








Recycling of sewage sludge incineration ashes as construction material

Berna Yiğit¹ , Güray Salihoğlu^{1*} , Ali Mardani-Aghabaglou² , Nezh Kamil Salihoğlu¹ , Süleyman Özen³ 

¹Environmental Engineering Department, Bursa Uludağ University, Bursa, 16059, Turkey

²Civil Engineering Department, Bursa Uludağ University, Bursa, 16059, Turkey

³Civil Engineering Department, Bursa Technical University, Bursa, 16330, Turkey

Highlights:

- Production of construction material from sewage sludge ash without using cement
- The convenience of sewage sludge ash with marble sludge and fly ash for geopolymerization
- No heavy metal leaching problem with the sludge ash-originated construction materials, no hazardous characteristics of the products

Keywords:

- Stabilization / Solidification,
- Geopolymerization,
- Compressive Strength,
- TCLP,
- Eluate test

Article Info:

Research Article
Received: 26.03.2019
Accepted: 06.03.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.544678

Acknowledgement:

TÜBİTAK BİDEB 2211

Correspondence:

Author: Güray Salihoğlu
e-mail:
gurays@uludag.edu.tr
phone: +90 224 294 2120

Graphical/Tabular Abstract

Incineration is a commonly preferred method in sewage sludge management because of its high volume reduction capacity. However, a waste, namely sludge ash is being generated in considerable amounts as a result of incineration. It is being estimated that the global annual sewage sludge ash generation accounts to approximately 1.7 million tons, and it is likely to increase in the future. Sewage sludges that are originating from the municipal wastewater treatment plants of Bursa city have been incinerated with a fluidized bed reactor since 2017. Each month, on an average, 615 tons of ash is generated as a waste of the incineration process, which needs disposal.

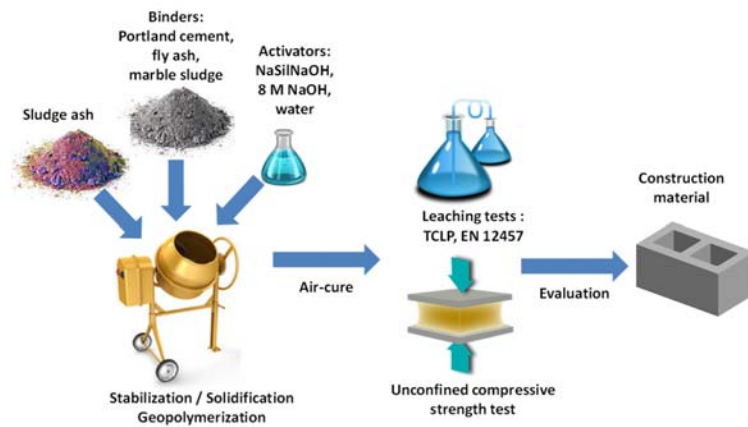


Figure A. Conceptual model for the experimental study

Purpose: The purpose of this study was to investigate if the sludge incinerator ash can be recycled as a construction material.

Theory and Methods:

Stabilization/solidification (S/S) and geopolymerization technologies were applied to the sludge ash to convert the waste material into construction material. Portland cement, fly ash from a coal-fired power plant, and marble sludge were used as binders. S/S samples were activated with water, while geopolymer samples were activated with 8MNaOH and NaSi1NaOH solutions. The prepared paste samples were air-cured for 28 days and analyzed for compressive strength and heavy metals leaching.

Results:

S/S samples containing sludge ash yielded a compressive strength level of 21.8 MPa, while geopolymer samples resulted in a compressive strength level of 50.0 MPa. Higher compressive strength levels of several samples containing waste sludge ash than that of the control samples without waste were noticed. Leaching tests showed that heavy metals leaching from the samples prepared with sludge ash were much lower than the legal limit values for toxicity.

Conclusion:

The results of the experiments showed that sewage sludge ash, which is generated as a waste material at the end of the sludge incineration process, has the potential to be considered as a construction material when combined with other materials such as marble sludge and coal-fired power plant fly ash.



Atıksu arıtma çamurlarının yakılmasıyla oluşan küllerin yapı malzemesi olarak geri kazanımı

Berna Yiğit¹, Güray Salihoğlu^{1*}, Ali Mardani-Aghabaglou², Nezi Kamil Salihoğlu¹, Süleyman Özen³

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa, Türkiye

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa, Türkiye

³Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 16330, Bursa, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Çamur küllerinin çimento kullanılmadan yapı malzemesi haline getirilmesi
- Çamur küllerinin, mermer çamur ve uçucu kül ile birlikte jeopolimerizasyona elverişli olması
- Çamur külleri ile elde edilen yapı malzemelerinin ağır metal sızdırma sorunu oluşturmaması, tehlikeli özellik göstermemesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 26.03.2019

Kabul: 06.03.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.544678

Anahtar Kelimeler:

Stabilizasyon/Solidifikasyon,
Jeopolimerizasyon,
Basınç Dayanımı,
TCLP,
Eluat testi

ÖZET

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 çamur küllerine stabilizasyon/solidifikasyon (S/S) ve jeopolimerizasyon teknolojileri uygulanmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak Portland çimentosu, termik santral uçucu külü ve mermer çamuru kullanılmıştır. S/S örnekleri su, jeopolimer örnekleri 8MNaOH ve NaSiNaOH çözeltileriyle aktive edilmiştir. Hazırlanan pasta örnekleri 28 günlük hava kürrü sonunda basınç dayanımı ve ağır metal sızma testlerine tabi tutulmuştur. Çamur külü kullanılarak hazırlanan S/S örneklerinde 21,8 MPa, jeopolimer örneklerinde ise 50,0 MPa düzeylerine ulaşan basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Atık çamur külü içeren bazı örneklerin basınç dayanım düzeylerinin, atık içermeyen kontrol örneklerinin basınç dayanım düzeylerinden yüksek olması dikkat çekmiştir. Sızma testi sonucunda çamur külüyle hazırlanan örneklerin tehlike sınır değerlerinin oldukça altında kaldığı görülmüştür. Gerek sızma testi gerekse basınç dayanım testi sonuçları, çamur küllerinin, yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi gereken bir potansiyel vadedtiğini göstermektedir.

Recycling of sewage sludge incineration ashes as construction material

H I G H L I G H T S

- Production of construction material from sewage sludge ash without using cement
- The convenience of sewage sludge ash with marble sludge and fly ash for geopolymerization
- No heavy metal leaching problem with the sludge ash-originated construction materials, no hazardous characteristics of the products

Article Info

Research Article

Received: 26.03.2019

Accepted: 06.03.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.544678

Keywords:

Stabilization/solidification,
Geopolymerization,
Compressive Strength,
TCLP,
Eluate test

ABSTRACT

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. Stabilization/solidification (S/S) and geopolymerization technologies were applied to the sludge ash with this aim. Portland cement, fly ash from a coal-fired power plant, and marble sludge were used as binders. S/S samples were activated with water, while geopolymer samples were activated with 8MNaOH and NaSiNaOH solutions. The prepared paste samples were air-cured for 28 days and analyzed for compressive strength and heavy metals leaching. S/S samples containing sludge ash yielded a compressive strength level of 21.8 MPa, while geopolymer samples resulted in a compressive strength level of 50.0 MPa. Higher compressive strength levels of several samples containing waste sludge ash than that of the control samples without waste were noticed. Leaching tests showed that heavy metals leaching from the samples prepared with sludge ash were much lower than the legal limit values for toxicity. Both leaching tests and compressive strength tests showed that sludge ash has the potential to be considered as a construction material.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: yigitberna94@gmail.com, gurays@uludag.edu.tr, alimardani@uludag.edu.tr, nkamils@uludag.edu.tr, suleyman.ozen@btu.edu.tr / Tel: +90 224 294 2120
1648

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Atıksu arıtımında, arıtma tesisinin tasarımı kadar arıtma süreci sonunda oluşan çamurun yönetiminin planlanması da önem taşımaktadır. Arıtma çamurlarının yönetiminde arıtma çamuru hacmini önemli ölçüde azaltan yakma yöntemi oldukça yaygın bir şekilde tercih edilmektedir [1, 2]. Avrupa’da, özellikle endüstrileşmiş ülkelerde yakmanın hala en fazla tercih edilen yöntem olduğu [3], depolama ve araziye uygulama süreçlerindeki yasal kısıtlamalar nedeniyle yakmanın uzun vadede önemli bir rol oynamaya devam edeceği bilinmektedir [4]. Danimarka’da yakılan çamurun üretilen çamurun %24’ü düzeyinde, Fransa’da bu oranın %20, Belçika’da %15, Almanya’da %14, Amerika’da %25 ve Japonya’da %55 düzeyinde olduğu bilinmektedir [5]. Akışkan yataklı yakma fırınlarında katı madde içeriği %41-65 (KM) arasında değişen arıtma çamurları yakılabilmekte [6], %85 KM’ye varan kısmi dehidratasyon veya %85 KM üzerinde toplam dehidratasyon gerçekleştirilebilmektedir [7]. Yakma süreci sonunda, baca gazı kontrol süreçlerinde (elektrostatik çöktürücü, ıslak sıyırıcı, siklon, torba filtre vb.) tutulan ve hala yönetilmeyi bekleyen atık küller oluşmaktadır. Dünyada yaklaşık 1,7 milyon ton çamur külü olduğu ve bunun gelecekte artma eğiliminde olacağı tahmin edilmektedir [8]. Üretilen külün büyük bir çoğunluğunun depolandığı bilinse de külün geri kazanımına ve faydalı kullanımına yönelik seçeneklerin uygulanabileceğine dair araştırmalar devam etmektedir [8]. Bu uygulamalar arasında külün sinterlenmiş tuğlada, kiremitte, kaldırımda kil yerine kullanımı, hafif agrega üretiminde hammadde olarak kullanımı, yüksek yoğunluklu cam-seramik üretiminde kullanımı seçenekleri araştırılmaktadır [9, 10]. Uçucu kül, silis dumanı gibi bazı atık küllerin yapı malzemesi olarak gösterdiği davranışlardan hareketle [11, 12] bazı araştırmacılar, çimento harcı içerisinde çamur külü kullanımının uygulanabilirliğini araştırmış ve külün çimentoya ek bir malzeme olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir [13-15]. Brotons vd. [13], arıtma çamuru külü kullanarak harç ve pasta örnekleri hazırlamış, hazırlanan örneklerle basınç dayanımı düzeylerini araştırmıştır. Bu çalışmada arıtma çamuru külü %5-20 arasında değişen oranlarda çimentoyla ikame edilmiş ve referans örneklerle yakın basınç dayanımları elde edildiği belirtilmiştir [13]. Krejcirikova vd. [14], çamur külünü %10-30 oranlarında çimentoyla ikame ederek hazırladıkları harç örneklerde arıtma çamuru külünün miktarının artmasıyla basınç dayanımının azaldığını, külün öğütülmesiyle basınç dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir.

Bursa’da 2017 yılından beri 2 200 000 eşdeğer nüfusa hizmet eden Doğu ve Batı Atıksu Arıtma Tesisleri’nde oluşan kentsel arıtma çamurları yakma yöntemiyle bertaraf edilmektedir. 400 ton/gün kapasiteli akışkan yataklı yakma tesisinde %22-26 katı madde içeriğine sahip 260 ton/gün çamur yakılmakta ve ortalama 20,5 ton/gün (yaklaşık %8 oranında) arıtma çamuru külü oluşmaktadır. Tesisten oluşan kül şehrin düzenli depolama sahasında depolanmaktadır.

