S., Guo, M.Z., Xue, Q., Poon, C.S., 2017.** Recycling of incinerated sewage sludge ash and cathode ray tube funnel glass in cement mortars. *Journal of Cleaner Production*, 152: 142-149.
- Lin, K.L. ve Lin, C.Y., 2005.** Hydration characteristics of waste sludge ash utilized as raw cement material. *Cement and Concrete Research*, 35: 1999-2007.
- Lin, D.F., Lin, K.L., Hung, M.J., Luo H.L., 2007.** Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. *Journal of Hazardous Materials*, 145: 58–64.
- Lynn, J., Dhir, R.K., Ghataora, G.S., West, R.P., 2015.** Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. *Construction and Building Materials*, 98: 767–779.
- Mallicoat, S., Sarin, P., Kriven, W.M., 2005.** Novel alkali-bonded ceramic filtration membranes. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 26: 26-37
- Maozhe, C., Denise, B., Mathieu, G., Jacques, M., Remy, G., 2013.** Environmental and technical assessment of the potential utilization of sewage sludge ashes (SSAs) as secondary raw materials in construction. *Waste Management*, 33: 1268-1275.
- Mahieux, P.Y., Aubert, J.E., Cyr, M., Coutand, M., Husson, B., 2010.** Quantitative mineralogical composition of complex mineral wastes - Contribution of the Rietveld method. *Waste Management*, 30(3): 378-388.
- Mardani-Aghabaglou, A., Boyaci, O.C., Hosseinneshad, H., Felekoglu, B., Ramyar, K., 2016.** Effect of gypsum type on properties of cementitious materials containing high range water reducing admixture, *Cement and Concrete Composites*, 68: 15-26.
- Metcalf & Eddy, 1991.** Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse, McGraw-Hill International Editions, 1848 pp.
- Monzo, J., Paya, J., Borrachero, M.V., Girbe, I., 2003.** Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mixtures: the effect of SSA on the workability of cement mortars. *Waste Management*, 23: 373–381.
- Morsy, M.S., Alsayed, S.H., Al-Salloum, Y., Almusallam T., 2014.** Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on strength and microstructure of fly ash geopolymer binder. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39: 4333–4339.
- MWST, (Manual on Water Supply and Treatment) 1991.** 3rd edition. New Delhi, Ministry of Urban Development, Government of India.
- O'Flaherty, C.A., 2002.** Highways - The Location, Design, Construction & Maintenance of Pavements. Butterworth Heinemann, Oxford, 553 pp.
- Öztürk, İ., Çallı, B., Arıkan, O., Altınbaş, M., 2015.** Atıksu Arıtma Çamurlarının İşlenmesi ve Bertarafı (El Kitabı), Türkiye Belediyeler Birliği (TBB), Ankara, 218 pp.
- Palomo, A., De La Fuente, J.I.L., 2003.** Alkali-activated cementitious materials: alternative matrices for the immobilization of hazardous waste Part I. Stabilization of boron. *Cement Concrete Research*, 33 (2): 281-288.

