



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ATIK KÜLÜN GEOPOLİMER KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİNDE
KULLANIMI

TÜRKAN VURAL

Ağustos 2019

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ATIK KÜLÜN GEOPOLİMER KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİNDE
KULLANIMI

TÜRKAN VURAL

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR

Ağustos 2019

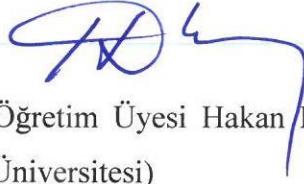
Türkan VURAL tarafından **Prof. Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR** danışmanlığında hazırlanan “**Atık Külün Geopolimer Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanımı**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Çevre Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Başkan :Prof. Dr. Ahmet BİLGİL (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)



Üye :Prof. Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)



Üye :Dr. Öğretim Üyesi Hakan DULKADİROĞLU (Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi)

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

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

Prof. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Türkan VURAL



ÖZET

ATIK KÜLÜN GEOPOLİMER KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİNDE KULLANIMI

VURAL, Türkan

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR

Ağustos 2019, 93 sayfa

Uçucu kül (UKÜ), termik santrallerin enerji üretmek için kullandıkları öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir atık/yan ürün olup, uygun kullanım ile üstün çevresel yeniden değerlendirme performansı elde edilebilmektedir. Bu yüksek lisans çalışmasında UKÜ, alternatif yeniden kullanım yöntemlerinden biri olan geopolimer kompozit malzemede bağlayıcı olarak kullanılmıştır. UKÜ, Zonguldak ve Adana'da faaliyet gösteren Çatalağzı ve İsken Sugözü Termik Santralleri'nden temin edilmiştir. Çalışmadaki UKÜ'lerde kimyasal kompozisyon analizi sonrası ön deneyler (elek analizi, sıkışık birim hacim ağırlığı) yapılmıştır. Geopolimer karışımında alkali aktivatörler olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Farklı karışım oranları ve kürleme sıcaklıklarında üretilen geopolimer kompozit malzemelerde ilgili ASTM ve TS-EN standartları kullanılarak fiziksel ve mekanik özellikleri ortaya koymak için (i) birim hacim ağırlığı (BHA), (ii) eğilme dayanımı (EDA), (iii) basınç dayanımı (BDA), (iv) su emme ve (v) porozite testleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen geopolimer kompozit malzemelerin en yüksek ve en düşük değerleri sırasıyla BHA 0,91 ve 2,15 g/cm³, su emme 8,31 ve 26,25, porozite 17 ve 38,43, EDA 0,5 ve 11 MPa ve BDA 2,2 ve 77 MPa olarak bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler: Atık, çevre, uçucu kül, yeniden kullanım, geopolimer kompozit malzeme

ABSTRACT

USING WASTE ASHES IN THE PRODUCTION OF GEOPOLYMER COMPOSITE MATERIAL

VURAL, TÜRKAN

Niğde Ömer Halisdemir University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering

Supervisor : Professor Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR

August 2019, 93 pages

Fly ash (FA) is a waste/by-product produced by the combustion of coal used by thermal power plants to generate energy. The best environmental reuse performance can be achieved by using it properly. In this thesis, FA was used as a binder in geopolymer composite material that is one of the alternative reuse methods. Geopolymer composite materials were produced from FAs supplied from Çatalağzı and İsken Sugözü Thermal Power Plants, located in Zonguldak and Adana (Turkey), respectively. Chemical composition of FA was analysed and preliminary experiments including sieve analysis and bulk density were performed on the FA. Sodium hydroxide and sodium silicate were used as alkali activators in the geopolymer mixture. In order to determine the physical-mechanical properties of geopolymer materials produced at different mixing ratios and curing temperatures, (i) bulk density, (ii) flexural strength, (iii) compressive strength, (iv) water absorption, and (v) porosity tests were performed. The highest and lowest values of the geopolymer composite materials produced from the Çatalağzı and İsken Sugözü Thermal Power Plant FAs were 0.91 and 2.15 g/cm³, 8.31 and 26.25, 17 and 38.43, 0.5 and 11 MPa and 2.2 and 77 MPa for bulk density, water absorption, porosity, flexural strength and compressive strength, respectively.

Keywords: Waste, environment, fly ash, reuse, geopolymer composite material

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans çalışmasında, termik santralde atık/yan ürün olarak ortaya çıkan uçucu külün geopolimer kompozit malzeme üretiminde dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmış ve temel fiziksel-mekanik testlerden birim hacim ağırlığı, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su emme ve porozite testleri uygulanarak performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Geopolimer kompozit malzeme üretilirken kimyasal aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Bu malzemelerde Na_2SiO_3 'ın kimyasal bağlayıcı olarak kullanılması tasarlanan numunelerin özelliklerine göre basınç dayanımını optimum orana kadar arttırmış, daha sonra silisin artmasına bağlı olarak basınç dayanımı azalmıştır. Diğer yandan NaOH'ın artmasına bağlı olarak malzemelerde basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir.

Bu yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında çalışmalarına yön veren, değerli bilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen ve tanıdığım günden bu yana hayatımın her anını değiştiren ve anlamlandıran değerli danışmanım Prof. Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam esnasında tecrübelerine başvurduğum Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr. Ahmet BİLGİL'e müteşekkir olduğumu ifade etmek isterim. Laboratuvar olanaklarını sundukları için Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü ve Merkezi Araştırma Merkezi'ne, birim desteği sunduğu için Çevre Mühendisliği Bölümü Başkanı Prof. Dr. Fehiman ÇİNER'e teşekkürlerimi sunarım.

Tezin ön denemelerinde beraber çalıştığımız İnşaat Yüksek Mühendisi Turan Şevki KÖKER, Çevre Mühendisleri Arife Gözde AKAN, Pervin NAS ve Betül DİKKAYA, ortak çalışmalar yaptığımız Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ ve Çevre Mühendisi Elif SÜZGEÇ'e teşekkürler ederim.

Avrupa Birliği (AB) FP7 kapsamında kabul alan 7 ülke katılımlı ELAC2015/T02-0721 nolu projenin Türkiye ortağı olarak “Development of Eco-friendly Composite Materials based on Geopolymer Matrix and Reinforced with Waste Fibers” başlıklı uluslararası projede Türkiye’yi temsil eden TÜBİTAK, projeyi 116Y549 numara ile “Geopolimer Matrikse Dayalı Atık Lifler ile Güçlendirilmiş evre Dostu Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi” başlıkla kayıtlarına almıştı. Bu yüksek lisans tezi, söz konusu projenin bir parçasıdır. Projenin Türk partneri Niğde Ömer Halisdemir niversitesi adına işlemleri yürüten Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine ve çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi koruyuculuğumu üstlenen babam Yusuf İzzettin VURAL’a, annem Ayşe VURAL’a ve hayattaki en büyük şanslarım olan kardeşlerim Enes Bahadır, şemsettin Cihan ve Asuman Gülben VURAL’a ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖN SÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	v
SİMGE VE KISALTMALAR	xi
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II GENEL BİLGİLER	3
2.1 Uçucu Kül	5
2.1.1 Uçucu küllerin özellikleri	5
2.1.1.1 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....	6
2.1.1.2 Uçucu küllerin kimyasal yapısı ve özellikleri.....	7
2.1.1.3 Uçucu küllerin mineralojik özellikleri	8
2.1.1.4 Uçucu küllerin pozolanik özellikleri.....	9
2.1.2 Uçucu küllerin sınıflandırılması	10
2.1.3 Uçucu küllerin kullanım alanları	12
2.1.3.1 Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanımı	12
2.1.3.2 Uçucu küllerin betonda kullanılması ve beton yapıları üzerindeki etkisi.....	13
2.1.3.3 Uçucu küllerin çimento katkı maddesi olarak kullanılması.....	15
2.1.3.4 Uçucu külün geoteknik alanda değerlendirilmesi.....	17
2.1.3.5 Boşluklu beton üretiminde uçucu külün kullanımı	17
2.2 Kompozit Malzeme.....	17
2.3 Geopolimer	18
2.3.1 Geopolimerlerin genel özellikleri	19
2.3.2 Geopolimerlerin sınıflandırılması.....	23
2.3.2.1 Camsuyu esaslı geopolimer	23
2.3.2.2 Kaolin hidrosodalit esaslı geopolimer	25