Ancak külün sınırlı depolama kapasitesine sahip sahalarda depolanması sürdürülebilir bir yöntem değildir. Bu nedenle külün sürdürülebilir bir strateji ile yönetilmesi ve farklı alanlarda geri kazanılması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında Bursa’da üretilen arıtma çamuru küllerinin yapı malzemesi olarak geri kazanım potansiyeli stabilizasyon/solidifikasyon (S/S) ve jeopolimerizasyon teknolojilerini uygulayarak araştırılmıştır. Dünyadaki çamur küllerinin çimento pastası içinde davranışı konusunda literatürde benzer bazı çalışmalar bulunsa da çamur külleriyle yapılan jeopolimerizasyon çalışması çok sınırlı düzeydedir [16]. Yapılan çalışmalar, arıtma çamurlarının ve çamur küllerinin gerek kimyasal kompozisyon gerekse incelik yönünden birbirinden farklı olabileceğini [2, 17], bu nedenle her çamur külünün geri kazanım yöntemine farklı yanıt verebileceğini göstermektedir. Bu çalışma, Bursa’da üretilen çamur küllerinin S/S ve jeopolimerizasyon yöntemleriyle geri kazanımı üzerine yapılan ilk çalışma niteliğini taşımaktadır.

S/S prosesi genellikle atıkların, çimento, kireç, uçucu kül vb. bağlayıcılarla muamele edilmesiyle yüksek yapısal yoğunluğa sahip katı malzeme elde edilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda atıkların tehlikeli bileşenlerinin daha az çözünebilir ve daha az tehlikeli forma dönüşümünü sağlamaktadır [18]. S/S prosesi ile atık içinde bulunan kirleticiler katılaştırılmış materyalde sabitlenerek kararlı hale getirilmektedir [18]. Jeopolimerizasyon ise çimento kullanarak veya kullanılmayarak macun, harç ve beton üretiminin bir başka yöntemini sunmakta, bu şekilde atık yönetiminde yer bulmaktadır. Bu yöntemde amorf formda silikon ve alüminyum içeren uçucu kül veya endüstriyel atık kullanılarak yapı malzemeleri üretilmektedir [19]. Jeopolimerler alümino-silika-oksitlerin alkali polisilikatlarla polimerizasyonu ve Si-O-Al bağlarının oluşumuyla ortaya çıkmaktadır [20].

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHODS)

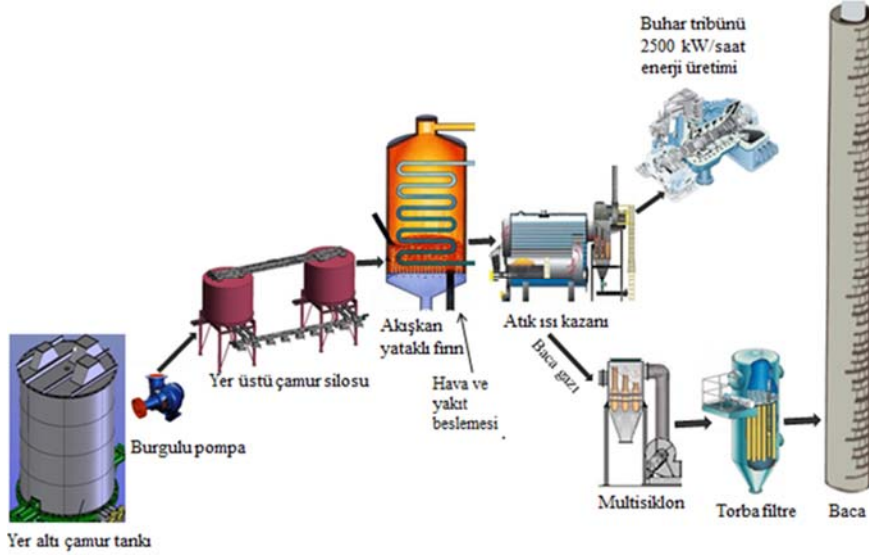
2.1. Çamur Yakma Tesisi ve Kül Oluşumu (Sludge Incineration Plant and Ash Formation)

Deneysel çalışmada kullanılan arıtma çamuru külü, Bursa’da Bardenpho prosesine göre çalışan kentsel atıksu arıtma tesisinde oluşan çamurların yakıldığı akışkan yataklı yakma tesisinden alınmıştır. Tesisin genel görünümü Şekil 1’de verilmektedir.

Yakma tesisinde 2500 kW/sa’lik elektrik üretilmektedir. Yakma sürecinde oluşan baca gazı öncelikle çoklu-siklon ünitelerinden geçmekte, burada %75-85 oranında partikül madde giderimi sağlanmaktadır. Baca gazına daha sonra aktif karbon ve kireç dozlaması yapılarak olası ağır metal, dioksin ve furan giderimi amaçlanmaktadır. Son aşamada atık gaz, torba filtrelerle gelmekte, burada nihai partikül giderimi gerçekleştirilmektedir. Arındırılmış gaz 40 metre yüksekliğindeki bacadan atmosfere verilmektedir. Yakma ve baca gazı arıtım süreci akım şeması Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 1. Tesisin genel görünümü (General view of the incineration plant)



Şekil 2. Çamur külü örneğinin alındığı çamur yakma ve baca gazı arıtım süreci akım şeması
(Flow chart of sludge incineration plant and flue gas pollution control units, where the sludge ash obtained)

Bu çalışma kapsamında torba filtre çıkışından elde edilen kül kullanılmıştır.

2.2. Kullanılan Malzemeler (Materials Used)

Deneysel çalışmalarda atık çamur külünün stabilizasyonu/solidifikasyonu veya jeopolimerizasyonu için, çimento ve termik santral uçucu külü bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan CEM IV/B 32.5 N Puzolanik çimento Bursa Çimento AŞ'den, düşük kalsiyumlu F sınıfı uçucu kül (ASTM Standard C618-12a: ASTM, 2012) [21] Orhaneli Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Örneklerin mineralojik kompozisyonunu geliştirmek için ayrıca Bursa'daki bir mermer ocağından atık olarak çıkarılan mermer çamuru kullanılmıştır. Mermer çamuru kullanımdan önce 105°C'de 24 saat kurutulmuş ve öğütülmüştür. Mermer çamuru kullanımındaki temel amaç,

atığı bir başka atıkla yönetebilmek, karışımda daha fazla atık kullanarak ihtiyaç duyulan çimento oranını azaltmak, atığın faydalı özelliklerini ön plana çıkararak geri kazanımını desteklemektir. Mermer çamuru yönetilmediği takdirde toz kirliliğine neden olabilmekte, toprağın ve bitkilerin üzerinde birikerek ve alkaliniteyi artırarak verimi etkileyebilmektedir. Toprakta biriken mermer tozları üst toprak tabakasının porozitesini ve permeabilitesini azaltabilmekte, suyun drene olmasını etkileyebilmektedir [22]. Çeşitli araştırmacılar mermer çamurunun çimento üretiminde kullanılabilceğini [23], harç ve betonda kullanıldığında basınç dayanımı üzerinde olumlu etkilerinin olduğunu [24, 25], jeopolimerizasyonunun mümkün olduğunu [26] göstermişlerdir.

Jeopolimer örneklerinde aktivatör olarak NaSilNaOH (Nasil/NaOH, w/w:5) ve 8M NaOH çözeltileri

kullanılmıştır. S/S örneklerinde ise çimentonun hidratasyonu ve bağlayıcılarla reaksiyona girmesini sağlamak için su kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan bağlayıcı maddelerin kimyasal kompozisyonları Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Kullanılan bağlayıcı maddeleri kimyasal kompozisyonları (% w/w, kuru bazda)
(Chemical compositions of the binders used (% w/w in dry basis))

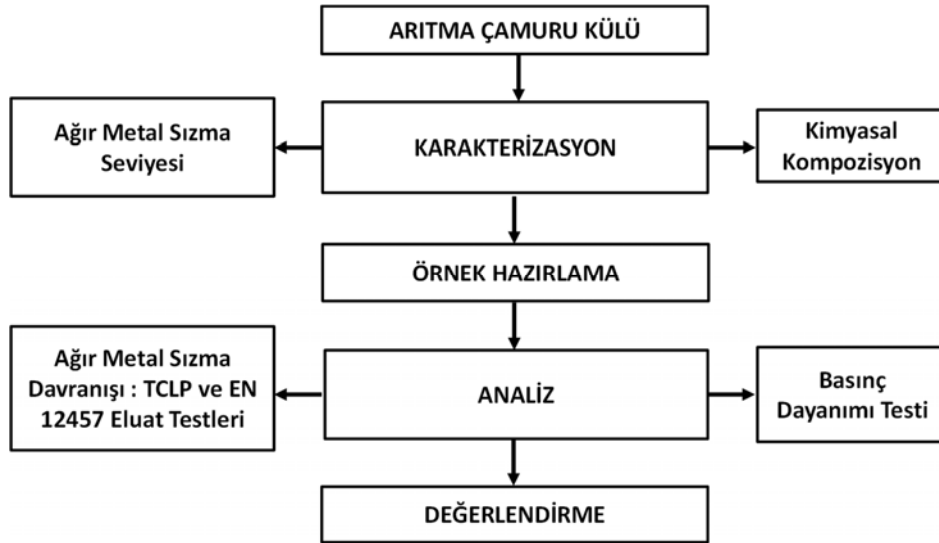
Bileşen	Birim	Çimento	Uçucu Kül	Mermer Çamuru
SiO ₂	%	33,75	54,99	0,70
Al ₂ O ₃	%	9,47	19,06	0,22
Fe ₂ O ₃	%	4,86	11,69	0,13
CaO	%	40,35	2,06	45,60
MgO	%	1,62	2,68	6,82
SO ₃	%	2,72	0,75	0,12
Na ₂ O	%	0,79	0,99	0,10
K ₂ O	%	1,22	2,13	0,03
Kızdırma kaybı	%	5,10	1,31	44,49
Cl	%	-	0,019	-
pH	-	-	10,3	9,5

2.3. Deneysel Yöntem (Experimental Method)

Deneysel çalışmalar önce karakterizasyon adımıyla başlatılmıştır. Kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonu x-ışını floresan spektroskopisi (XRF) (Thermoelectron-ARL 8660, İsviçre) ile, atık külün ağır metal özellikleri ise indüktif olarak eşleşmiş plazma - optik emisyon spektrometresi (ICP-OES 5100) ile ASTM (Standart C204-11: ASTM, 2011) [27] standartlarına göre yapılmıştır. Çalışmada izlenen yöntem Şekil 3’te verilmektedir. Arıtma çamuru külünün kristal fazlı mineralojisi, CuKα ($\lambda = 1.54059 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılarak yüksek çözünürlüklü bir toz X ışını difraktometresi (Bruker d8 discover) kullanılarak değerlendirilmiştir. Taramalar, 2 θ açısında, 0.02 aralıklarla 10-70° arasında yapılmıştır.