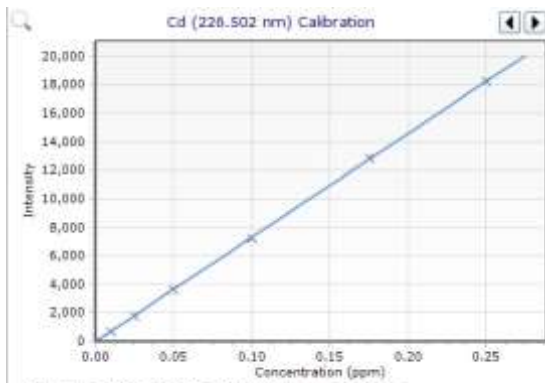
- Parker, D.S., Morill, M.J., 1992.** Wastewater treatment process theory and practice: The emerging convergence, *Water Science and Technology*, 25 (6), 301-315.
- Pojasek, R.B., 1979.** Toxic and Hazardous Waste Disposal, Ann Arbor Science Publisher, Ann Arbor, MI, 408 pp.
- Provis J.L., Van Deventer J.S.J., 2009.** Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications. CRC Press, 464 pp.
- Purdon, A.O., 1940.** The action of alkalis on blast furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry- Transactions and communications*, 59: 191-202.
- Rahier, H., Van Mele, B., Biesemans, M., Wastiels, J., Wu, X., 1996.** Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses. *Journal of Material Science*, 31 (1) : 71-79.
- Ribbing, 2007.** Environmentally friendly use of non-coal ashes in Sweden. *Waste Management*, 27: 1428–1435.
- Richerson, D.W., 2006.** Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, Processing and Use in Design, third ed. Taylor&Francis, Boca Raton, 707 pp.
- Riffat, R., 2012.** Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Rowles, M., O’connor, B. 2003.** Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesised by sodium silicate activation of metakaolinite. *Journal of Material Chemistry*, 13 (59): 1161-1165.
- Roy, D., 1999.** Alkali- activated cements- opportunities and challenges. *Cement Concrete Research*, 29: 249-254.
- Rößler, M., Odler, I., 1985.** Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes I. Effect of porosity. *Cement and Concrete Research*, 15(2): 320-330.
- Scragg, A., 1999.** Environmental Biotechnology, Pearson Education Ltd, England, pp: 70-77.
- Singh, M., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwa, K.S., Bhunia, D., 2017.** A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. *Journal of Building Engineering*, 13: 87-95.
- Spinoza, L., Vesilind P.A., 2001.** Sludge into Biosolids: Processing, Disposal and Utilization, IWA Publishing, United Kingdom, 400 pp.
- Tajudin, S.A.A., Azmi, M.A.M., Nabila, A.T.A., 2016.** Stabilization/Solidification Remediation Method for Contaminated Soil: A Review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 136: 012043.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., 1993.** Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues, New York, pp: 622-623,
- Tokyay, M., Erdoğan, K., 1998.** Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB, Ankara, 1998.
- TS EN 772–4, 2000.** Methods of test for masonry units - Part 4: Determination of real and bulk density and of total and open porosity for natural stone masonry units.
- TS EN 197-1, 2002.** Genel Çimentolar-Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12457-4, 2004.** Characterisation of waste - Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges - Part 4: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 10 mm.

- TS EN 450-1, 2013.** Uçucu Kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri.
- Turovskiy, I.S., Mathai, P.K., 2006.** Wastewater Sludge Processing, Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, 349 pp.
- Tyagi, V.K., Lo, S.L., 2011.** Application of physico-chemical pretreatment methods to enhance the sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: An up to date review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 10: 215-242.
- Tyagi, V.K., Lo, S.L., 2013.** Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25: 708-728.
- Vouk, D., Serdar, M., Nakić, D., Anić-Vučinić, A., 2016.** Use of sludge generated at WWTP in the production of cement mortar and concrete. *Gradevinar*, 68 (3):199-210.
- Whyte A., Dyer, T.D., Dhir, R.K. 2005.** Best practicable environmental option (BPEO) for recycling demolition waste. Proceedings of International Conference on Achieving Sustainability in Construction, Scotland, UK, pp: 245-252.
- WinterGreen Research, 2014.** WinterGreen Research Press Release-Ceramics. <https://wintergreenresearch.com>. Erişim tarihi: 27.06.2019.
- Wu W., Zhou Z., Yang J., Chen G., Yao J., Tu C., Zhao X., Qiu Z., Wu Z., 2017.** Insights into conditioning of landfill sludge by FeCl₃ and lime. *Water Research*, 160: 167-177.
- Xu, H., Van Deventer, J.S.J., 2000.** The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59: 247.
- Yıldız, Ş., Yılmaz, E., Ölmez, E., 2009.** Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, 15-17 Haziran 2009, İstanbul.
- Yıldız, K., Dorum, A., Koçak, Y., 2010.** Pomza Zeolit ve CEM I Çimentosunun Minerolojik Moleküler Elektrokinetik ve Termal Uyumunun Yüksek Dayanımlı Betona Etkisinin Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(4): 867-879.
- Yudenfreund, M., Hanna, K.M., Skalny, J., Older, I., Brunauer, S., 1972.** Hardened portland cement pastes of low porosity V. Compressive strength. *Cement and Concrete Research*, 2(6): 731-743.