2.3.2.3 Metakaolin esaslı geopolimer	25
2.3.2.4 Kalsiyum esaslı geopolimer	26
2.3.2.5 Kayaç esaslı geopolimer	26
2.3.2.6 Silika-esaslı geopolimer	27
2.3.2.7 Fosfat esaslı geopolimer	28
2.3.2.8 Organik maden esaslı geopolimer.....	28
2.3.2.9 Uçucu kül bazlı geopolimer	29
2.3.3 Geopolimerlerin uygulama alanları	29
2.4 Literatür Özeti.....	30
BÖLÜM III MATERYAL VE METOT.....	34
3.1 Materyal	34
3.1.1 UKÜ test ve analizleri	34
3.1.1.1 UKÜ kimyasal analizi ve morfolojisi	34
3.1.1.2 UKÜ elek analizi ve yüzey alanı ölçümü	36
3.1.1.3 UKÜ'de yanabilir madde verim hesabı	38
3.1.1.4 UKÜ'de gevşek ve sıkışık BHA deneyi	38
3.1.2 Rilem Cemburea kumu	39
3.1.4 Su	40
3.2 Metot.....	40
3.2.1 Birim hacim ağırlığı.....	41
3.2.2 Eğilme dayanımı	41
3.2.3 Basınç dayanımı.....	42
3.2.4 Su emme	43
3.2.5 Porozite	44
BÖLÜM IV DENEYSEL ÇALIŞMA	46
4.1 Deney Materyallerinin Hazırlanması.....	46
4.2 Geopolimer Numune Üretimi	46
4.2.1 Kalıplara dökme.....	49
4.2.2 Kürleme	49
BÖLÜM V BULGULAR	51
BÖLÜM V SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	66
KAYNAKLAR	73
ÖZ GEÇMİŞ	91
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. UKÜ'nün geoteknik çalışmalarda kullanım alanları.....	17
Çizelge 3.1. UKÜ'lerin fiziksel ve kimyasal analizleri.....	34
Çizelge 3.2. Rilem Cembureau standart kumunun özellikleri	39
Çizelge 4.1. Rilem kum kullanılmadan geopolimer yapı malzemesi üretim parametreleri	48
Çizelge 4.2. Rilem kum kullanılarak geopolimer yapı malzemesi üretim parametreleri	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. ÇUKÜ (sol) ve İUKÜ (sağ) detaylı yüksek çözünürlüklü görüntüleri (SEM analizi)	36
Şekil 3.2. UKÜ'lerin granülometrik dağılımı.....	37
Şekil 5.1. ÇUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	52
Şekil 5.2. İUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin BHA grafiğı.....	52
Şekil 5.3. ÇUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	53
Şekil 5.4. İUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	53
Şekil 5.5. ÇUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	54
Şekil 5.6. İUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	55
Şekil 5.7. ÇUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	56
Şekil 5.8. İUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	56
Şekil 5.9. ÇUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	57
Şekil 5.10. İUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	58
Şekil 5.11. ÇUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	59
Şekil 5.12. İUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	59
Şekil 5.13. ÇUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	60
Şekil 5.14. İUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	61
Şekil 5.15. ÇUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	62
Şekil 5.16. İUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	62
Şekil 5.17. ÇUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	63
Şekil 5.18. İUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	64
Şekil 5.19. ÇUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	65
Şekil 5.20. İUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin	65

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 3.1. UKÜ'lerin kimyasal analizi için kullanılan XRF	35
Fotoğraf 3.2. UKÜ'nün morfolojisinin belirlenmesinde kullanılan SEM.....	36
Fotoğraf 3.3. Elek analizinin gerçekleştirildiği cihaz	37
Fotoğraf 3.4. UKÜ yüzey alanı ölçümünü yapan BET cihazı	38
Fotoğraf 3.4. Rilem Cembureau standart kum.....	39
Fotoğraf 3.5. Sodyum hidroksit (NaOH) (a) ve sodyum silikat (Na ₂ SiO ₃) (b)	40
Fotoğraf 3.6. Eğilme testi yapılışı.....	42
Fotoğraf 3.7. Basınç dayanımı testinin yapılışı	43
Fotoğraf 4.1. Masa tipi mikser.....	47
Fotoğraf 4.2. 4x4x16 cm boyutlarındaki kalıp (a) ve harç yerleştirilmiş kalıp (b).....	49
Fotoğraf 4.3. Kırılma sırasında kullanılan etüv.....	50
Fotoğraf 4.4. Tezde üretilen geopolimer kompozit malzemeler.....	50

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
σ_e	EDA (MPa)
Pr	Porozite (%)
γ_k	Numune BHA'ları (g/cm ³)
S_k	Ağırlıkça su emme yüzdesi (%),
G_{ds}	Archimedes terazisi ile numune kütlesi
G_d	Doymuş numune kütlesi
S_h	Hacimce su emme yüzdesi (%),
G_k	Kuru numune kütlesi
μm	Mikrometre
G_k	Numune hava kurusu ağırlığı
V_k	Numunelerin brüt hacmi
γ_s	Özgül ağırlık (g/cm ³)
σ_b	BDA (MPa)
A	Yüzey alanı
A	Yüzey alanı (mm ²)
b	Kalıbın iç yüksekliği (mm)
d	Kalıbın iç boyut uzunluğu (mm)
L	Rulman aralığı (mm)
°C	Santigrad derece
P	Kopma yükü (kN)
P	Kopma yükü (kN)

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BDA	Basınç Dayanımı
BHA	Birim Hacim Ağırlığı

EDA	Eğilme Dayanımı
IPCC	İklim Değişikliği Paneli
MK	Metakaolin
MTA	Maden Tetkik ve Arama
TS EN	Türk Standartları Avrupa Normu
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UKÜ	Uçucu Kül
YFC	Yüksek Fırın Cürufu



BÖLÜM I

GİRİŞ

Günümüzde insan yaşamının devamı için endüstride çeşitli üretimlerin yapılması zorunlu hale gelmiştir. Bilindiği gibi çevreye verilen zararın en büyük sorumlusu insandır; ancak çevrenin olumsuz etkilerinden de doğrudan insanlar zarar görmektedirler. Nüfusun artmasıyla ilintili olarak ülkelerin ekonomik açıdan gelişmeleri ve modern toplumun gereksinimleri doğrultusunda, enerjiye duyulan talep gün geçtikçe artarak farklı bir boyuta ulaşmıştır. Enerji üretmek adına yapılan birtakım faaliyetler Dünya'nın doğal dengesini bozarak çevreyi kirletmekte, gelecek için istenmeyen ve son derece kötü sonuçlara sebebiyet vermektedir (Akova, 2008; Doğan, 2011).

Endüstrileşmenin bir sonucu olarak insanlar enerji elde etmek amacıyla, termik santral işletmelerine yönelmişlerdir. Enerji ihtiyacının büyük çoğunluğunun karşılanması sırasında termik santrallerin rolü büyüktür; ancak bu durum çevresel etki bakımından olumsuz sonuçları beraberinde getirmiştir. Neticede dolaylı olarak, solunan hava kalitesinde düşme gözlenmekte, santral bacalarından çıkan katı partiküllerin toprak üzerinde birikmesi sonucu topraktaki besin ve mineraller olumsuz etkilenmekte, su ile etkileşime geçildiğinde yeraltı ve yerüstü su kaynaklarına ulaşip içme ve sulama sularına sızmakta, akarsular ile taşınarak deniz suyu kirlenmekte ve deniz canlıları olumsuz etkilenmektedir (Doğan, 2011).

Enerji tüketimindeki artış ve sanayinin gelişmesi sonucu çeşitli endüstriyel atık maddeler oluşmaktadır. Ortaya çıkan bu atık maddeler -toplumsal ve çevresel sorunlar olarak- katı atık sorununu da beraberinde getirmiştir. Bu durumda fosil kaynaklı enerjilerin rolü büyüktür. Toplum ve çevre açısından daha sağlıklı koşullara ulaşmak için fosil kaynakların yerine temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması daha faydalı olacaktır (Kaplan ve Gültekin, 2010). Ancak bu tip çevre dostu enerji kaynaklarının kullanımı yaygın değildir.

Günümüzde farklı tiplerdeki katı atıkların miktarındaki artışın yarattığı ciddi çevresel problemlerden dolayı en önemli sorunlardan biri katı atıkların yönetimi olmuştur. Kentlerin büyük bir çoğunluğu katı atık yönetiminde mevcut düzenlemelerin etkin

olmayışı, organizasyon, planlama ve atık dönüşüm konusu hakkında bilgi eksikliği ve finansal kısıtlamalardan dolayı sorunlar yaşanmaktadır (Yılmaz ve Bozkurt, 2010).

Termik santraller gibi endüstri kuruluşlarının elektrik enerjisi üretimi esnasında, toz halindeki kömürün yanması sonucu, baca gazları ile sürüklenen ve elektrostatik filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Endüstriyel bir atık olan ve uçabilen bu küllere uçucu kül (UKÜ) adı verilmektedir (Topçu ve Canbaz, 2001). Çevre sorunlarının en üst seviyede olduğu günümüzde çeşitli ürünlerin üretimi sırasında elde edilen yan ürün veya atıkların değerlendirilmesi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Sorun teşkil eden endüstriyel atıkların farklı proseslerde kullanılarak değerlendirilmesi, maliyetin düşürülmesi ve çevre sorunlarının da giderilmesine yardımcı olduğu için üzerinde durulması gereken konulardan birisidir. UKÜ'nün termik santrallerde yüksek oranda atık malzeme olarak açığa çıkması, bu malzemenin farklı kullanım alanı bularak uzaklaştırılması UKÜ'nün geri dönüşüm sorununa ve bertarafına çözüm aranması gerekliliği sonucunu da beraberinde getirmiştir (Topçu ve Canbaz, 2001).