Arıtma çamuru külü, çimento, uçucu kül ve mermer çamuru kullanılarak pasta örnekler hazırlanmıştır. Agrega içermeyen pasta örnekler yardımıyla matris bileşenlerinin davranışları ve sistem üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Pasta örnekler yardımıyla kompozit çimento sistemlerinin mekanik, yapısal ve mikroyapısal özelliklerinin araştırıldığı çeşitli çalışmalara literatürde yer verilmiştir [13, 28, 29]. Jeopolimer örnekler için NaSiNaOH ve 8M NaOH alkali çözeltiler kullanılmıştır. Örnekleri hazırlamak için ilk olarak tüm kuru materyal 5 dk karıştırılmış, daha sonra aktivatör ya da su eklenip 5 dk daha karıştırılmıştır. Tüm numuneler için sıvı/katı oranı 0,4 olarak uygulanmıştır. Elde edilen pasta örnekleri 50 mm’lik metal küp kalıplarda 28 gün boyunca oda sıcaklığında (22-23°C’de) hava kürüne tabi tutulmuştur. Çimento içeren ve içermeyen kombinasyonlar hazırlanmıştır. Çimento içeren örneklerde toplam ağırlığın %30’u, içermeyen örneklerde toplam ağırlığın %20’si kadar arıtma çamuru külü kullanılmıştır. Kontrol örneği çimento ve su ile hazırlanmıştır. Örneklerin içeriği Tablo 2’de verilmektedir. Her karışım üç tekrarlı olarak hazırlanmış ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. 28 günlük kürlenmeden sonra örnekler göre serbest basınç dayanım testine (UCS) tabi tutulmuştur. Dayanım aktivite indeksi belirleme deneyi 7 ve 28 günlük standart su küründen sonra ASTM C 618-19 [21] standardına uygun olacak şekilde yapılmıştır.

Arıtma çamuru külünün tehlikelilik durumunu belirlemek için (depolanabilirlik açısından) Türkiye ve AB’de benimsenen sızma testi TS EN 12457 [30] ve Amerika’da benimsenen sızma testi EPA TCLP 1311 [31] uygulanmıştır. Atıkların veya atık içeren malzemelerin tehlikelilik özelliklerinin ve bu atıkları kabul edecek depolama alanının belirlenmesi için TS EN 12457 testinin yapılması yasal bir zorunluluktur [32]. 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



Şekil 3. Deneysel çalışmada izlenen yöntem (Flowchart for the experimental method)

Tablo 2. Hazırlanan S/S ve jeopolimer örneklerinin içerikleri (Content of the S/S and geopolymer samples prepared)

Örnek No	Örnek Adı*	Uçucu Kül %	Aritma Çamuru %	Külü	Mermer çamuru %	Çimento %	Aktivatör
1	UAMÇ+su	30	30		30	10	Su
2	AMÇ+su	-	30		30	40	Su
3	UMÇ+su	30	-		30	40	Su
4	MÇ+su	-	-		30	70	Su
5	UAÇ+su	30	30		-	40	Su
6	AÇ+su	-	30		-	70	Su
7	UÇ+su	30	-		-	70	Su
8	UAMÇ+NaSilNaOH NaSilNaOH	30	30		30	10	NaSilNaOH
9	AMÇ+NaSilNaOH	-	30		30	40	NaSilNaOH
10	UMÇ+NaSilNaOH	30	-		30	40	NaSilNaOH
11	MÇ+NaSilNaOH	-	-		30	70	NaSilNaOH
12	UAÇ+NaSilNaOH	30	30		-	40	NaSilNaOH
13	AÇ+NaSilNaOH	-	30		-	70	NaSilNaOH
14	UÇ+NaSilNaOH	30	-		-	70	NaSilNaOH
15	UAM+NaSilNaOH	40	20		40	-	NaSilNaOH
16	AM+NaSilNaOH	-	20		80	-	NaSilNaOH
17	UM+NaSilNaOH	50	-		50	-	NaSilNaOH
18	M+NaSilNaOH	-	-		100	-	NaSilNaOH
19	UA+NaSilNaOH	80	20		-	-	NaSilNaOH
20	A+NaSilNaOH	-	100		-	-	NaSilNaOH
21	U+NaSilNaOH	100	-		-	-	NaSilNaOH
22	UAM+8M NaOH	40	20		40	-	8M NaOH
23	AM+8M NaOH	-	20		80	-	8M NaOH
24	UM+8M NaOH	50	-		50	-	8M NaOH
25	M+8M NaOH	-	-		100	-	8M NaOH
26	UA+8M NaOH	80	20		-	-	8M NaOH
27	A+8M NaOH	-	100		-	-	8M NaOH
28	U+8M NaOH	100	-		-	-	8M NaOH

*U: uçucu kül, A: arıtma çamuru külü, M: mermer çamuru, Ç: çimento için kullanılmıştır. Örneğin UAÇ+su ifadesi, uçucu

yönünden analiz edilir. EPA TCLP 1311 testi de benzer amaçlarla Amerika'da uygulanan bir sızma testidir. Bu testte uygulanan çözgen 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 simüle 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 önemlidir. Çalışma kapsamında yapılan deneysel tasarım ve istatistik testler için Minitab 17 yazılımı kullanılmıştır. Minitab yazılımıyla oluşturulan pareto diyagramı ve ana etki grafiklerinde uçucu kül varlığı (yüksek seviye:%30, düşük seviye: %0), çamur külü varlığı (yüksek seviye:%30, düşük seviye: %0), mermer çamuru varlığı (yüksek seviye:%30, düşük seviye: %0) ve aktivatör varlığı (yüksek seviye: NaSilNaOH çözeltisinin kullanılması, düşük seviye: suyun kullanılması) faktörler olarak uygulanmış, yanıt parametresi olarak basınç dayanım değerleri uygulanmıştır. Veri girişi üç tekrarlı olarak yapılmış, güven aralığı %95 olarak alınmıştır.

1652

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Arıtma Çamuru Külünün Özellikleri (Sewage Sludge Ash Characteristics)

Arıtma çamuru küllerinin kimyasal kompozisyonu literatür değerleriyle karşılaştırılmalı olarak Tablo 3'te verilmektedir. Çamur külünün incelik (Blaine) değeri 8790 cm²/g ve pH düzeyi 12,1 olarak ölçülmüştür. 45µm, 90 µm ve 200 µm'lik bakiye değerleri sırasıyla %25,4, %11,4 ve % 2,2 olarak bulunmuştur.

Lynn vd. [35] 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 %29,71 düzeyindeki CaO içeriğinin Lynn vd. [35] tarafından %13,6 ±8,6 olarak belirtilen ortalama düzeyin oldukça üzerinde olduğu görülmüştür., Bunun yanında %21,82 olarak belirlenen SiO₂

düzeyi, Lynn vd. [35] tarafından $33,8 \pm 12,7$ olarak belirtilen ortalama düzeyin altında bulunmuştur. Al_2O_3 düzeyinin $7,89$ olarak belirlenmiş ve bu düzeyin de $14,4 \pm 6,5$ olarak rapor edilen [35] değerinkinden oldukça altında olduğu görülmüştür.

Çamur külü içindeki başlıca elementler olan Ca, Si, Al ve Fe elementlerinin kristal formları bir kalsiyum fosfat türü olan "whitlockite" ($Ca_3(PO_4)_2$), kuvars (SiO_2) ve hematit (Fe_2O_3) olarak karşımıza çıkmakta, alüminyum tipik olarak feldspar ve amorf camı fazlarda bulunmaktadır [36]. 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 [35]. 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 [8]. Lynn vd. [35] tarafından yapılan çalışmada çamur küllerinin amorf içeriğinin $35-75$ aralığında değiştiği, reaktif olduğu ve bir çimento sistemi bileşeni olarak potansiyel sunduğu belirtilmiştir.

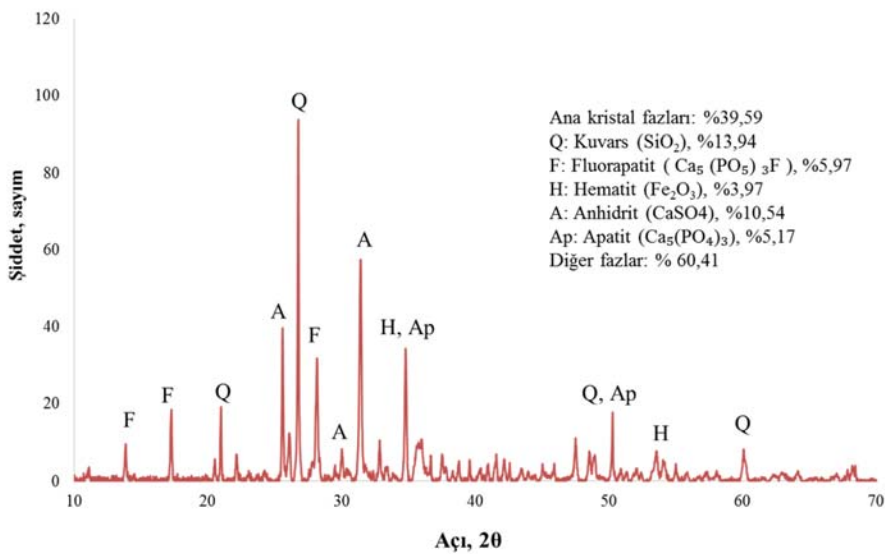
Şekil 4'te bu çalışmada kullanılan çamur külünün XRD analizi verilmektedir. Şekil 4 incelendiğinde çamur külündeki kristal yapının çoğunlukla kuvars (Q, SiO_2 : $13,94$), fluorapatit (F, $Ca_5(PO_4)_3F$: $5,97$), hematit (H, Fe_2O_3 : $3,97$), anhidrit (A, $CaSO_4$: $10,54$) ve apatit (Ap, $Ca_5(PO_4)_3$: $5,17$) olduğu görülmektedir. Amorf fazın yaklaşık $60,41$ düzeyinde olduğu bulunmuştur. Bu değer literatürde belirtilen değerlerle [34] uyumludur. Amorf fazın yüksekliği çamur külünün puzolan davranışına benzer bir davranış gösterebileceğine işaret etmektedir.

Tablo 3'te verilen literatür değerleri, kentsel arıtma çamurlarının $800-850^\circ C$ 'de akışkan yataklı fırınlarda [13, 14] ve $900^\circ C$ 'de pilot ölçekli bir yakma tesisinde yakılması [33] sonucu oluşan çamur küllerini temsil etmektedir. Tablo 3'te görüldüğü gibi Bursa'da üretilen çamur küllerinin içeriği literatürde verilen aralık içinde kalmaktadır.

ASTM C618 standardı [21] puzolanların değerlendirilmesinde uygulanabilecek yöntemleri açıklamaktadır [37]. Bu çalışmada üzerinde çalışılan çamur külü bu standarda göre değerlendirildiğinde, çamur külünün

Tablo 3. Çamur küllerinin kimyasal kompozisyonu (% w/w, kuru bazda)
(Chemical composition of sludge incineration ashes) (% w/w in dry basis)

Referans	Kimyasal Bileşen									
	SiO_2 , %	Al_2O_3 , %	Fe_2O_3 , %	CaO, %	MgO, %	SO_3 , %	Na_2O , %	K_2O , %	Cl, %	
Bu çalışma	21,82	7,89	5,28	29,71	4,97	6,33	1,20	2,77	0,15	
Brotos ve vd. [13]	17,27	9,64	8,52	30,24	3,22	8,95	0,94	1,28	0,15	
Krejcirikova vd. [14]	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	0,01-0,20	
Chen vd. [33]	43,60	16,60	10,40	5,61	1,40	0,24	0,82	2,34	-	
Chen vd. [34]	27,91	12,26	18,32	10,47	3,16	6,13	7,32	1,89	-	



Şekil 4. Çamur külünün XRD analizi (XRD Pattern of Sewage Sludge Ash)

bazı özellikler itibariyle puzolanlara benzerlik göstermekle beraber bazı yönleriyle bu sınıfın dışında kaldığı görülmektedir. CaO oranının yüksekliği, külün ASTM C618 standardına göre [21] C sınıfı uçucu kül kategorisine benzediğini göstermektedir. ASTM C618 standardına göre C ve F tipi uçucu küldeki SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ miktarlarının toplamının en az %50 olması gerekmektedir. Ancak çalışılan çamur külünde SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ miktarlarının toplamının %34,99 olduğu ve belirtilen düzeyin altında kaldığı görülmektedir. Ayrıca çimentoların uygunluk kriterlerini anlatan EN 197-1 standardında [38] silissi ve kalkersi uçucu kül için reaktif SiO₂ miktarının kütlece %25'ten az olmaması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan çamur külünün %21,82 düzeyindeki SiO₂ miktarı göz önünde bulundurulduğunda bu standardın koşullarını da yerine getirmedeği görülmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi çamur külü içindeki SiO₂'in %13,94'ü kristal fazda (kuvars) ve sadece %7,88'i amorf fazdadır.