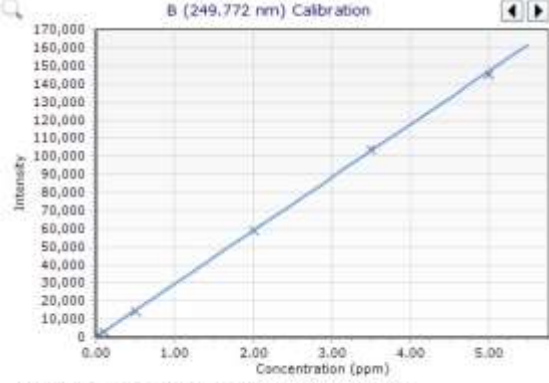
EKLER

Kalibrasyon Grafikleri

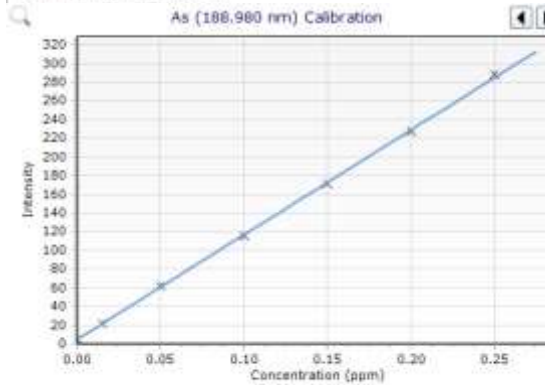




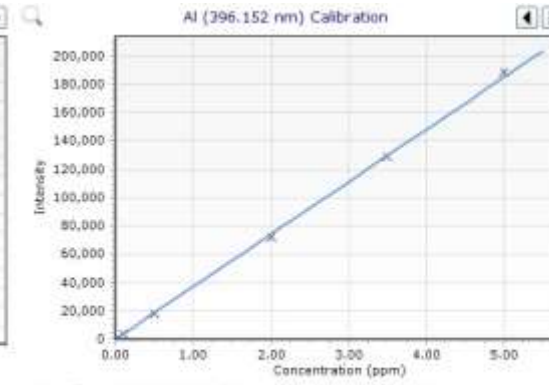
Intensity = 72970.61159646 * Concentration + 8.49792382
Correlation coefficient: 0.99998



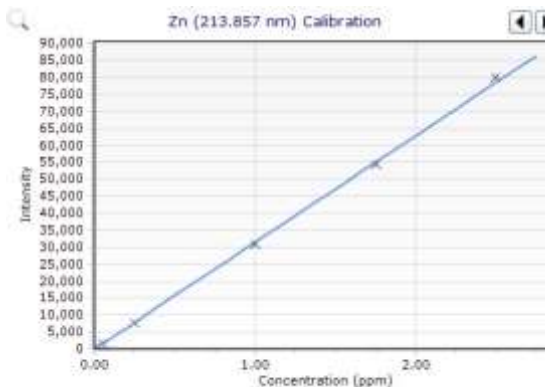
Intensity = 29425.43889754 * Concentration + 252.54763277
Correlation coefficient: 0.99993



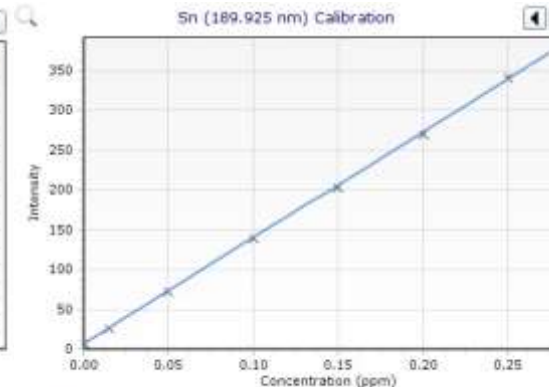
Intensity = 1120.24140223 * Concentration + 4.96160869
Correlation coefficient: 0.99986



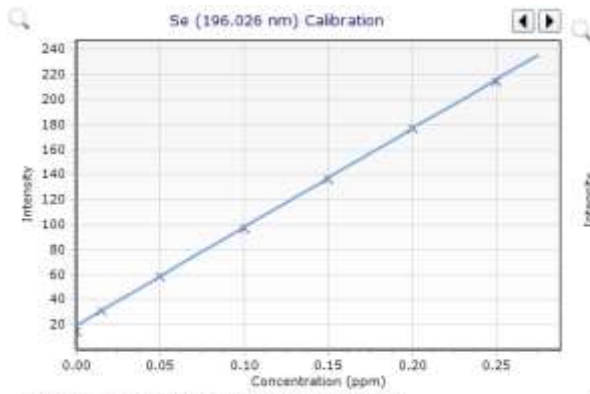
Intensity = 37057.63916057 * Concentration + 126.27246007
Correlation coefficient: 0.99983