Sanayide hammadde-proses-ürün üç ayağı söz konusudur ve çoğu endüstri kuruluşunda atık oluşumu kaçınılmaz bir sonuçtur (Doğan-Sağlamtimur vd., 2016). Çevre teknolojisi açısından atığın başka bir ürüne dönüştürülmesi, atık yönetim hiyerarşisi piramidinde “yeniden kullanım (reuse)” olarak adlandırılan bir dönüşüm sürecidir. Endüstriyel ekoloji kavramı içerisinde bu atıkların kullanım alanlarının geliştirilmesi gereklidir. Dünyada ve Türkiye’de endüstriyel/sektörel atıkların değerlendirilmesi durumunda sera gazı emisyonu azaltımı, daha ekonomik malzeme üretilmesi, atıkların yeniden kullanımıyla ülke ekonomisine katkı sağlanmasının yanı sıra hem doğal hammadde ile ekolojik dengenin korunması hem de çevre kirliliğinin önlenmesi mümkün görünmektedir. Atıkların ekonomi için bir kaynağa dönüştürülmesi ve hammadde olarak işleyiş bulması, hem Dünya’da hem de ülkemizde ilerleyen zamanlarda öncelikli bir politika hedefi olarak benimsenmiş, sürdürülebilir çevre ve kalkınma açısından bir gereklilik teşkil etmiştir (Chandra ve Berntsson, 2002).

BÖLÜM II

GENEL BİLGİLER

Küresel çapta enerji ihtiyacı, Bölüm 1’de belirtildiği gibi gün geçtikçe artmaktadır. İnsan yaşamının vazgeçilmez bir parçası olan enerji, gelişmiş birçok ülkede sanayileşmenin altyapısı haline gelmiştir. Enerji gereksinimi doğrultusunda, düşük maliyetli ve güvenilir kaynaklardan temin edilen enerji üretilmesi tercih edilmektedir. Bu durum beraberinde, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelere dış ülkelere olan bağımlılık ve sorumluluğun artmasına sebep olmuştur. Ülkemiz dışa bağılılığı azaltmak için kömür kullanarak enerji üretmenin geçerli bir çözüm yolu olduğu kanısına varmıştır. Bu konu ile ilgili yapılan araştırmalar, TEİAŞ'ın 2016 yılı verilerine göre Türkiye’de üretilen elektrikte kömürün %33 gibi önemli bir paya sahip olduğunu göstermiştir (URL 1, 2016).

Termik santrallerden üretilen enerji, ülkelerin kısa ve uzun vadeli enerji üretim stratejilerinin başında gelmektedir. Elektrik santrallerinde kömürün yanması sonucu atılan gaz halindeki yanma atıklarının dışında, baca gazlarıyla beraber yanmamış yakıt toz ve zerrelere, kül, kükürlü gazlar, ağır metaller vb. gibi yabancı maddeler de atmosfere bırakılır. Yakıtta bulunan mineral yabancı maddeler yakma tesisine göre cüruf ve kül olarak veya baca gazlarıyla birlikte sürüklenerek ortamdan uzaklaşırlar (Kaplan ve Gültekin, 2010).

Gelişmekte olan ülkelerin çoğunda -Türkiye başta olmak üzere- enerji arayışının beraberinde getirdiği sorunlardan birisi olan sera gazı emisyon istatistikleri yayınlanmıştır. Kişi başına düşen sera gazı emisyon değeri 6,6 ton CO₂ olarak belirtilirken, 2017 yılına ait sera gazı emisyon miktarının 526,3 milyon tona ulaştığı verilen bilgiler arasında yer almaktadır (URL 2, 2017).

Termik santrallerde -enerji elde etmek amacıyla kullanılan yakıtların katı veya sıvı olması halinde- atmosfere yoğun miktarda kükürt dioksit, azot oksitler, karbon monoksit, hidrokarbon, flor ve ayrıca UKÜ'lerin salınması, çevre ve bilhassa hava kirliliği açısından istenmeyen bir durum oluşturmaktadır. TÜİK'in 2012 yılında açıkladığı verilere göre, termik santrallerden çıkan atık maddelerin %65'e yakın miktarı

kül barajlarında depolanmaktadır; kalan %35'i ise rüzgar ile sürüklenerek toprağa, suya ve sonrasında insan vücuduna ulaşmaktadır (URL 3, 2013; URL 4, 2012).

Dünya genelinde özellikle elektrik enerjisi üretimi için geniş çapta kömür yakılması 1920 yılında başlayarak, milyonlarca ton UKÜ ve benzeri yan ürün sorunu ile başa çıkmayı gerektirmiştir. Günümüzde ABD, elektrik üretme kapasitesinin %52'sini kömürden sağlamaktadır ve Dünyada 2000 ile 2020 arasında kömür tüketiminin %36 arttığı belirlenmiştir (Haynes, 2009; Jala ve Goyal, 2006).

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) kömür verilerine göre hesap yapıldığında 1.832.000.000 ton kömür yakılması, 30 yılda toplam 50 milyon ton kükürt ortaya çıkmasına sebep olacaktır. Termik santrallerde kömür yakma işleminin ardından salınan sera gazına ek olarak, kireçtaşı parçalanmasından dolayı 30 yıl içinde atmosfere 68.750.000 ton CO₂ salınmaktadır. Yakıt olarak kömür kullanan termik santrallerden çıkan UKÜ'lerin hava, su ve toprağa verdikleri olumsuz etkilerin yanında insan sağlığı için de ciddi tehlike oluşturduğu uluslararası çalışmalarla ispatlanmıştır. Özellikle yakıt tercihini linyit veya taş kömüründen yana kullanan termik santrallerden yayılan UKÜ'lerin olumsuz etkileri, sadece santral çevresindeki ekosistemi ve insan popülasyonunu etkilemekle kalmamaktadırlar. 2013 yılında Beşinci Değerlendirme Raporu kapsamında yayınlanan Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) adı altında düzenlenen, İklim Değişikliğinin Fiziksel Bilim Temeli kapsamlı raporunda, özellikle termik santral kaynaklı UKÜ'lerin sebep olduğu hava kirliliği ve iklim değişikliğinin hızla artan fosil yakıt tüketimine bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. 2010 yılında, Türkiye'deki aktif haldeki 51 termik santralde, 18,75 milyon ton atık oluştuğu belirlenmiştir (URL 3, 2013).

Termik santrallerde katı fosil yakıt olan pulverize kömürün yanması sonucu oluşan UKÜ, baca gazları ile taşınarak atmosfere çıkışı önlenen, siklon veya elektrofiltrelerde tutulan %75-85 oranında çok ince kül parçacıklarıdır. UKÜ üretimini santral tipi, işletim biçimi, yakılan kömürün cinsi ve yanma biçimi gibi çeşitli faktörler etkilemekle birlikte genel olarak elektrik enerjisi üreten termik santrallerde kullanılan taşkömürünün %10-15'i, linyit kömürünün ise %20-50'si kül olarak ortaya çıkmaktadır. Türkiye'de yılda yaklaşık 45 milyon ton kömür yakılmakta ve ortalama 15 milyon ton UKÜ üretilmektedir (Kaplan ve Gültekin, 2010). Türkiye İstatistik Kurumu'na göre,

Türkiye’de termik santrallerde 2003, 2004, 2006 ve 2008 yıllarında sırayla 11,84, 13,34, 16,01 ve 19,66 milyon ton UKÜ açığa çıkmıştır; 2020 yılına kadar yıllık UKÜ miktarının 50 milyon tonu geçmesi beklenmektedir (Tütünlü ve Atalay, 2001; Kaplan ve Gültekin, 2010).

2.1 Uçucu Kül

Dünya’da ve Türkiye’de nüfusun artışına bağlı olarak şekillenen enerji ihtiyacı, kömür yakan termik santrallerin kurulmasını gerektirmiştir. Termik santrallerde kömürün yüksek sıcaklıklarda yakılması esnasında, baca gazları ile sürüklenirken mekanik filtrelerde tutulan, içi boş ya da dolu küreciklerden oluşan yan ürünler UKÜ olarak adlandırılan UKÜ, bir atık kül çeşididir. Kömür yakıldığı sırada tabana çöken, ağır boyutlu kül ise kazan altı külü olarak adlandırılmaktadır. Atık olan küllerden UKÜ %80-90, kazan altı külü ise %10 miktarında salınmaktadır (Ümit, 2007).

Dünya’da enerjiye olan talebin artmasına paralel olarak kömür tüketimi artmış ve dolaylı olarak UKÜ üretiminde yıllık 750 milyon ton kadar önemli bir artışa sebep olmuştur. Küresel olarak UKÜ’nün endüstriyel uygulamalarda kullanımının %25 olduğu tahmin edilmektedir (Wang, 2008). ABD’de ve Avrupa’da UKÜ kullanımı %39 ve %47 olarak seyretmektedir (URL 5, 2011; URL 6, 2011).

Türkiye’de büyük bir bölümünde bulunan taş kömür ve pulverize halde linyit yakıtlı termik santral sayısı 39’ dur (URL 7, 2017). TÜİK verilerine göre ülkemizde 2008 yılında 25,5 milyon ton mineral atık (kül, UKÜ, cüruf, alçı) üretilmiş ve bu atıkların %3’ü satılmış, %16’si madenlerde değerlendirilmiştir. Kalan %80’i ise atık olarak depolanmış ya da denize boşaltılmıştır (URL 8, 2008).