Çalışmada kullanılan çamur külünün SO₃ miktarı Tablo 3'te görüldüğü gibi % 6,33'tür. EN 450-1 [39] ve ASTM C618'e göre [21] C ve F sınıfı uçucu küllerde SO₃ miktarının maksimum limiti %5'tir. Çamur külündeki SO₃ düzeyinin standartları sağlamadığı görülmektedir. Kül içindeki SO₃ varlığı zamanla sülfata (SO₄) dönme, "sülfat saldırısı" olarak bilinen reaksiyonun ortaya çıkmasına neden olmaktadır [40]. Sülfat saldırısı, bir başka ifadeyle sülfat iyonlarının çimento hidratasyon ürünleriyle reaksiyona girmesi sonucunda etrenjit, alçı ve tomasit gibi genleşme ürünlerinin oluştuğu bilinmektedir [40]. Sülfat saldırısı reaksiyonunun bu ürünleri, sertleşmiş betonda genleşmeye neden olarak betonda genleşme, çatlak oluşumu, geçirimsizliğin artması ve dayanım kaybı gibi hasarlara yol açmaktadır [41]. Bu nedenle çamur külündeki SO₃ varlığının sülfat saldırısı riskini beraberinde getirebileceği ve bu atığın beton içinde kullanılması durumunda sülfat dayanıklılığını artırmak için önlem alınması gerektiği unutulmamalıdır. Sülfat dayanıklılığını artırmak için sülfata dayanıklı çimento ile birlikte uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkıların kullanıldığı bilinmektedir [40]. Çamur külünün kompozisyonu çamurun kaynaklandığı atıksu arıtma teknolojilerinden, arıtma sürecinin etkinliğinden, atıksu toplama havzasındaki endüstriyel faaliyetlerden ve çamur susuzlaştırma ve yakma süreçlerinden etkilenmektedir. Kızdırma kaybı düzeyleri yanmamış karbonun bir göstergesi olarak genellikle ağırlıkça %3'ün altında bulunmaktadır [8]. Bu çalışmada kullanılan külün kızdırma kaybı %2,19 olarak belirlenmiştir. Çimento ve uçucu kül için belirlenmiş beton standartlarında [38, 39] kızdırma kaybının %5'i geçemeyeceği belirtilmiştir. Çamur külünün bu sınır değeri sağladığı görülmektedir.

Çamur külünde ölçülen dayanım aktivite indeksi değerleri Tablo 4'te verilmektedir. Dayanım aktivite indeksi değerleri, çimentonun %20 oranında katkı maddesiyle yer değiştirmesiyle oluşturulan harç örneklerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının, kontrol örneğinin basınç dayanımına göre kıyaslanması yoluyla elde edilmektedir. ASTM C618 standardındaki [21] değerleri sağlamak için 7 veya 28 günlük

basınç dayanımı düzeylerinin kontrol örneğinin basınç dayanımının en az %75'ine ulaşmış olması gerekmektedir. Çamur külünün 7 günlük dayanım aktivite indeksinin ASTM C618 standardını sağlamadığı ancak 28 günlük değerinin sözkonusu standardı sağladığı görülmektedir.

Tablo 4. Çamur külünün dayanım aktivite indeksi değerleri (Strength activity index levels of sludge incineration ash)

7 günlük, %	28 günlük, %
73,64	85,60

Ancak dayanım aktivite indeksi testinin puzolanik özelliği belirlemek konusunda yeterli olmayacağını belirten çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [37, 42]. Bunun sebeplerinden biri, bu teste çimentoyla katkının yer değiştirme miktarında katkıların yoğunluklarının dikkate alınmamış olmasıdır. Katkıların yoğunluklarının genelde çimentodan düşük olması örnekteki su hacmi fraksiyonunun azalmasına neden olmakta ve kontrol örneğiyle yapılan kıyaslamada yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir [42]. Bu yöntemle göre yüksek puzolanik aktivite gösteren katkıların beton içine girdiğinde ASTM C618 standardına uyum sağladıkları halde beton içinde yeterli bir performans gösteremeyebilecekleri bilinmektedir [37]. Çamur külünün ASTM C618'e göre puzolanik aktivite değerlendirmesi yapılmaya çalışıldığında en önemli iki kriterden biri olan SiO₂ + Fe₂O₃ + Al₂O₃'den oluşan kimyasal bileşenlerin toplamının en az %50 olma şartını sağlamadığı, bununla birlikte dayanım aktivite indeksi kriterini 28 günlük örnekte sağladığı görülmektedir. Reaktif SiO₂ miktarı ve içerdiği SO₃ miktarı bakımından da çamur külünün ilgili standartta belirtilen uçucu kül uygunluk kriterlerini sağlamadığı göze çarpmaktadır. Çamur küllerinin puzolanik aktivitesinin belirlenmesine yönelik bazı testlerde olumlu bazılarında olumsuz sonuç vermesi Donatello and Cheeseman [8] tarafından da belirtilmektedir. Araştırmacılar [8] çamur küllerinin puzolanik olmadığı ancak iyon değişimi mekanizmasıyla Ca⁺²(aq) iyonlarına güçlü bir afinitelerinin olduğu sonucuna varmışlardır.

Çamur külünün ağır metal içeriği ve yapı malzemesi olarak geri kazanılması durumunda tehlike sunup sunmayacağı sızma testleriyle araştırılmıştır. TS EN 12457 ve EPA TCLP 1311 standartlarında belirtilen ekstraksiyon ve analiz yöntemine göre elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmektedir. Analiz sonuçları Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik [32] Ek-2'de belirtilen evsel atık ve tehlikeli atık sınır değerleri ve EPA TCLP 1311 standardındaki toksisite sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır. Analizler 2 tekrarlı olarak yapılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Bursa'da üretilen arıtma çamuru külünün tehlikeli atık özellikleri taşımadığı görülmüştür.

3.2. Örneklerde Elde Edilen Basınç Dayanımı Düzeyleri (Compressive Strength Levels of the Samples)

Atık çamur külünün S/S ve jeopolimerizasyon yoluyla geri kazanımı sürecinde basınç dayanımını etkileyen unsurlar araştırılmıştır. Sürece etki eden faktörler ve etki

Tablo 5. Arıtma çamuru külünde ölçülen ağır metal düzeyleri ve yasal sınır değerlerle karşılaştırması
(Heavy metal levels in the sludge incinerator ash and comparison with legal limit values)

Parametre	Çamur Külü	TCLP 1311[43]	Sınır Değer (Evsel Atık Depolama) [32]	Sınır Değer (Tehlikeli Atık Depolama) [32]	Cihaz Deteksiyon Limiti
Gümüş (Ag), mg/L	<0.003	5	*	*	0.007
Alüminyum (Al), mg/L	0.051	*	*	*	0.04
Arsenik (As), mg/L	<0.012	5	0.2	2.5	0.05
Bor (B), mg/L	0.043	*	*	*	0.005
Kadmiyum (Cd), mg/L	<0.003	1	0.1	0.5	0.004
Toplam Krom (Cr), mg/L	1.380	*	1	7	0.007
Bakır (Cu), mg/L	0.004	*	5	10	0.006
Toplam Demir (Fe), mg/L	0.007	*	*	*	0.007
Mangan (Mn), mg/L	<0.005	*	*	*	0.002
Nikel (Ni), mg/L	<0.005	*	1	4	0.015
Kurşun (Pb), mg/L	<0.012	5	1	5	0.04
Antimon (Sb), mg/L	<0.012	*	0.07	0.5	0.03
Kalay (Sn), mg/L	<0.009	*	*	*	-
Çinko (Zn), mg/L	0.051	*	5	20	0.002
Selenyum (Se), mg/L	0.032	1	0.05	0.7	0.075
Toplam Fosfor (TP), mg/L	<0.012	*	*	*	-

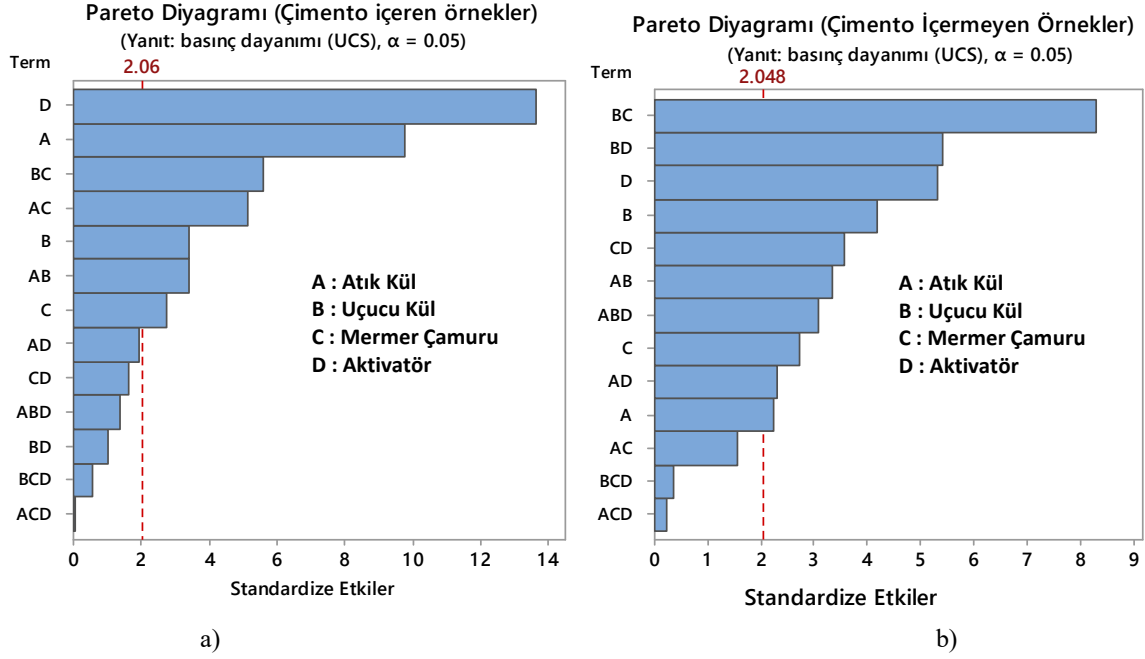
*Bu parametrelerle ilgili yasal sınır değer bulunmamaktadır.

büyükliklerini gösteren Pareto diyagramları Şekil 5'te, ana etkilerin yönü ise Şekil 6'da verilmektedir.