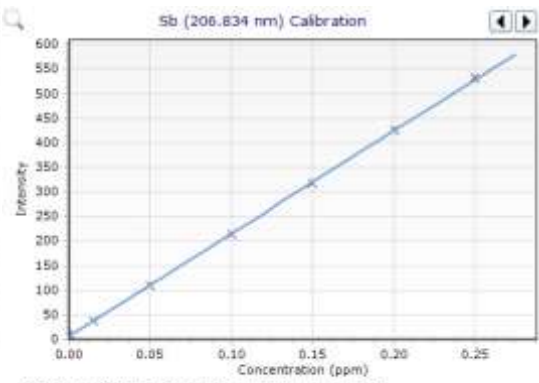
Intensity = 31429.75654893 * Concentration + 34.95845349
Correlation coefficient: 0.99980



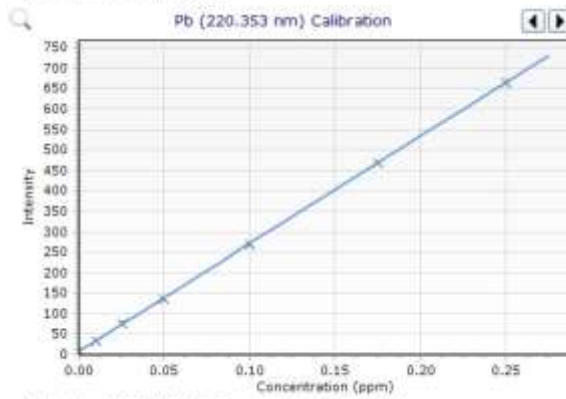
Intensity = 1332.56160273 * Concentration + 7.03280658
Correlation coefficient: 0.99991



Intensity = 786.42925886 * Concentration + 19.50828486
 Correlation coefficient: 0.99972



Intensity = 2087.69212814 * Concentration + 6.65496909
 Correlation coefficient: 0.99990



Intensity = 2626.35420381 * Concentration + 9.00684561
 Correlation coefficient: 0.99997

Özgeçmiş

Adı Soyadı : Berna Yiğit
Doğum Yeri ve Tarihi : Yıldırım/Bursa-25.06.1994
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Ahmet Vefik Paşa Anadolu Lisesi
Lisans : Uludağ Üniversitesi
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Uludağ Üniversitesi, 2210-C BİDEB Bursiyeri, 2018-2019

İletişim (e-posta) : 031250030@ogr.uludag.edu.tr

Yayınları :

Yiğit, B., Salihoğlu, G., Mardani-Aghabaglou, A., Salihoğlu, N.K., Özen, S., 2019. Recovery of Sewage Sludge Incinerator Ash by Geopolymerization, HERAKLION 2019 7th International Conference on Sustainable Solid Waste Management, 26-29 Haziran 2019, Greece.

Yiğit, B., Salihoğlu, G., 2018. Atıksu Arıtma Tesislerinin Olası Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi, Uluslararası Su Ve Çevre Kongresi, 22-24 Mart 2018, Bursa.

Yiğit, B., Karabacak, E., Salihoğlu, G., 2017. Ulusal Çevre, Deniz ve Kıyı Kirliliği Sempozyumu, 10-12 Ekim 2017, Bursa.

Yiğit, B., Karabacak, E., Salihoğlu, G., 2017. Türkiye’de Plastik Poşet Kullanımının Azaltılması, *Çevre Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 2 (2): 62-81.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
TEZ ÇOĞALTMA VE ELEKTRONİK YAYIMLAMA İZİN FORMU

Yazar Adı Soyadı	Berna Yiğit
Tez Adı	Aritma Çamurlarının Yakılmasıyla Oluşan Küllerin Yapı Malzemesi Olarak Geri Kazanımı
Enstitü	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Türü	DeneySEL Tez
Tez Danışman(lar)ı	Prof. Dr. Güray Salihoğlu
Çoğaltma (Fotokopi Çekim) izni	<input checked="" type="checkbox"/> Tezimden fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input type="checkbox"/> Tezimin sadece içindekiler, özet, kaynakça ve içeriğinin % 10 bölümünün fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input type="checkbox"/> Tezimden fotokopi çekilmesine izin vermiyorum
Yayımlama izni	<input checked="" type="checkbox"/> Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasına izin veriyorum

Hazırlamış olduğum tezimin belirttiğim hususlar dikkate alınarak, fikri mülkiyet haklarım saklı kalmak üzere Bursa Uludağ Üniversitesi Kütüphane ve Dokümantasyon Daire Başkanlığı tarafından hizmete sunulmasına izin verdiğimi beyan ederim.

Tarih : 22.10.2019

İmza : 