2.1.1 Uçucu küllerin özellikleri

UKÜ’nün özellikleri genel itibariyle kömürün özelliklerine, yakılma yöntemine, külün toplama şartlarına ve zamana bağlı olarak değişiklik gösterir. Yapısındaki silisli ve alüminyumlu bileşimi dolayısıyla puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı malzemesi olarak kullanılır. Taneciklerinin ince ve küresel formda olması dolayısı ile taze betonda işlenebilirliği ve dayanıklılığı artırır. Genellikle linyit kömürünün

yakılması ile elde edilen UKÜ'nün kireç oranının yüksek olması ve yapılarındaki amorf bileşenlerden dolayı çimento hidratasyonu sırasında UKÜ'nün reaksiyona girerek, ilave bağlayıcı jel oluşturmaya katkı sağlar ve bu özellik taze betonun bağlayıcılık özelliğini artırır (Türker vd., 2009).

2.1.1.1 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

UKÜ koyu gri renkte, çok ince taneli ve el ile temas edildiğinde yumuşaklık hissi veren endüstriyel yan ürün olan bir malzemedir. UKÜ'lerin rengi genellikle koyu gri renktedir. İyi ve verimli yanma sonucu oluşan UKÜ'lerin rengi diğer küllere nazaran daha açık renkte gözlenmiştir. Fakat yanmanın tam gerçekleşmediği durumlarda UKÜ'ye koyu rengi veren yanmamış karbondan tenecikleridir. UKÜ'nün renk aralığı ve fiziksel özellikleri, termik santralde yakıt olarak kullanılan kömürün yapısına, oranına ve yanma sistemine bağlı olarak değişmektedir. Linyit kömüründen elde edilen UKÜ'lerin daha koyu renkte olduğu gözlenmiştir (Atakay, 2006).

UKÜ'ler mikroskop altında incelendiğinde, kömürün öğütülme derecesine göre %60-90 camsı bileşen içeren çok ince taneli ve küresel şekilli yapılardan meydana geldiği görülmüştür (Üstün, 2006). UKÜ'nün partikül boyutları genellikle 0,5 ve 200 μm arasındadır. Termik santral UKÜ'lerinin tane boyu dağılımları zaman içinde kömür kaynağında, kömür öğütme yönteminde, termik santralin çalışma prensiplerinde büyük değişiklikler olmadığı sürece, sabit kabul edilebilir (Atakay, 2006). UKÜ'lerin tane boyutları termik santraldeki kül toplama yöntem ve ekipmanlarına bağlıdır. Siklonlarda toplanan küller, elektro filtrelerde toplananlardan daha iri tanelidirler (Koç, 1997; Türker vd., 2009; Üstün, 2006).

Taneciklerin yaklaşık %75'inin çapı 20-80 μm arasındadır (Gürbüz, 2009). Kömürün yapısına göre kıyaslandığında tane inceliğine göre taşkömürü UKÜ'leri linyit küllerinden daha incedir (Alkaya, 2009).

UKÜ'lerin özgül yüzeyleri ortalama değer olarak 1700-5000 cm^2/g arasında değişiklik gösterir. Bir termik santralde hammadde ve imalat şartları değişiklik göstermediği sürece o santralin külünün inceliği değişmez (Çil, 2003). UKÜ'ler çimentoya göre daha

ince olmakla birlikte, özgül yüzeylerinin daha büyük olduğu gözlenmiştir (Toros, 1987; Erşan, 1996; Alkaya 2009).

İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen UKÜ'lerin mutlak yoğunluğu $2,2-2,7 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır. UKÜ yoğunluk değerleri -külün inceliğine ve mineralojik yapısına bağlı olarak değişiklik gösterir (Güler vd., 2005). Ayrıca UKÜ'ler, doğal zeminlerle karşılaştırıldığında daha düşük özgül ağırlık değerlerine sahip, silt boyutunda homojenliğinden sıkça bahsettiren malzemelerdir (Toros, 1987; Uysal, 1987; Erşan, 1996; Alkaya 2009).

2.1.1.2 Uçucu küllerin kimyasal yapısı ve özellikleri

UKÜ'ler kimyasal kompozisyon açısından incelendiğinde, içi boşluklu ve boşluksuz camsı küreciklerden, gözenekli mineral parçacıklardan ve yanmamış taneciklerden oluşurlar (Güler vd., 2005; Gürbüz 2009). UKÜ'lerin içerisinde çeşitli miktarlarda nüfus eden yanmamış karbon miktarı %17'yi bulmaktadır (Gray, 2002; Temuujin ve Riessen, 2009). UKÜ'lerin kimyasal yapısı kullanılan kömürün homojenliğine, elde edildiği jeolojik yapıya ve proses koşullarına (kömür hazırlama, yanma, toz toplama, desülfirizasyon gibi) bağlıdır (Türker vd., 2009).

UKÜ'lerin kimyasal yapılarında esas olarak bulunan elementler Si, Al, Ca ve S alümina silikatlardan oluşturmaktadır. UKÜ'nün yapısında bulunan uçucu oksitleri oluşturan As, Cd, Ga, Mo, Pb, Se ve Zn elementleri reaksiyona girme eğiliminde değildirler. Bu yüzden bu elementler UKÜ'lerin yüzeylerinde asılı halde bulunmaktadırlar (Güler vd., 2005; Gürbüz 2009).

UKÜ'de bulunan başlıca bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup, diğerleri SO_3 , MgO ve alkali oksitler olarak sıralanır. Bu temel oksitlerin oranı UKÜ'nün silis veya kireçsi formda bulunmasına göre artış ve azalış yönünde etki etmektedir. Ayrıca UKÜ'nün yapısında yanmamış karbon, titanyum, molib, berilyum, mangan ve fosfor bileşenlerine de az miktarda rastlanmaktadır (ACI, 1987; Hewlett, 1998, Türker vd., 2009). Temel oksitler olan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO bileşenlerinin miktarları, SiO_2 %25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO %1-40 değerleri arasındadır (Hewlett, 1998; Söylemez ve Yıldırım, 2016).

UKÜ'ler suda çözünürlük bakımından incelendiğinde içinde bulundurduğu SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , MgO , Na_2O ve Fe_2O_3 bileşenlerinin suda çok az çözündüğü gözlenmiştir. UKÜ'ler saf su içerisine bırakıldıklarında birkaç saat içinde içlerindeki sülfatın tamamının çözünmesiyle %2-3 oranında çözünmektedirler. UKÜ'lerin sudaki çözünürlüğü sıcaklık artışı ve UKÜ çözeltisindeki kalsiyum ve sülfat bileşenlerinin etkisiyle artar (Toros, 1987; Alkaya 2009).

Kömürün çeşitliliğine göre, antrasitten elde edilen UKÜ'lerin silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) bakımından oldukça zengin olduğu gözlenirken, linyitten elde edilen UKÜ'lerde genellikle bu üç oksitin yanı sıra kireç (CaO) ve kükürt trioksit (SO_3) yüksek miktarda bulunabilir (Tokyay, 2014)

UKÜ'lerin içeriğinde az miktarda bulunan oksitler olan MgO en fazla %5, alkali oksitler olan Na_2O ve K_2O %5'in altında bulunmaktadır. Aynı şekilde SO_3 , genellikle %0,2-2,5 arasında değişmekle birlikte, kömürün yapısı ve proses koşullarına göre %10'a kadar yükselmektedir. Ancak, TS EN 450 standardı SO_3 değerini en fazla %3'e kadar sınırlamaktadır (TS EN 450, 1998; Türker vd., 2009).

Yakılan kömür cinsine bağlı bazı UKÜ'ler önemli miktarda CaO bileşiği ihtiva etmektedir (Kefelioğlu, 1998; Güler vd., 2005). Bulundurduğu CaO miktarına eşdeğer olarak UKÜ'ler, %10'un altında CaO içerdiğinde düşük kireçli veya kalsiyumlu, %10'un üstünde CaO içerdiğinde ise yüksek kireçli veya kalsiyumlu UKÜ olarak adlandırılırlar (Ünal ve Uygunoglu 2004).

2.1.1.3 Uçucu küllerin mineralojik özellikleri

UKÜ'nün mineralojik yapısını camsı ve kristal yapıli bileşenler oluşturmaktadır (Türker vd., 2009). Mineralojik analizlerde bu bileşenlerin, bir kısmı UKÜ içerisindeki silisyumun kuvars kristalleri halinde bulunur. Gözlenen diğer kısımlar ise alüminat ile birleşerek mullit minerali oluştururken, camsı fazda bulunan mineralleri de içermektedir (Aytekin, 2009).

UKÜ'lerin %66-88'i camsı yapıda olup %70-88'i SiO_2 ve Al_2O_3 geri kalan kısmı ise demir, kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum ve titanyumdan meydana gelmektedir (Güler vd., 2005; Joshi ve Nagaraj, 1987; Alkaya 2009).