Şekil 5 a'da çimento kullanılarak hazırlanan pasta örneklerinde basınç dayanımını etkileyen en önemli faktörün kullanılan aktivatör olduğu görülmektedir. Bu örneklerde aktivatör olarak NaSiNaOH çözeltisi veya su kullanılmıştır. Aktivatör olarak NaSiNaOH çözeltisinin kullanıldığı jeopolimerizasyon örneklerinin su ile hazırlanan S/S örneklerine göre daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği görülmüştür. Fernández-Jiménez vd. [44] benzer şekilde 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 [44]. 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 [45]. 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 [44]. Partiküllerin koloidal boyutu Van der Waals kuvvetlerinin ortaya çıktığı düşündürmektedir [44]. Alkali sistemlerdeki boşlukların ortalama boyutunun çimento sistemlerindeki boşluklardan daha küçük olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmektedir [44]. Şekil 5a'da örneklerdeki katı maddenin %30'u düzeyindeki atık kül varlığının basınç dayanımını etkileyen ikinci faktör olduğu görülmektedir.

Atık çamur külü ile hazırlanan çimento S/S ve jeopolimer sistemleri üzerindeki faktörlerin etkilerinin ortalamaları arasındaki farklılıkları incelemek için ana etkiler grafiği oluşturulmuştur (Şekil 6). Bir faktörün farklı seviyeleri, sonucu farklı bir şekilde etkilediğinde ana etkiden söz etmek mümkündür. Şekil 6'da verilen ana etkiler grafiği her faktör seviyesinde elde edilen yanıtları çizgi şeklinde birleştirerek göstermektedir. Buna göre çizginin yatay olması (x eksenine paralel) durumu, ana etkinin olmadığını, yani uygulanan faktörlerin (atık kül, uçucu kül, mermer çamuru, aktivator) basınç dayanımı üzerindeki etkilerinin az olduğunu göstermektedir. Çizginin eğiminin 90 dereceye yaklaşması



Şekil 5. Örneklerde basınç dayanımını etkileyen faktörler için Pareto diyagramı: a) Çimento içeren örnekler, b) Çimento içermeyen örnekler

(Pareto charts for the factors affecting compressive strength of the samples: a) Samples prepared with cement, b) Samples prepared without cement)

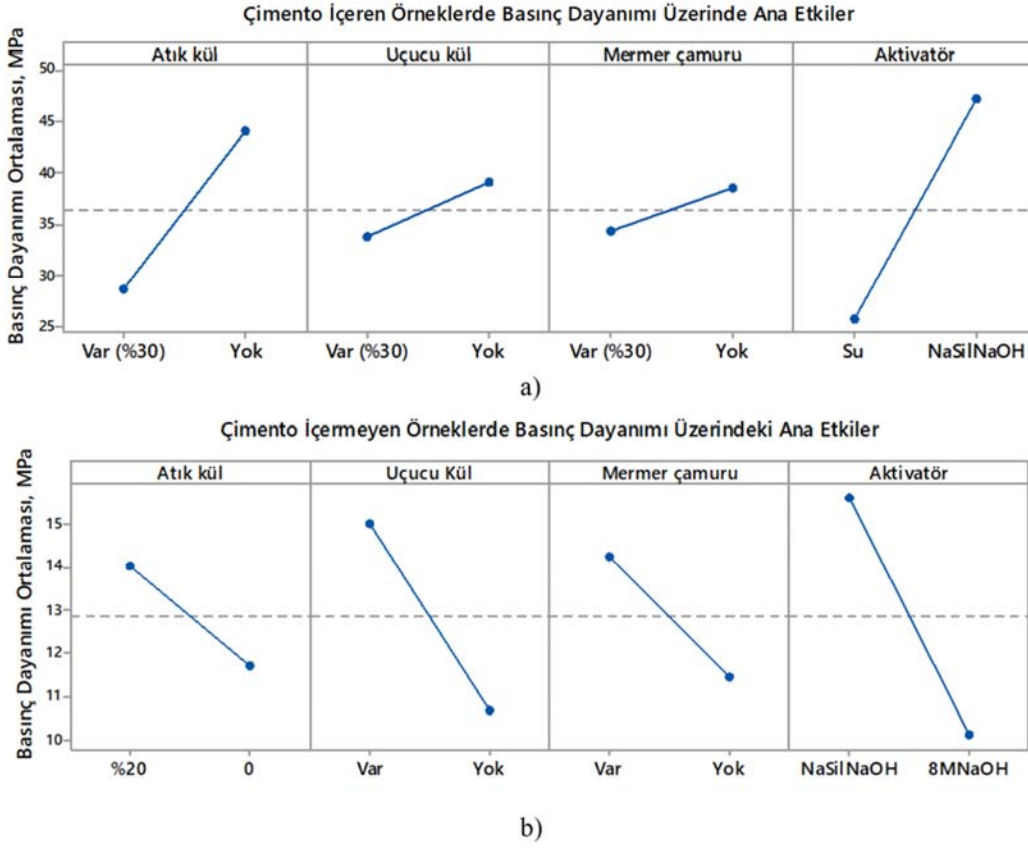
ise ana etkinin büyüklüğünü göstermektedir. Örneğin Şekil 6a'da aktivatör olarak su kullanıldığında ortalama basınç dayanımı 25 MPa iken, NaSiNaOH kullanıldığında basınç dayanımının 45 MPa'nın üstüne çıktığı görülmektedir. Bu şekilde eğrinin eğiminin diğerlerine göre daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir.

Şekil 6a'da atık kül varlığının basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Çimento içeren örneklerde uçucu kül ve mermer çamurunun çimento içeren örneklerdeki basınç dayanımını azalttığı yine Şekil 5a ve 6a'da görülmektedir. Şekil 5b'de uçucu kül ve mermer çamuru birlikteliğinin jeopolimer örneklerinde basınç dayanımını etkileyen en önemli faktör olduğu, Şekil 6'b'de ise bu faktörlerin basınç dayanımını artırdığı görülmektedir. Bu etkiyi uçucu kül ve aktivatör birlikteliği ve aktivatör tipi izlemektedir. Şekil 6b'de NaSiNaOH'ın aktivatör olarak kullanıldığı örneklerin, 8MNaOH kullanılan örneklerden daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği görülmektedir. Benzer şekilde Fernandez vd. [44] çalışmalarında NaSiNaOH çözeltisi ile hazırlanan örneklerde 8 M NaOH çözeltisine göre daha yüksek basınç dayanımı elde ettiklerini belirtmişlerdir. NaSiNaOH çözeltisi ile artan silikat iyonlarının basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde olumlu etkilerinin olduğunu belirtmişlerdir. Çimento içeren örneklerden farklı şekilde, çimento içermeyen jeopolimer örneklerinde atık çamur külünün %20 oranında uygulanmasının basınç dayanımını artırdığı göze çarpmaktadır. Çimento içeren örneklerde ölçülen 28 günlük basınç dayanım düzeyleri Şekil 7'de verilmektedir. Genel olarak jeopolimer örneklerinin basınç dayanım düzeylerinin (Şekil 7b), S/S örneklerinden (Şekil 7a) daha yüksek

düzeyde olduğu görülmektedir. S/S örnekleri içinde en yüksek basınç dayanımlarının sırasıyla mermer çamuru+çimento+su (MÇ+su) ve uçucu kül+çimento+su (UÇ+su) kombinasyonu ile elde edildiği görülmüştür. Jeopolimer örnekleri içinde en yüksek basınç dayanım değerleri, S/S örneklerine benzer şekilde mermer çamuru+çimento (M+aktivatör) ve uçucu kül+çimento (U+aktivatör) kombinasyonlarıyla elde edilmiştir. S/S örneklerinde en yüksek basınç dayanımı 44,9 MPa iken jeopolimer örneklerinde 58,6 MPa olmuştur.

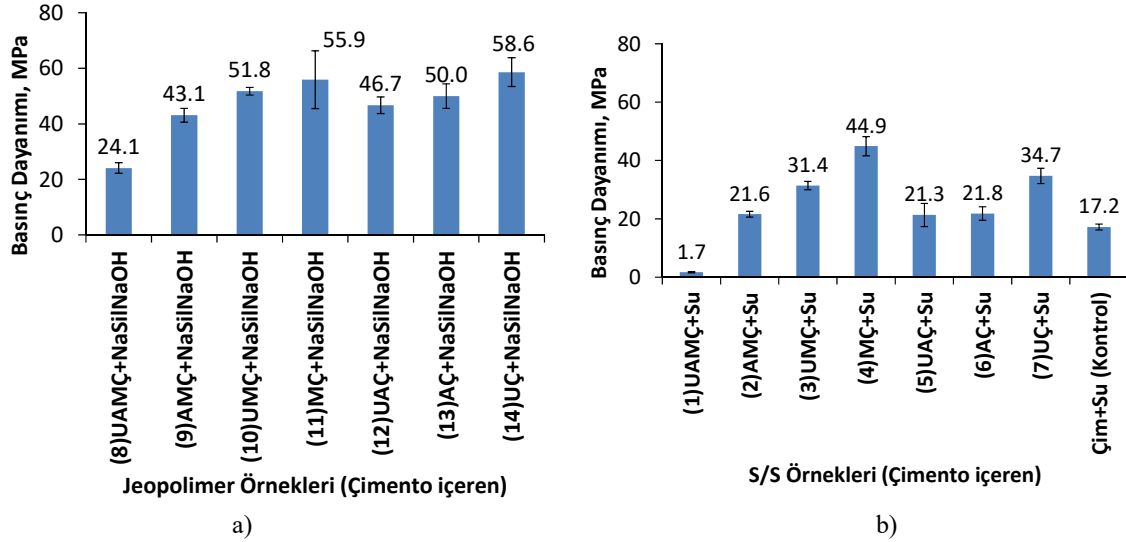
Aritma çamuru külü içeren S/S örneklerinde basınç dayanım düzeyleri 1,7-21,8 MPa aralığında değişirken (Şekil 7a), jeopolimer örneklerinde basınç dayanım düzeyleri 24,1-50,0 MPa aralığında değişmiştir (Şekil 7b). Aritma çamuru külü+çimento+aktivatör AÇ+NaSiNaOH kombinasyonunun çamur külü içeren örneklerde içinde en yüksek basınç dayanımını gösterdiği Şekil 7'de görülmektedir. Tüm örneklerin (UAMÇ kombinasyonu hariç) basınç dayanım düzeyinin atık içermeyen kontrol örneğinden (Ç+Su) yüksek olduğu göze çarpmaktadır. Aritma çamuru külü, mermer çamuru ve uçucu kül kombinasyonu ile hazırlanan S/S ve jeopolimer örneklerinde basınç dayanımının diğer örneklerden daha düşük olduğu görülmüştür.

Krejçirikova vd. [14], arıtma çamuru külünü çimentoyla %10 ikameli eklenerek hazırladığı harç örneğinde basınç dayanım düzeyini 48 MPa olarak ölçmüştür. Bu çalışmada %30 çimento ikameli olarak hazırlanan pasta örneğinde elde edilen 21,8 MPa değeri Krejçirikova vd. [14] tarafından rapor edilen değerden düşüktür. Bunun temel nedeninin bu



Şekil 6. Örneklerde basınç dayanımı üzerindeki ana etkilerin yönü: a) Çimento içeren örnekler, b) Çimento içermeyen örnekler

(Direction of the main factors affecting compressive strength of the samples: a) Samples prepared with cement, b) Samples prepared without cement)



Şekil 7. Çimento içeren örneklerde basınç dayanımı: a)S/S örnekleri, b)Jeopolimer örnekleri (U: Uçucu kül, A: arıtma çamuru külü, M: mermer çamuru, Ç: Çimento)

(Compressive strength of the samples prepared with cement) (U: fly ash, A: sewage sludge ash, M: marble sludge, Ç: Cement)

çalışmadaki çamur külü oranının yüksekliği ve örneklerde ince agreganın kullanılmamış olması olduğu düşünülmektedir. Brotons vd. [13], çimentoya %10 oranında

arıtma çamuru külü ekleyerek pasta örnekleri hazırlamış ve en yüksek basınç dayanımını 14,4 MPa olarak ölçmüştür. Araştırmacıların elde ettiği değer bu çalışmada elde edilen

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

Bu çalışmadaki bulgulara benzer şekilde, Chen vd. [34] 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 vd. [34] basınç dayanımının bu şekilde gelişimini çamur külünün puzolanik aktivitesine dayandırmışlardır. Farklı mineral katkıların çimento sistemleri üzerindeki etkisi, puzolanik aktiviteleri ve su adsorpsiyon özellikleriyle ilişkilidir [15, 46, 47]. Araştırmacılar [15, 34] çamur külü ile hazırladıkları örneklerin çamur külü içermeyenlerle kıyaslandığında su adsorpsiyon oranlarının yüksek olduğunu, bunun da basınç dayanımını etkilediğini belirtmişlerdir. Li vd. [15] çamur külü ile hazırladıkları örneklerde yayılma tablası değerlerinin diğer örneklerle 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 adsorpladığı, bunun kuruma büzülmesini artırdığı ve basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir. Yüzey alanı yüksek olan çamur külü adsorpladığı yüksek miktarda suyu kuruma esnasında bıraktığında diğer örneklerde görüldüğü gibi daha yüksek düzeyde bir kuruma büzülmesi gerçekleşmektedir.

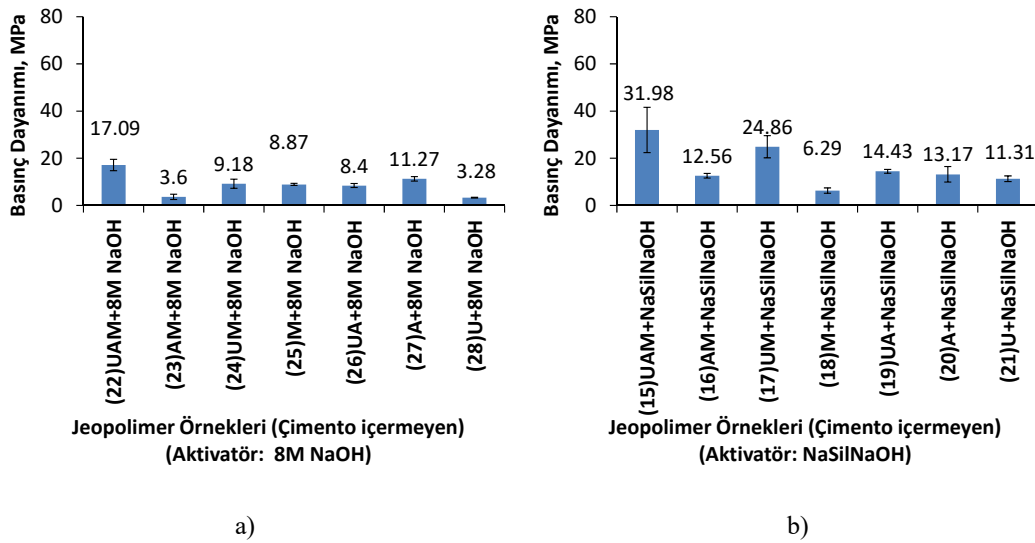
Çimento içeren S/S ve jeopolimer örnekleri incelendiğinde arıtma çamuru külü ile birlikte kullanılan uçucu külün basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Davidovits [20], uçucu külü çoğunlukla amorf silika ve alüminadan oluşması nedeniyle jeopolimerizasyon için uygun bir atık madde olduğunu rapor etmiştir. Bu görüş, bu

çalışmadaki jeopolimer örneklerinde uçucu külün basınç dayanımını artırdığı sonucunu desteklemektedir.

Çalışmada çimentonun kullanımını minimuma indirebilmek için çimento içermeyen örnekler de hazırlanmış ve basınç dayanımı testine tabii tutulmuştur. Çimentosuz örneklerde %20 oranında arıtma çamuru külü kullanılmıştır. Çimento içermeyen jeopolimer örneklerinde aktivatör olarak NaSiI/NaOH ve 8M NaOH çözeltileri kullanılmıştır; elde edilen 28 günlük basınç dayanımı düzeyleri Şekil 8'de verilmektedir.

Şekil 8'de görüldüğü gibi çimento içermeyen örnekler içerisinde en yüksek basınç dayanımı 31.98 MPa UAM + NaSiI/NaOH kombinasyonundan elde edilmiştir. Çimento içeren örneklerde bu kombinasyon en düşük basınç dayanımını verirken (Şekil 7b), çimento içermeyen örneklerde en yüksek basınç dayanımını vermektedir. Aktivatör olarak NaSiI/NaOH kullanılmasının 8M NaOH kullanılmasından daha yüksek basınç dayanımıyla sonuçlandığı görülmüştür.

Şekil 7 ve Şekil 8 karşılaştırıldığında, çimentonun kullanımının tamamen kaldırılması durumunda basınç dayanımında azalma görülmüştür. Dassekpo vd. [48], uçucu kül ve tamamen ayrılmış granit kullanarak hazırladığı jeopolimer pasta örneklerinde 18,42 MPa düzeyinde basınç dayanımı elde etmiştir. Bu çalışmada elde edilen yüksek basınç dayanımında uçucu külün yanında çamur külü ve mermer çamuru kullanımının jeopolimerizasyona olumlu etkisi olduğunu düşünülmektedir. 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 kullanılması basınç dayanımında artış sağlamıştır.



Şekil 8. Çimento içermeyen jeopolimer örneklerinde basınç dayanımı: a)NaSiI/NaOH ile hazırlanan örnekler, b) 8M NaOH ile hazırlanan örnekler (U: Uçucu kül, A: arıtma çamuru külü, M: mermer çamuru)
(Compressive strength of the cement-free geopolymer samples) (U: fly ash, A: sewage sludge ash, M: marble sludge.)

Hazırlanan kuru karışımlarda elde edilen kimyasal kompozisyon çimento içeren ve içermeyen örnekler için sırasıyla Tablo 6 ve Tablo 7’de verilmektedir.

Çimento içeren örneklerin kuru karışımlarındaki Si/Al oranının basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Örneğin aktivasyon çözeltisi NaSilNaOH olduğunda, Si/Al oranı ile basınç dayanımı arasındaki korelasyon katsayısı r’nin 0,73, su ile aktivasyon sağlandığında korelasyon katsayısı r’nin 0,81 düzeyinde güçlü bir korelasyona işaret ettiği görülmüştür. Bu örneklerde Si/Al oranı arttıkça basınç dayanımı artmıştır. Aktivatör çözeltisi olarak NaSilNaOH’ın kullanılmasının da sistemdeki Si/Al oranını artırdığı ve bunun basınç dayanımı olumlu yönde etkilemiş olabileceği düşünülmektedir. Örneklerdeki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriğinin basınç dayanımı ile önemli düzeyde bir korelasyon ilişkisi bulunmadığı görülmüştür. Bunun yanında sistemdeki CaO varlığının basınç dayanımı ile zayıf bir korelasyon ilişkisi bulunduğu

göze çarpmıştır. Aktivasyon çözeltisi NaSilNaOH olduğunda, CaO oranı ile basınç dayanımı arasındaki korelasyon katsayısı r’nin 0,33, su ile aktivasyon sağlandığında korelasyon katsayısı r’nin 0,48 düzeyinde zayıf-orta şiddette bir korelasyona işaret ettiği görülmektedir. Su ile yapılan aktivasyonda sistemdeki SiO_2 içeriğinin basınç dayanımı üzerinde (r = 0,74) NaSilNaOH aktivasyonunda elde edilen SiO_2 etkisinden (r = 0,37) daha yüksek olduğu görülmüştür. MgO içeriğinin basınç dayanımı üzerinde olumsuz yönde etkisinin olduğu görülmüştür; NaSilNaOH aktivasyonu için r= -0,80, su aktivasyonu için r= -0,58 düzeyinde bulunmuştur. MgO’ün, çimentoda hacim sabitliğini bozan maddelerden olduğu bilinmektedir [49].

Çimento içermeyen örneklerde (Tablo 6) basınç dayanımıyla önemli derecede korele olan herhangi bir faktöre rastlanmamıştır. Çimento standardına [38] göre MgO oranının %5 üzerinde olmaması gerekmektedir. Tablo 7’de

Tablo 6. Çimento kullanılarak hazırlanan örneklerin kimyasal kompozisyonu
(Chemical composition of the samples prepared by using cement)

İçerik	Birim	UAMÇ	AMÇ	UMÇ	MÇ	UAÇ	AÇ	UÇ
SiO_2	%	26,63	20,26	30,21	23,84	36,54	30,17	40,12
Al_2O_3	%	9,10	6,22	9,57	6,70	11,87	9,00	12,35
Fe_2O_3	%	5,62	3,57	5,49	3,44	7,04	4,99	6,91
CaO	%	27,25	38,73	30,44	41,93	25,67	37,16	28,86
MgO	%	4,50	4,19	3,50	3,18	2,94	2,63	1,94
SO_3	%	2,43	3,02	1,35	1,94	3,21	3,80	2,13
Na_2O	%	0,77	0,71	0,64	0,58	0,97	0,91	0,85
K_2O	%	1,60	1,33	1,14	0,86	1,96	1,69	1,49
Oranlar ve UCS								
Si/Al		2,93	3,26	3,16	3,56	3,08	3,35	3,25
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	%	41,34	30,04	45,27	33,97	55,45	44,15	59,38
UCS (Aktivatör: NaSilNaOH)	MPa	24,1	43,1	51,75	55,9	46,7	50,01	58,6
UCS (Aktivatör: Su)	MPa	1,70	21,60	31,40	44,90	21,31	21,80	34,70

(U: Uçucu kül, A: arıtma çamuru külü, M: mermer çamuru, Ç: Çimento)

Tablo 7. Çimento kullanılmadan hazırlanan örneklerin kimyasal kompozisyonu
(Chemical composition of the samples prepared without using cement)

İçerik	Birim	UAM	AM	UM	M	UA	A	U
SiO_2	%	26,64	4,92	27,85	0,70	48,36	21,82	54,99
Al_2O_3	%	9,29	1,75	9,64	0,22	16,83	7,89	19,06
Fe_2O_3	%	5,78	1,16	5,91	0,13	10,41	5,28	11,69
CaO	%	25,01	42,42	23,83	45,60	7,59	29,71	2,06
MgO	%	4,79	6,45	4,75	6,82	3,14	4,97	2,68
SO_3	%	1,61	1,36	0,44	0,12	1,87	6,33	0,75
Na_2O	%	0,68	0,32	0,55	0,10	1,03	1,20	0,99
K_2O	%	1,42	0,58	1,08	0,03	2,26	2,77	2,13
Oranlar ve UCS								
Si/Al		2,87	2,81	2,89	3,18	2,87	2,77	2,89
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	%	41,71	7,84	43,40	1,05	75,59	34,99	85,74
UCS (Aktivatör: NaSilNaOH)	MPa	31,98	12,56	24,86	6,29	14,43	13,17	11,31
UCS (Aktivatör: 8M NaOH)	MPa	17,09	3,6	9,18	8,87	8,4	11,27	3,28