Genel anlamda UKÜ'nün mineralojik bileşimini kömürde bulunan kil, kuvars, pirit, alçıtaşı, karbonatlar (Ca, Mg, Fe) gibi minerallere ve kömürün proses koşullarına bağlıdır (Türker vd., 2009).

UKÜ'yü oluşturan minerallerden en fazla bulunanlar silikat (SiO_2), mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), kalsit (CaCO_3) ve gipsittir (anhidrit (CaSO_4)) (Güler vd., 2005; Alkaya 2009).

UKÜ'ler mineralojik faz anlamında -CaO içerme durumuna göre- düşük CaO içeren küllerde başta camsı faz kuvars (SiO_2), mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$), manyetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3) içerirken, yüksek CaO'lu UKÜ'lerde kuvars, hematit, anhidrit (CaSO_4), serbest kireç, C_3A ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$), CS ($\text{CaO}.\text{SiO}_2$), C_2S ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$), gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), mellilit ($\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Al})(\text{AlSi})_2\text{O}_7$) ve merwinit ($\text{Ca}_3(\text{Mg})(\text{SiO}_4)_2$) gibi mineraller ve camsı faz içerdiği gözlenmiştir. Düşük CaO içeren küllerdeki camsı faz miktarı, yüksek kireçli CaO içeren UKÜ'lerdeki camsı faz miktarından daha fazladır. Her iki külde de alkali feldispatlara rastlanmaktadır. Yüksek kireçli UKÜ'lerde kalsit, portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), trisülfoalüminat ($4\text{CaO}.3\text{Al}_2\text{O}_3.32\text{H}_2\text{O}$), mullit bulunabilmektedir (Hubbard 1985; Enders, 1996; Türker vd., 2009).

2.1.1.4 Uçucu küllerin puzolanik özellikleri

UKÜ'ler, kömürün yanması sonucu oluşan baca gazları ile sürüklenirken, hava ile temas ederek ani soğuma ile puzolanik özellik kazanırlar (Bayazıt, 1980; Alataş, 1996; Aytekin, 2009). UKÜ'deki puzolanik etki külün bileşimine ve inceliğine bağlı olarak değişmektedir (Erdoğan, 1995). Puzolanik aktivitenin temelini oluşturan UKÜ'lerin yüksek dayanım kazanma özelliği, UKÜ'lerin kireç ve su ile karıştırılmasıyla, belirli bir süre sonunda oldukça yavaş olarak ortaya çıkar. CaO miktarı yüksek olan UKÜ'lerin daha iyi puzolanik özellik gösterdiği bilinmektedir (Güler vd., 2005).

UKÜ'lerde puzolanik reaktiviteyi etkileyen parametrelerin belirlenmesi ve puzolanik malzeme olarak kullanılabilirlik için UKÜ'nün fiziksel ve kimyasal özelliklerine hakim olunmalıdır. UKÜ'yü meydana getiren bu özellikleri, külün eldesi esnasında kullanılan kömürün yakılma biçimi, kömürün yakılma işleminin gerçekleştirildiği kazanın çalışma durumu, daha yanmamış olan kömürün öğütülme inceliği ve hava kirliliğinin kontrol edilmesi için kömüre ilave edilen katkı maddeleri oluşturur (Joshi ve Nagaraj, 1987).

UKÜ'lerin özellikle inşaat alanındaki temel başarısını etkileyen, puzolanik özellikleri sıralamak mümkündür (Erdinç, 1995).

1. UKÜ'lerin inceliğinin artması puzolanik özelliği ve mekanik dayanımı artırır.
2. UKÜ içerisindeki amorf yapıda bulunan, SiO_2 ve Al_2O_3 bileşikleri miktarının artması puzolanik etkiyi artırır.
3. CaO , SO_3 ve alkali oksitlerin varlığı puzolanik özelliğe etkisi ile ilgili bir sonuca ulaşamamıştır.
4. Külde yanmamış karbon miktarının artması UKÜ'de boşluklu bir yapı oluşturur. Bu boşluklu oluşum külün su ihtiyacını artırır ve dayanımı düşürür. Yani UKÜ'nün içerisinde karbon miktarının artması, puzolanik özelliğin azalmasına neden olur.
5. ASTM C618'e göre puzolanik malzemelerin kimyasal bileşiminde yüksek oranda amorf olan bu oksitlerin $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 0.70$ olması gerekmektedir. Bu bileşikler normal sıcaklıkta sönmüş kireç (Ca(OH)_2) ile kolayca kimyasal tepkimeye girip bağlayıcı bir yapı oluşturmaktadırlar (Alkaya, 2009).

2.1.2 Uçucu küllerin sınıflandırılması

UKÜ'lerin sınıflandırılması genellikle kimyasal özellikler baz alınarak yapılmaktadır. Son yıllarda kullanılan sınıflandırma yöntemi UKÜ'nün içerisindeki CaO miktarına göre yapılmaktadır. Bu sınıflandırma esas alınarak, UKÜ'ler %10'un altında CaO bileşiği içeriyorsa düşük kireçli ya da düşük kalsiyumlu, %10'un üstünde CaO bileşiği içerdiği durumda ise yüksek kireçli ya da yüksek kalsiyumlu UKÜ'ler olarak adlandırılmaktadırlar (Ünal ve Uygunoglu 2004).

UKÜ'ler ASTM C618'e göre F sınıfı ve C sınıfı olmak üzere 2 gruba ayrılmaktadırlar.

1. F sınıfı UKÜ'ler bitümlü kömürlerden elde edilip, küllerin CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli küller olarak adlandırılmaktadırlar. F sınıfı UKÜ'lerin içerisinde ihtiva eden $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ bileşiklerinin değeri %70'in üstünde olmalıdır. Bu küller pozolanik özellik göstermeleri ile bilinirler.
2. C sınıfı küller ise genelde linyit kömüründen ve az miktarda bitümlü kömürden elde edilmiştir. C sınıfı UKÜ'ler %10'un üstünde CaO bulundurduğu için başka bir deyişle bu küllere yüksek kireçli UKÜ denilmektedir. UKÜ'lerdeki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ bileşiklerinin miktarı %50'den fazla ise bu küller C sınıfı küller olarak adlandırılmaktadırlar (Türker vd., 2009).

UKÜ'ler içerdiği SO_3 miktarına ve kimyasal yapılarına göre 4 başlık altında toplanmaktadırlar.

1. Silikat alüminat esaslı UKÜ'ler: Bu UKÜ'leri yüksek miktarda kuvars (SiO_2) ve bir miktar alüminat Al_2O_3 meydana getirmektedir. Taş kömüründen oluşan UKÜ'lerin yapısını silikat alüminat esaslı UKÜ'ler oluştururlar. İçerisinde bulundurdıkları alkali ve toprak alkali element oksitlerinin etkisi bu külleri çok ince taneli ve camı yapıya dönüştürmüştür.
2. Silikat-kalsit esaslı UKÜ'ler: Yapılarında silikat (SiO_2) ve kalsit (CaO) bulundururlar. Zayıf bağlayıcı özelliklerinin yanı sıra ek kireç kullanımına gerek olmadan kendi kendilerine bir bağlayıcılık oluşturabilmektedirler.
3. Sülfö-kalsit esaslı UKÜ'ler: Adından da anlaşılacağı üzere bu UKÜ'ler kükürt trioksit (SO_3) ve kalsitten (CaO) oluşmuşlardır. Sulu ortamda kendi özellikleri dahilinde sertleşebilirler. Linyit UKÜ'leri sülfö-kalsit esaslı UKÜ'lerdir.
4. Sınıflandırılmayan UKÜ'ler: Termik santrallerdeki kömür yakma işleminin homojen gerçekleşmemesinden kaynaklı oluşan UKÜ'ler sınıflandırılmayan UKÜ'ler olarak adlandırılırlar. Bu UKÜ'lerin belirli kimyasal yapıları yoktur (Toros, 1987; Alkaya 2009).

2.1.3 Uçucu küllerin kullanım alanları

Termik santral atığı/yan ürünü UKÜ'lerin inşaat sektörü başta olmak üzere yeni kullanım alanları ve yöntemler ile değerlendirmelerinin yapılmasına ilişkin çalışmalar önem kazanmıştır ve yoğun olarak devam etmektedir.

2.1.3.1 Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanımı

UKÜ'lerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri incelendiğinde, bunların inşaat sektöründe rahatlıkla kullanılabileceği ve dolayısıyla bir yandan malzeme ve enerji üretiminde ekonomi sağlanırken diğer taraftan çevre kirliliğinin önlenmesi ile ekolojik dengenin korunması da mümkün görülmektedir (Aruntaş, 2006).

UKÜ'lerin inşaat sektöründe kullanım araştırmaları, ilk olarak ABD ile başlayan ve uygulamalı olarak tüm Dünya'ya çok kısa zamanda yayılıp, olumlu neticeler veren çalışmalardır. Günümüzde endüstriyel atık olan UKÜ'lerin sağladığı çok ciddi ve teknik faydalar, bu küllerin inşaat sektöründe potansiyel olarak, özellikle çimento ve beton alanında değerlendirilmesi ve beton imalatındaki kaliteyi arttırmasına olanak sağlamıştır. Ülkemizde UKÜ'lerin kullanım alanlarına ilişkin çalışmalar özellikle 1990'lı yılların sonlarından itibaren hız kazanmıştır. UKÜ'nün potansiyel olarak en fazla kullanıldığı yer inşaat endüstrisidir. UKÜ'ler beton blok ve boruların yapımında, gaz beton ve tuğla üretiminde, dayanıklı hafif agrega eldesinde, silindirle sıkıştırılmış betonların yapımında, çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanım alanı bulur. Aynı zamanda inşaat teknolojisinde çimentoya duyulan ihtiyacın azalmasında ve betonun pek çok niteliğini geliştirmede yapay puzolan olan UKÜ'lerin etkisi son derece önemlidir (Türker vd., 2009). UKÜ'ler, gaz beton, yalıtım malzemesi, duvar, beton boru, harç, cam gibi yapı malzeme ve elemanlarının üretiminde de kullanılmaktadır (Tokyay, 1987; Aruntaş, 2006)

İnşaat sektöründe UKÜ'nün kullanımı önemli birçok avantaj sağlar. UKÜ'lerin kullanımıyla elde edilebilecek yararlar yalnızca çevre koruma bilinci ve enerji tasarrufu ile sınırlı değildir. Betonda katkı maddesi olarak UKÜ kullanımı elde edilen betonun daha ekonomik ve daha uzun ömürlü performans düzeyi sağlamasında da etkindir (Gül ve Yıldız, 1997).

Dünyada UKÜ'nün inşaat sektöründe kullanımı ile ilgili çalışmalar, genellikle beton üzerinde yoğunlaşmaktadır (ACI, 1987; Wesche, 1991). Betonda kullanıma uygun UKÜ, betonun daha ekonomik ve uzun ömürlü performans düzeyi sağlar. UKÜ'lerin kullanımı ile elde edilebilecek yararlar yalnızca çevre koruma ve enerji tasarrufu ile sınırlı değildir. Betonda katkı maddesi olarak UKÜ kullanımının özellikle kütle yapılarında daha pratik ve ekonomik olduğu çeşitli kaynaklarda belirtilmiştir.

UKÜ'lerin inşaat sektöründe diğer kullanım alanı ise hafif yapı malzemesi sınıfından geopolimer sentezinde kullanılabilirliğidir. Geopolimer üretimi, atık malzeme olan UKÜ'nün yeniden kullanılmasının farklı alternatiflerinden seçilmiştir. Geopolimer teknolojisi, UKÜ kullanımına çevre ve ekoloji üzerindeki olumsuz etkilerini önleyerek yeni ve iyi bir çözüm sunar (Yaprak ve Kaplan, 2016).

Geopolimer üretimi ilk defa 1957 yılında Glukhovsky tarafından NaOH ve yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Pacheco, 2008; Yaprak ve Kaplan, 2016).

2.1.3.2 Uçucu küllerin betonda kullanılması ve beton yapıları üzerindeki etkisi

UKÜ'nün inşaat sektöründe istihdamı özellikle, betonda kullanıma dayanmaktadır. UKÜ betonda katkı maddesi ve başka bir malzemenin yerine geçerek ikame malzemesi olarak kullanım alanı bulmaktadır. Betonda UKÜ'nün kullanılması betonun basınç dayanımını (BDA) artırırken, beton yüzeyinde aşınmaya karşı direnç oluşmasına yardımcı olmaktadır (Montemor vd., 2000; Aruntaş 2006; Kaplan ve Gültekin, 2010).

Manisa'da bulunan Soma-B ve Ankara'daki Çayırhan Termik Santrallerinden çıkarılan UKÜ'lerin, normal beton yapımında kullanılan çimento ile yer değiştirmesiyle üretilmiş betonların basınç dayanımlarında artış sağladığı görülmüştür (Aruntaş, 2006; Şimşek vd., 2001). Hafif betonlarda UKÜ'nün çimento ile yer değiştirdiği durumda da BDA artışa geçmiştir (Şimşek ve Kılıç, 1991; Şimşek vd., 1999; Aruntaş, 2006). Beton içerisinde UKÜ'nün kullanılması, basit ikame metodu olan Portland çimentosu yerine UKÜ'lü çimento kullanımı ve UKÜ'nün beton içerisine katkı maddesi olacak şekilde ilavesi ile gerçekleşmektedir. Beton içinde UKÜ'lü çimento kullanılması daha kontrollü bir uygulama yöntemidir. Böylelikle UKÜ ve çimento karışım oranları önceden

belirlenmiş ve oranlardaki sınır aralığı değişmemiş olur (Berry ve Malhotra, 1986; Anuk, 2004).

Beton üretimi esnasında, beton harcı içerisine çimento ile birlikte UKÜ'nün katkı maddesi olarak katılması, betonda gözlemlenen belli başlı birçok olumlu etki olarak karşımıza çıkmaktadır (Bayazıt, 1980; Alataş, 1996; Öksüz, 2006). Betonda UKÜ'nün kullanım avantajları şu şekilde sıralanabilir.

1. UKÜ'nün çimento yerine kullanılması ile birlikte çimento kullanımı azalmıştır ve çimentodan tasarruf sağlanmıştır.
2. UKÜ'lü betonlarda kıvam artışı ve işlenebilirlik yüksektir.
3. UKÜ katkılı ve külsüz betonların basınç dayanımları 1-6 ay içinde eşit değere ulaşır. Fakat bu süreden sonra küllü betonların basınç dayanımları kül bulundurmayan betonların dayanımını geçer.
4. UKÜ'lü betonlarda hidratasyon ısısının düşük olmasından dolayı termal rötire normal betona göre çok azdır. Termal rötrenin azalması ısı ve su kaybının dengelenmesine olanak sağlayarak kılcal çatlağı önlemektedir.
5. Taze beton harcı kalıp içine yerleştirilip sarsıldıktan kısa bir süre sonra ağır malzemeler kalıp zeminine çöker ve beton numunesi üzerinde bir miktar su gözlenir. Bu durum betonun görünümünü bozmakta ve homojenliğini azaltmaktadır. UKÜ'lü betonlarda ise istenmeyen durum olan kuma olayı azaltılarak betonun dayanıklılığı artmaktadır.
6. UKÜ'lü betonda kusmanın azalması taneler arasındaki yapışma kuvvetini arttırdığı için betonun ayrışmasını önlemektedir.

UKÜ'lü betonların kullanım performanslarının sülfat ve klorür etkisine maruz kalan ortamlarda bile azalmadan sürdürülebildiği yapılan çalışmalar ile kanıtlanmıştır (Dunstan vd., 1992; Aruntaş, 2006).

Yapılan diğer deneysel araştırmalar ile UKÜ'nün polimer beton üretiminde de kullanılabileceği bulunmuştur (Rebeiz ve Mielich, 1995; Aruntaş, 2006).

Beton karışımında hafif iri agrega olarak katılaştırılmış UKÜ kullanıldığı bir çalışmada, betonarme kirişler üretilmiştir; kirişler üzerinde yapılan deneyler istenilen beton

standartlarına uygun sonuçlar verdiği için, UKÜ'lerin agrega olarak kullanılabilirliği de tespit edilmiştir (Swamy ve Lambert, 1984; Aruntaş, 2006). UKÜ'nün beton karışımında kullanılmasının betonarme çeliği üzerine olumlu etkisi, betonda donatı korozyonunun azalması ile deneysel olarak belirlenmiştir (Montemor vd., 2000; Aruntaş, 2006).

UKÜ'nün kullanım alanı bulduğu beton çeşitlerinden bir tanesi de lifli betondur. Deneysel olarak yapılan araştırmalar yüksek oranda UKÜ'nün otoklav uygulanmış ve kendiliğinden yerleşen lifli beton üretiminde kullanılabileceğini önermektedir (Şahmaran ve Yaman, 2005; Aruntaş, 2006; Yazıcı vd., 2006).

UKÜ katkılı betonlarda hidrasyon ısısının düşük olması nedeniyle Türkiye’de ve Dünya’nın birçok yerinde barajların inşa edilmesinde UKÜ’lü beton tercih edilmiştir (Bayazıt, 1970; Özel, 1970; Erdoğan vd., 1982; Valenti, 1986; Tokyay, 1993; Manz, 1999; Aruntaş, 2006). ABD’de 1953 yılında tamamlanan Hungry Horse barajının kütle betonunda 120.000 ton UKÜ kullanılmıştır (ACI, 1987; Aruntaş, 2006). Benzer olarak İngiltere’de nükleer bir enerji santrali inşaatı sırasında hazırlanan beton içerisinde yaklaşık 100.000 ton UKÜ’nün katkı malzemesi olarak kullanıldığı bildirilmiştir (Davies ve Kitchener, 1996; Aruntaş, 2006).