(U: Uçucu kül, A: arıtma çamuru külü, M: mermer çamuru, Ç: Çimento)

görüldüğü gibi çimento içermeyen örneklerden AM ve M karışımlarında %5'in üzerinde değerler elde edilmiştir. Tablo 6 ve Tablo 7'de verildiği gibi NaSi/NaOH ile aktive edilen örneklerin 8 M NaOH ile aktive edilen örneklerden daha yüksek bir basınç dayanımına ulaşması, NaSi/NaOH ile birlikte artan silikat miktarının basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu düşündürmektedir. Sistemdeki silikat miktarının artmasının Si-O-Si bağlarının miktarını artırması beklenmektedir; bu bağlar Si-O-Al ve Al-O-Al bağlarından daha güçlüdür [20]. Sistemdeki Si/Al oranı arttıkça jeopolimerin homojen mikroyapısı güçlenmektedir [20]. Ancak bu oranın daha fazla artmasının, reaksiyona girmeyen bileşen oranını artıracak ve sistemin dayanımını olumsuz etkileyebileceği de unutulmamalıdır [50]. Bazı araştırmalar [51, 52] kalsiyum ilavesinin jeopolimer yapısının mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkilerinin olduğunu göstermiştir. Reaksiyon sürecinde hem jeopolimer jelinin hem de kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) yapılarının oluştuğu düşünülmektedir [52-54]. Bu çalışmada uçucu kül ve çamur külünün yanında mermer çamurunun varlığı kalsiyum ilavesine dolayısıyla basınç dayanımının artmasına neden olmuştur; bu da sistemde jeopolimer ve C-S-H yapılarının birlikte bulunduğunu düşündürmektedir. Alkali hidroksil konsantrasyonunun yüksekliği jeopolimer içindeki C-S-H oluşumunun düzeyinde belirleyici olmaktadır. Düşük alkali hidroksil konsantrasyonunda reaksiyon C-S-H oluşumunu desteklemekte, Ca^{+2} çözünmesi artmaktadır. Aksi durumda jeopolimer oluşumu desteklenmektedir. Yüksek hidroksil konsantrasyonu, çözünür silikat ve alüminyum türlerinin jeopolimer jel oluşturmasını sağlayarak Ca^{+2} çözünmesini engellemektedir [54].

Chen vd. [32] çimento pastasına çamur külü ilave edildikten 90 gün sonra yeni bir kristal bileşik $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ (bruşit) ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Bir başka çalışmada çamur külü ilavesiyle amorf veya zayıf kristalli yapıda hidroksiapatit $Ca_5(PO_4)_3OH$ oluşumu görülmüştür (Chen-19. kaynak). Brushitin bir türevi olan hidroksiapatit bileşiğinin çamur külündeki amorf demir fosfatla çimento hidratasyonundan ortaya çıkan kalsiyum hidroksit arasındaki reaksiyondan kaynaklandığı belirtilmiştir [32]. Bu nedenle

bu çalışmada da bruşitin kür süresi içinde oluşmuş ve basınç dayanımının gelişimine katkı sağlamış olabileceği düşünülmektedir. Chen vd. [32] çamur külü ilave edilmiş örneklerde jeopolimerizasyon öncesinde ve sonrasında amorf fazların oluşumunu incelemiştir. Jeopolimerizasyon sonrasında da öncesinde olduğu gibi yüksek oranda amorf faz tespit etmiş, ancak amorf fazların kompozisyonunun değiştiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar [32] albit, losit ve manyetit miktarlarında çok küçük değişiklikler bulmuş ve bu minerallerin jeopolimerizasyona katılmadığı sonucunu çıkarmışlardır. Bunun yanında hematit ve kuvars içeriklerinin jeopolimerizasyon sürecinde azaldığını, çözünme yoluyla kristal fazların amorf ve yarı-kristal fazlara dönüşmüş olabileceğini belirtmişlerdir. Hematit kristallerinin amorf veya yarı kristal fazlara dönüşümü, çamur külünün içindeki demir iyonlarının jeopolimerizasyona dahil olmuş olabileceğini düşündürmektedir.

3.3. S/S ve Jeopolimer Örneklerinin Sızma Davranışları (Leaching Behavior of S/S and Geopolymer Samples)

Ağır metal düzeylerinin giriş örneklerinde sınır değerlerin altında ölçülmüş olmasına rağmen, S/S ve jeopolimerizasyon ortamının yüksek alkali ortamının bazı amfoterik metalleri sızdırmış olabileceği düşüncesiyle deneysel süreç sonunda elde edilen örneklerde ağır metal sızma düzeyleri tekrar incelenmiştir. EPA TCLP 1311 sızma testiyle yapılan analiz sonuçları Tablo 8'de, TS EN 12457 sızma testiyle yapılan analiz sonuçları Tablo 9'da verilmektedir. Tablo 8'de görüldüğü gibi örneklerin pH'ı 11,4-13,1 aralığında değişmektedir.

Tablo 8 ve Tablo 9'da görüldüğü gibi atık çamur külünün S/S ve jeopolimerizasyon yöntemleriyle muamele edilmesi sonucunda elde edilen örnekler gerek EPA TCLP 1311'e gerekse TS EN 12457'ye göre tehlikeli atık özelliği göstermemektedir. Bu şekilde elde edilen ürünlerin yapı malzemesi olarak kullanımı ağır metallerin sızması açısından bir sorun oluşturmayacaktır. Chen vd. [55] arıtma çamuru külünden Al, B, Ba, Co, Cr, Cu, Mo, Se, Sr, V, Zn,

Tablo 8. EPA TCLP 1311 yöntemine göre örneklerdeki sızma davranışı

(UK: Uçucu kül, AÇK: arıtma çamuru külü, MÇ: mermer çamuru, Çim: Çimento)

(Leaching behaviour of the samples according to the EPA TCLP 1311 test) (UK: fly ash, ACK: sewage sludge ash, MC: marble sludge, Cim: Cement)

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+UK+AKT	<0,010	0,203	<0,010	<0,010	0,051	13
Ç+AÇK+MÇ+AKT	<0,010	0,034	<0,010	<0,010	0,043	13
EPA TCLP 1311	5	5	1	5	1	

*U: uçucu kül, A: arıtma çamuru külü, M: mermer çamuru, Ç: çimento için kullanılmıştır. Örneğin UAÇ+su ifadesi, uçucu kül, arıtma çamuru külü ve çimentodan oluşan ve su ile hazırlanmış bir karışımı ifade etmektedir.

Tablo 9. TS EN 12457 yöntemine göre örneklerdeki sızma davranışı
(UK: Uçucu kül, AÇK: arıtma çamuru külü, MÇ: mermer çamuru, Çim: Çimento)

(Leaching behaviour of the samples according to the TS EN 12457 test) (UK: fly ash, ACK: sewage sludge ash, MC: marble sludge, Cim: Cement)

Örnek İçerikleri	As, (mg/L)	Cd, (mg/L)	Cr, (mg/L)	Cu, (mg/L)	Ni, (mg/L)	Pb, (mg/L)	Sb, (mg/L)	Zn, (mg/L)	Se, (mg/L)
Ç+AÇK+su	<0,015	<0,010	0,347	<0,010	<0,015	<0,010	0,077	<0,010	0,016
Ç+AÇK+MÇ+su	<0,015	<0,010	0,240	<0,010	<0,015	<0,010	0,054	0,029	<0,015
Ç+AÇK+UK+su	<0,015	<0,010	0,866	<0,010	<0,015	<0,010	0,064	0,018	<0,015
Ç+AÇK+MÇ+UK+su	<0,015	<0,010	0,592	<0,010	<0,015	<0,010	0,016	0,047	<0,015
Ç+AÇK+AKT	<0,015	<0,010	0,244	<0,010	<0,015	<0,010	0,131	0,023	0,017
Ç+AÇK+MÇ+AKT	1,269	<0,010	0,112	<0,010	<0,015	<0,010	0,129	0,024	0,094
Ç+AÇK+MÇ+AKT	0,231	<0,010	0,172	<0,010	<0,015	<0,010	0,418	0,049	0,021
Ç+AÇK+UK+AKT	0,096	<0,010	0,446	0,011	<0,015	<0,010	0,331	0,048	0,051
Sınır Değer (evsel atık depolama)	0,2	0,1	1	5	1	1	0,07	5	0,05
Sınır Değer (tehlikeli atık depolama)	2,5	0,5	7	10	4	5	0,5	20	0,7

*U: uçucu kül, A: arıtma çamuru külü, M: mermer çamuru, Ç: çimento için kullanılmıştır. Örneğin UAÇ+su ifadesi, uçucu kül, arıtma çamuru külü ve çimentodan oluşan ve su ile hazırlanmış bir karışımı ifade etmektedir.

elementlerinin sızma davranışını EN12457 yöntemiyle araştırmıştır. Mo ve Se elementleri dışındaki elementlerin sızma oranının yasal sınır değerlerin altında olduğu gözlenmiştir. Li vd. [15] 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.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada arıtma çamuru küllerinin yapı malzemesi olarak geri kazanım durumu araştırılmıştır. Bir atık olarak çıkan arıtma çamuru küllerinin başka bir atık türü olan mermer çamuru ve termik santral uçucu külüyle, çimento kullanmadan jeopolimer pastası haline getirilebileceği ve yaklaşık 32 MPa'lık bir dayanıma ulaşabileceği görülmüştür. Bu malzemenin amacına uygun olarak çeşitli ilave testler de yapıldıktan sonra yapı malzemesi olma potansiyeli bulunmaktadır. Çimento üretiminin, insan faaliyetinden kaynaklanan CO₂ emisyonuna en çok katkı sağlayan sektörlerden biri olduğu, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %5-7'sinin çimento fabrikalarından kaynaklandığı bilinmektedir [56]. İnşaat endüstrisinin bu çalışmada uygulanan atık çamur külü atık maddelere yer vermesi, sektörün karbon ayak izini azaltırken atık yönetimi için de alternatif bir çözüm adımı sunmuş olacaktır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çamur külünde görülen kristal yapıda çoğunlukla kuvars, fluorapatit, hematit, anhidrit ve apatit bulunduğu, amorf fazın yaklaşık % 60,41 düzeyinde olduğu bulunmuştur.

- Çamur külünün 28 günlük dayanım aktivite indekslerinin ASTM C618 standardını sağladığı, ancak SiO₂ + Fe₂O₃ + Al₂O₃'den oluşan kimyasal bileşenlerin toplamının söz konusu standarttaki en az %50 olma şartını sağlamadığı görülmüştür.
- Çamur külünün SO₃ düzeyinin ASTM C618 standardını sağlamadığı görülmüştür. Bu durumun betonda sülfat saldırısı riskini beraberinde getirebileceği ve bu atığın beton içinde kullanılması durumunda sülfat dayanıklılığını artırmak için önlem alınması gerektiği unutulmamalıdır.
- Çimento kullanılan S/S ve jeopolimer örneklerinde çimento kullanılmayan örneklere göre basınç dayanımının daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak çimentonun kullanılmadığı örneklerde de yapı malzemesi olarak belli alanlarda kullanılabilir malzemeler elde etmek mümkün olmuştur.
- Örneklerdeki arıtma çamuru külü miktarı arttıkça basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Ancak çamur külü, mermer çamuru ve uçucu kül gibi diğer atıklarla birlikte uygulandığında jeopolimer örneklerinin basınç dayanımını artırmak mümkün olmuştur.
- Tüm kombinasyonlarda jeopolimer örneklerinin S/S örneklerinden daha yüksek basınç dayanımı düzeylerine ulaştığı görülmüştür.
- Çamur külü içeren jeopolimer örneklerde en yüksek basınç dayanımı 50,0 MPa, S/S örneklerinde ise 21,8 olarak ölçülmüştür.
- Çimento içermeyen jeopolimer örneklerde ise en yüksek basınç dayanımı 32 MPa olarak ölçülmüştür.
- Çamur külü ile hazırlanan örneklerin işlenebilirliğinin zor olduğu gözlenmiştir. Literatürdeki bulgular da incelendiğinde çamur külünün su adsorpsiyon oranının yüksek olduğu, bunun kuruma büzülmesini artırdığı ve basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.
- Bu çalışmada çimento içeren örneklerin kuru karışımlarındaki Si/Al oranının basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.