2.1.3.3 Uçucu küllerin çimento katkı maddesi olarak kullanılması

Türkiye’de ve Dünya’da yapılan araştırmalar UKÜ’lü çimentolar ve bu çimentoların özellikleri ile ilgili çok sayıda çalışmaya rastlamışlardır (Tokyay, 1987; Kula vd., 2001; Aruntaş, 2006). Türkiye’de çimento üretiminde kullanılan toplam UKÜ miktarı, 1980 yılına kadar 40 bin ton olarak tespit edilmiştir (Erdoğan vd., 1982; Aruntaş, 2006). Diğer ülkelerde çimento üretiminde UKÜ kullanımı ise sırasıyla İtalya’da %1 (Valenti 1986; Aruntaş, 2006), Fransa’da %25 (Postacıoğlu, 1986; Aruntaş, 2006), ABD’de ise %25 olarak çimento ve betonda tespit edilmiştir (Rayzman, 1997; Aruntaş, 2006).

UKÜ’ler puzolanik özelliğe sahip oldukları için yoğun olarak kullanıldıkları alanlardan birisi de çimento içinde katkı maddesi olarak kullanılmalarıdır. Bu alanda yapılan araştırmalar sonunda, UKÜ’lerin çimento içindeki serbest kireci tespit ettiği ve UKÜ’lerin çimento ile birleştiğinde hidrolik bağlayıcı özellikleri açığa çıkardığı

görülmektedir. UKÜ'ler çimentoda hammadde, katkı maddesi olarak kullanılırken bir başka malzemenin yerine de kullanılmaktadır (Neville, 1981; Erdoğan, 1993; Tokyay, 1993; Tokyay ve Erdoğan, 1998; Ferreira vd., 2003; Aruntaş, 2006).

UKÜ çimentoda katkı malzemesi olarak kullanılırken enerji tasarrufu sağlanmaktadır. UKÜ'nün çimentonun ana hammaddeleri olan kil ve kalkere hammadde olarak karıştırılarak klinker üretimini sağladığı bilinmektedir. Yine UKÜ'nün çimentoda kullanılması bir taraftan daha ucuz ve kaliteli çimento elde edilmesine yardımcı olurken, diğer bir taraftan ekonomiye katkı sağlanmaktadır (Tokyay ve Erdoğan, 1987; Aruntaş, 2006).

UKÜ'nün çimento içerisine karıştırılmasıyla yapılan betonların basınç dayanımlarının da yüksek olduğu gözlenmiştir. %20 oranında kül karıştırılmış çimento ile yapılan betonun 300 gün sonucunda bulunan BDA'sının, kül içermeyen çimentolardan üretilen beton ile kıyaslandığında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Betonların 90 günlük eğilme dayanımı (EDA) değeri de %20 kül katkılı çimento kullanıldığında artışa geçmiştir. UKÜ'ler beton baraj yapımında çimento içine katılmak suretiyle baraj maliyetini de düşürmektedir. Japonya'da 70 m yüksekliğindeki Sudagai Barajı, 120 m yüksekliğindeki Ikawa Barajı ve 62 m yüksekliğindeki Hatogaya Barajı UKÜ'lü çimento ile yapılan barajlara örnektir (URL 9, 1960).

Türkiye'deki UKÜ'lerin özgül yüzey değeri, çimento standartlarındaki değere çok yakındır. Buna ek olarak bir çalışmada Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Orhaneli, Soma ve Tunçbilek termik santrallerinden alınan UKÜ'lere ait özgül yüzey değerlerinin, 2800 cm²/g değerinden büyük veya eşit olduğu bulunmuştur. Bu değer çimento standartlarında aranan değer ile örtüşmektedir (Tokyay ve Erdoğan, 1987; Aruntaş, 2006). Bu durumdan hareketle çimento üretiminde UKÜ'lerin öğütme işlemi yapılmadan doğrudan kullanılabilceği ve çimento üretimi sonunda küllerin çimentonun yerine kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Çimento üretimi, çok büyük miktarda doğal kaynak ve enerji tüketimine sebep olurken, atmosfere yüksek miktarda CO₂ salımı olmaktadır. Atmosferde CO₂ gazının artışı sera etkisi ve dolayısıyla iklim değişikliklerine neden olmaktadır. Alınan çevresel önlemler ve çimento üretiminde UKÜ kullanılmasıyla, enerji tüketiminin azaltılması ve doğal

çevrenin korunması hedeflenmektedir. Böylelikle havadaki CO₂ miktarı da azalacağı gibi atmosferin doğal dengesi korunarak küresel ısınmanın en aza indirilmesi mümkün olacaktır (Ferreira vd., 2003; Aruntaş, 2006).

2.1.3.4 Uçucu külün geoteknik alanda değerlendirilmesi

İnşaat sektöründe geniş kullanım alanı bulan UKÜ'lerin geoteknik uygulamalarda özellikle tercih edilen performansa sahip oldukları bilinmektedir. UKÜ'ler geoteknik çalışmalarda ve yol kaplaması malzemesi olarak kullanıldığında -istenilen ve ekonomik çözümler sunması nedeniyle- geniş kullanım alanı bulmaktadır.

Çizelge 2.1. UKÜ'nün geoteknik çalışmalarda kullanım alanları (Öksüz, 2006)

UKÜ'lerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanım Alanları
Dolguların stabilizasyonu
Altyapı ve taban malzemesi katkı malzemesi
Alt drenaj tabakası
İri stabilize malzemelerin boşluklarının doldurulması
Zemin enjeksiyonlarında kireçle birlikte kullanımı

2.1.3.5 Boşluklu beton üretiminde uçucu külün kullanımı

Boşluklu beton, UKÜ'nün çimento veya kireç ile karışımının içerisinde hava ya da başka bir gaz geçirilmesi ile oluşturulan betondur. Betonun boşluklu yapıda olması hafif olmasına olanak sağlayarak kolay taşınmasına yardımcı olurken, inşaat çalışması sırasında işçi giderlerinde avantaj sağlamasından dolayı tercih edilmektedir (Sevim, 2003; Öksüz, 2006). Boşluklu beton üretilirken çimento içerisine %20-30 oranında UKÜ eklenmesi ekonomiye katkı sağlamaktadır (URL 9, 1960). UKÜ içeren boşluklu betonlarda ısı iletkenliği, kum-kireç-çimento karışımından daha düşük olmakta, mukavemet ise daha yüksek sonuç vermektedir (Sevim, 2003; Öksüz, 2006).

2.2 Kompozit Malzeme

Kompozit malzemeler; büyük boyuttaki iki ya da daha fazla malzemenin bir araya gelmesiyle oluşmuşlardır. Kompozit malzemeler yapı sektöründe -dekoratif uygulamalar başta olmak üzere- dış ve iç cephe kaplamaları, prefabrik yapılar ve köprü

yapımında kullanım alanı bulmaktadırlar. Yüksek mukavemet, iletkenlik, aşınma direnci ve korozyon dayanımı kompozit malzemenin istenilen özellikleri arasında yer almaktadır (URL 10, 2018).

2.3 Geopolimer

Doğal minerallerin çeşitli deneysel yöntemlerle kimyasal bileşimleri ve kristal yapılarının değiştirilmesiyle elde edilen yeni inşaat teknolojisi "geopolimer" olarak adlandırılmaktadır. Geopolimer üretimi ilk aşama olarak, polimerleşme ile başlar ve alkali ortamda polimerize silikat veya alüminosilikat içeren bileşiklerin, temel olarak UKÜ ve benzeri katkı malzemeleri kullanılarak sentezine dayanır (URL 11, 2019).

Geopolimer terimini ortaya koyan Davidovits, geopolimerleri ilk olarak yer kabuğu yüzeyindeki oluşumlara benzer sentetik mineralleri tanımlarken kullanmıştır (Davidovits, 1982; Davidovits, 1984; Davidovits, 1994; Bakharev, 2005a). Geopolimerler silikoalüminatlara ait polimerlerdir. Bu özellikleri zeolitler ile benzerlik göstermektedir. Ancak geopolimerler şekilsiz malzemelerdir. Aynı zamanda geopolimerler yüksek sıcaklık direncine, ısı kararlılığı, yüksek BDA'ya sahiptir (Davidovits, 1982; Davidovits, 1984; Bakharev, 2005a). Davidovits 1979'da ilk kez alümino-silikatlı malzemeler sınıfını belirlemek için "geopolimer" terimini kullandığında, yeni teknolojilerin geopolimer üretiminde uygulanmasına olan ilgi zamanla artmıştır (Andini vd., 2008; Davidovits, 1979). Geopolimer son zamanlarda özellikle İnşaat Mühendisliği alanında yeni bir bağlayıcı malzeme olarak ortaya çıkmıştır ve çevresel olarak sürdürülebilirlik özelliğine sahip bir malzemedir (Duxson vd., 2007; Kong ve Sanjayan, 2010). Genellikle geopolimerlerin üretimi amaçlanırken, kömürle çalışan elektrik santrallerinin endüstriyel bir yan ürünü olan UKÜ tercih edilmektedir (Bakharev, 2005a; Kong ve Sanjayan, 2010). Geopolimerler UKÜ'lerin yüksek oranda alüminosilikat ve hidroksit içeren alkali bir sıvı ile karıştırılmasıyla sentezlenerek oluşturulan puzolanik malzemelerdir (Davidovits, 1991; Kong ve Sanjayan, 2010). UKÜ'lü geopolimerler yüksek düzeyde enerji tüketimini gerektirmez. Yapılan araştırmalarda geopolimerlerin oluşumu esnasında tüketilen enerjinin, Portland çimentosunun enerji gereksiniminden yaklaşık olarak %60 daha az olduğu hesaplanmıştır (Li vd., 2004; Kong ve Sanjayan, 2010). İnşaat betonu dendiğinde ilk akla gelen geleneksel olarak sıradan bir bağlayıcı olan Portland Çimento katkılı