- NaSiNaOH ile aktive edilen örneklerin 8 M NaOH ile aktive edilen örneklerden daha yüksek bir basınç dayanımına ulaşması, NaSiNaOH ile birlikte artan silikat miktarının basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu düşündürmektedir.
- Reaksiyon sürecinde hem jeopolimer jelinin hem de kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) yapılarının oluştuğu düşünülmektedir. Bu çalışmada uçucu kül ve çamur külünün yanında mermer çamurunun varlığı kalsiyum ilavesine, dolayısıyla basınç dayanımının artmasına neden olmuştur. Bu durum sistemde jeopolimer ve C-S-H yapılarının birlikte bulunduğunu düşündürmüştür. Arıtma çamuru külünün tehlikeli atık özellikleri göstermediği ve çamur külüyle elde edilen ürünlerin yapı malzemesi olarak kullanımının ağır metallerin sızması açısından bir sorun oluşturmayacağı belirlenmiştir.
- Bu çalışma kapsamında elde edilen ürünlerin basınç dayanımı ve sızma değerleri, çamur külünün yapı malzemesi olarak bir potansiyelinin bulunduğunu göstermektedir. Ancak çalışmanın agrega varlığında tekrarlanması ve kullanım alanına göre belirlenecek diğer deneylerle desteklenmesi gerekmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu makale kapsamında yürütülen lisansüstü tez çalışması TÜBİTAK BİDEB 2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı / 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Cieslik B.M., Namiesnik J., Konieczka P., Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods, *Journal of Cleaner Production*, 90, 1-15, 2015.
2. Kacprzak M., Neczaj E., Fijalkowski K., Grobelak A., Grosser A., Worwag M., Rorat A., Brattebo H., Almas A., Singh B.R., Sewage sludge disposal strategies for sustainable development, *Environmental Research*, 156, 39-46, 2017.
3. EC, European Commission Environmental, Economic and Social Impacts of the Use of Sewage Sludge on Land, Final Report, Part I <http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/part_i_report.pdf>. 2008.
4. Malerius O., Werther J., Modeling the adsorption of mercury in the flue gas of sewage sludge incineration, *Chemical Engineering Journal*, 96, 197-205, 2003.
5. Lundin M., Olofsson M., Pettersson G.J., Zetterlund H., Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options, *Resources Conservation and Recycling*, 41, 255-278, 2004.
6. Fytli D., Zabaniotou A., Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - A review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 12, 116-140, 2008.
7. Samolada M.C., Zabaniotou A.A., Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece, *Waste Management*, 34, 411-420, 2014.
8. Donatello S., Cheeseman C.R., Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review, *Waste Management*, 33, 2328-2340, 2013.
9. Lin K.L., Chiang K.Y., Lin D.F., Effect of heating temperature on the sintering characteristics of sewage sludge ash, *Journal of Hazardous Materials*, 128, 175-181, 2006.
10. Merino I., Arevalo L.F., Romero F., Preparation and characterization of ceramic products by thermal treatment of sewage sludge ashes mixed with different additives, *Waste Management*, 27, 1829-1844, 2007.
11. Mardani-Aghabaglou A., Yuksel C., Beglarigale A., Ramyar K., Improving the mechanical and durability performance of recycled concrete aggregate-bearing mortar mixtures by using binary and ternary cementitious systems, *Construction and Building Materials*, 196, 295-306, 2019.
12. Nematzadeh A., Geven E., Özen S., İlhan M., Mardani-Aghabaglou A., Effect of Different Permeability Reducing Admixture on Flow Ability Performance of Different Type of Mineral Admixture-Containing Mortar Mixtures, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 37, 625-640, 2019.
13. Brotons F.B., Garces P., Paya J., Saval J.M., Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. Application in concretes for the manufacture of blocks, *Journal of Cleaner Production*, 82, 112-124, 2014.
14. Krejcirikova B., Ottosena L.M., Kirkelunda G.M., Rodea C., Peuhkuri R., Characterization of sewage sludge ash and its effect on moisture physics of mortar, *Journal of Building Engineering*, 21, 396-403, 2019.
15. Li J.S., Guo M.Z., Xue Q., Poon C.S., Recycling of incinerated sewage sludge ash and cathode ray tube funnel glass in cement mortars, *Journal of Cleaner Production*, 152, 142-149, 2017.
16. Galiano Y.L., Pereira C.F., Vale J., Stabilization/solidification of a municipal solid waste incineration residue using fly ash-based geopolymers, *Journal of Hazardous Materials*, 185, 373-381, 2011.
17. Fijalkowski K., Rorat A., Grobelak A., Kacprzak M.J., The presence of contaminations in sewage sludge - The current situation, *Journal of Environmental Management*, 203, 1126-1136, 2017.
18. Barth E. F., An Overview of the History, Present Status, and Future-Direction of Solidification Stabilization Technologies for Hazardous-Waste Treatment, *Journal of Hazardous Materials*, 24, 103-109, 1990.
19. Van Jaarsveld J.G., Van Deventer J.S., The effect of metal contaminants on the formation and properties of waste-based geopolymers, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 29, 1189-1200, 1999.
20. Davidovits J., Geopolymers - Inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis* 37, 1633-1656, 1991.
21. ASTM standard C618-12a, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA., 2012.

22. Singh M., Choudhary K., Srivastava A., Sangwan K.S., Bhunia D., A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete, *Journal of Building Engineering*, 13, 87-95, 2017.
23. Aruntas H.Y., Guru M., Dayi M., Tekin I., Utilization of waste marble dust as an additive in cement production, *Materials & Design*, 31, 4039-4042, 2010.
24. Corinaldesi V., Moriconi G., Naik T.R., Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete, *Construction and Building Materials*, 24, 113-117, 2010.
25. Ergun A., Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 25, 806-812, 2011.
26. Salihoglu N.K., Salihoglu G., Marble Sludge Recycling by Using Geopolymerization Technology, *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 22(4), 04018019-1 – 04018019-7, 2018.
27. ASTM standard C204-11, 2011. Standard test methods for fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA., 2011.
28. Burciaga-Diaz O., Escalante-Garcia J.I., Comparative performance of alkali activated slag/metakaolin cement pastes exposed to high temperatures, *Cement & Concrete Composites*, 84, 157-166, 2017.
29. Yaseri S., Hajiaghaei G., Mohammadi F., Mandikhani M., Farokhzad R., The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste, *Construction and Building Materials*, 157, 534-545, 2017.
30. TS EN 12457-2, Atıkların nitelendirilmesi - Katıdan özütleme analizi- Granül katı atıkların ve çamurların katı özütlemesi için uygunluk deneyi, Türk Standardı, Kabul Tarihi: 28.01.2004, Yararlanılan Kaynak: EN 12457-2:2002, 29 p., 2004.
31. EPA, TCLP 1311, Toxicity Characteristics Leaching Procedure, Environmental Protection Agency, p. 35 p., 1992.
32. ADDDY, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, Resmi Gazete Tarihi: 26.03.2010 Resmi Gazete Sayısı: 27533, p. 27 s., 2010.
33. Chen C. H., Chiou I. J., Wang K. S., Sintering effect on cement bonded sewage sludge ash, *Cement & Concrete Composites*, 28, 26-32, 2006.
34. Chen Z., Li J.S., Poon C.S., Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks, *Journal of Cleaner Production*, 171, 1447-1459, 2018.
35. Lynn J., Dhir R.K., Ghataora G.S., West R.P., Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete, *Construction and Building Materials*, 98, 767-779, 2015.
36. Mahieux P.Y., Aubert J.E., Cyr M., Coutand M., Husson B., Quantitative mineralogical composition of complex mineral wastes - Contribution of the Rietveld method, *Waste Management*, 30, 378-388, 2010.
37. Pourkhorshidi A.R., Najimi M., Parhizkar T., Jafarpour F., Hillemeier B., Applicability of the standard specifications of ASTM C618 for evaluation of natural pozzolans, *Cement & Concrete Composites*, 32, 794-800, 2010.
38. EN197-1:2011, Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, European Standard 2011.
39. EN450-1:2012, Fly ash for concrete. Definition, specifications and conformity criteria, European Standard, 2012.
40. Mehta P.K., Monteiro P.J.M., *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, 3th ed. McGraw Hill, USA., 2010.
41. Xu H., Zhao Y. X., Cui L., Xu B., Sulphate attack resistance of high-performance concrete under compressive loading, *Journal of Zhejiang University-Science A*, 14, 459-468, 2013.
42. Kalina R.D., Al-Shmaisani S., Ferron R.D., Juenger M.C.G., False Positives in ASTM C618 Specifications for Natural Pozzolans, *ACI Materials Journal*, 116, 165-172, 2019.
43. EPA, United States Environmental Protection Agency, Standard Operating Procedure for TCLP Extraction 1311 and SPLP Extraction 1312, Revision 9, 2008.
44. Fernández-Jiménez A.M., Palomo A., Lopez-Hombrados C., Engineering Properties of Alkali-Activated Fly Ash Concrete, *ACI Materials Journal*, 103, 106-112, 2006.
45. Morsy M.S., Alsayed S.H., Al-Salloum Y., Almusallam T., 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, 2014.
46. Dorum A., Koçak Y., Yılmaz B., Uçar A., The effect of electrokinetic specification features to hydration development in fly ash blended cement, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (3), 449-457, 2010.
47. Yıldız K., Dorum A., Koçak Y., The investigation of the effect of mineralogical molecular electrokinetical and thermal compliance of pumice, zeolite and CEM 1 cement on high strength concrete, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (4), 867-879, 2010.
48. Dassekpo J.B.M., Zha X., Zhan J., Compressive strength performance of geopolymer paste derived from Completely Decomposed Granite (CDG) and partial fly ash replacement, *Construction and Building Materials*, 138, 195-203, 2017.
49. Dayi M., Aruntas H.Y., Cavus M., Simsek O., Investigation of usability of zeolite, fly ash and waste glass materials in portland composite cement production, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (3), 491-499, 2013.
50. ASTM standard C109/C109M-07, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). ASTM International, West Conshohocken, PA. 2007.

51. Duxson P., Fernandez-Jimenez A., Provis J.L., Lukey G.C., Palomo A., Van Deventer J.S.J., Geopolymer technology: the current state of the art, *Journal of Materials Science*, 42, 2917–2933, 2007.
52. Barbosa V.F.F., MacKenzie K.J.D.,Thaumaturgo C., Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers, *International Journal of Inorganic Materials*, 2, 309-317, 2000.
53. Granizo M.L., Alonso S., Blanco-Varela M.T., Palomo A., Alkaline activation of metakaolin: Effect of calcium hydroxide in the products of reaction, *Journal of the American Ceramic Society*, 85, 225-231, 2002.
54. Alonso S., Palomo A., Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide-metakaolin solid mixtures, *Cement and Concrete Research*, 31, 25-30, 2001.
55. Chen M.Z., Denise B., Mathieu G., Jacques M., Remy G., Environmental and technical assessments of the potential utilization of sewage sludge ashes (SSAs) as secondary raw materials in construction, *Waste Management*, 33, 1268-1275, 2013.
56. Benhelal E., Zahedi G., Shamsaei E., Bahadori A., Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry, *Journal of Cleaner Production*, 51, 142-161, 2013.