betondur. Çevresel sera gazı emisyonlarını azaltmak için Portland Çimento'ya eşdeğer olan teknoloji olarak geopolimerler tercih edilmiştir (Turner ve Collins, 2013). Portland çimentosu ile kıyaslanan UKÜ bazlı geopolimerlerde, geopolimer malzemenin çeşitli biçimlerinin performansları, geopolimer numune harcı ve geopolimer kompozitlerin yüksek sıcaklıklarda gösterdikleri performans etkili olmuştur. Ayrıca, geopolimer kaynaklı malzemeler bünyelerinde barındırdıkları düşük Ca içeriği nedeniyle, Portland çimentosu içerikli malzemelere göre asit saldırılarına karşı çok daha dirençlidir (Bakharev, 2005b; Andini vd., 2008). Normal Portland çimento betonları yeterli yangın dayanımı sağlamaktadır. Fakat yüksek sıcaklık ile betonun dayanımı ters orantılı olduğundan betonda yangın meydana geldiğinde, alev dalgaları hızlı bir yayılma halinde beton kaplama malzemesini eritir ve böylece yangın direkt olarak beton içindeki ana takviye çimentolarının ateşe maruz kalmasına yol açar (Sanjayan ve Stocks, 1993; Kong ve Sanjayan, 2010). Geopolimerlerin seramik benzeri özelliklerinden dolayı, iyi yangın dayanımına sahip olduğu bilinmektedir (Davidovits, 1991; Cheng ve Chiu, 2003; Kong ve Sanjayan, 2010). Bu nedenle, geopolimerler betonlar, Portland çimentosu ile üretilen geleneksel betonlara kıyasla daha yüksek yangın dayanımına sahip olabilir. Dolayısıyla geopolimerler hem yüksek sıcaklıktaki BDA kaybı hem de betonun dağılma direnci açısından iyi yangın dayanımına sahip alternatif bir bağlayıcı olarak tanımlanabilmektedirler (Bakharev, 2005a; Kong ve Sanjayan, 2010).

2.3.1 Geopolimerlerin genel özellikleri

Günümüzde inşaata ve yapıya olan talebin artışı betona duyulan ihtiyacı beraberinde getirmiştir. Bu durum Portland çimentosunun üretimi de arttıracaktır. Portland çimentosu üretiminde ısıtıl işlem esnasında kireçtaşının dekarbonasyonu kayda değer miktarda sera gazı salınmasıyla sonuçlanmaktadır. Ayrıca, yapı sektöründe Portland çimentosu alüminyum ve çelikten sonra en çok enerji harcayan malzemedir (Hardjito vd., 2005a; Temuujin ve Riessen, 2009). Bu nedenle, Portland çimentosu yerine alternatif bir bağlayıcı seçeneği arayışına yönelme olmuştur. Öncelikli olarak, Glukhovsky ve ardından Davidovits, alkalilerle aktifleştirilmiş alüminosilikatlar ile sentezlenen çimentolu yapıların, gayet yüksek dayanıma sahip olabileceği gibi düşük rötre, asit ve yangına mükemmel dayanıklılık gibi diğer birçok yararlı özelliği sergileyebileceğini öne sürmüşlerdir (Glukhovsky, 1959; Davidovits, 1988; Temuujin ve Riessen, 2009).

Dünya’da ve bilhassa Türkiye’de son yıllarda çevre bilincindeki artış, inşaat alanında da çevresel etkilerinin değerlendirilmesine yol açarak, geopolimerlerin Portland çimentosundan yapılan betona alternatif olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır (Erdoğan, 2014). Geopolimerler havanın doğal yapısındaki bileşimi değiştiren kirletici gaz emisyonların salımına neden olmamaktadırlar. Son on yıl kapsamında, geopolimer eldesi ve özellikleri hakkında birçok araştırma makalesi bildirilmiştir ve bu konu üzerine çok sayıda yayın bulunmaktadır (Komnitas ve Zaharaki, 2007; Duxson vd., 2007; Temuujin ve Riessen, 2009).

Geopolimer malzemelerin ana formunu toz bağlayıcılar ve alkali çözeltiler oluşturmaktadırlar. Toz bağlayıcı olarak genellikle öğütülmüş YFC, UKÜ veya metakaolin gibi alüminosilikatlar kullanılırken, aktivatör seçiminde sodyum hidroksit veya sodyum silikat gibi alkali çözeltileri tercih edilmektedir. Geopolimer beton, Portland çimentosu içermediğinden ve toz bağlayıcı olarak endüstriyel yan ürün veya işlenmiş doğal bir malzeme olduğundan, klasik betona göre daha düşük CO₂ emisyonuna sahiptir ve çevresel etki anlamında olumlu yönleri olduğu söylenebilir (Erdoğan, 2014).

Tatlı su ve deniz suyu ekotoksitesitesi, insan toksitesitesi, ozon tabakasının incelməsi, ötrofikasyon ve asitlenme olayları çevre sağlığını kötü yönde etkileyen faktörlerdir. Bunların yanı sıra, çevresel etki değerlendirmesi çalışmalarında, karbon emisyonu önemli ve ilk akla gelen kirletici parametresidir. Bu yüzden inşaat malzemeleri araştırmacıları ve malzeme kullanıcıları çalışmalarında CO₂’i karbon salımının azaltılması için etkili bir kriter olarak belirlemişlerdir. Geopolimer teknolojisinde klasik betondan daha düşük karbon emisyonlu beton üretmek mümkündür (Erdoğan, 2014).

Evrensel nitelikte kömür yakıtlı enerji santralleri tarafından, her yıl milyonlarca açığa çıkarılan ve yan ürün olarak da bilinen UKÜ’nün yönetimi ve depolanması her zaman endişe verici olmuştur. Üretilen UKÜ’nün geri dönüşüm ve depolama planlanmasında yaklaşık olarak %20-30 oranında UKÜ inşaat sektöründeki bazı uygulamalarda çimento ve betona katkı maddesi ve dolgu malzemesi olarak kullanılırken, geri kalan kısım ise atık depolama alanlarında şu anda kullanılan işleme tekniği ile geri dönüşüme uğramaktadır. UKÜ’lerin geri dönüştürülmesinde tek amaç çevre kirliliğinin engellenmesi değil, aynı zamanda UKÜ’lerin değerli bir ham madde olarak ele alınması

için özel bir çaba gösterilmesidir. Dolayısıyla özellikle endüstriyel atıkları planlı ve güvenli bir şekilde yönetmek için çeşitli stratejilerin geliştirilmesi faydalı olacaktır. Öne sürülen inşaat yaklaşımları bu bağlamda UKÜ'lerden geopolimerlerin sentezini ilginç ve geliştirilmesi gereken konular arasında değerlendirmişlerdir. Geopolimerizasyon prosesi güncel bir olgu olmamasına karşın son on yılda, UKÜ'lere uygulanan yenilikçi ve çevreci bir teknoloji yaklaşımı olarak karşımıza çıkmaktadır. Geopolimer oluşumu sürecinde, alüminosilikatlı alkali çözeltiler olarak oksitler ve silikatlar (katı veya sıvı) kullanılmaktadır. Bu alkali aktif yüzey grupları ve çözünebilir alüminosilikatlı polimerizasyon ürünleri ilerleyen zamanlarda geopolimer yapıda sertleşmenin gerçekleşebilmesi için jel oluşturulması sırasında önem kazanmaktadır. Genel anlamda geopolimerizasyon reaksiyonu gerçekleştirilirken, az miktardaki partikül halde bulunan silika ve alümina bileşikleri çözünerek, geopolimer karışımının katılaşmasında katkı sağlamaktadır (A'lvarez-Ayuso vd., 2008).

Çoğu geopolimer üretimi çalışmalarında tercih edilen alkali çözeltiler içerisinde çözünmüş halde silika ve alümina içeren birçok malzeme bulunmaktadır. Bu malzemeler; doğal mineraller (kaolin, feldispat, albit, stilbit) (Xu ve Deventer, 2002a; Xu ve Deventer, 2002b; Barbosa and MacKenzie, 2003a; A'lvarez-Ayuso vd., 2008), işlenmiş mineraller (metakaolin) (Palomo vd., 1999; A'lvarez-Ayuso vd., 2008), atık malzemeler ve endüstriyel yan ürünlerden (inşaat yapı atıkları, YFC, UKÜ) (Jaarsveld vd., 1998; Cheng ve Chiu, 2003; Bakharev, 2005a; A'lvarez-Ayuso vd., 2008) oluşmaktadır.

Benzer çalışmalarda UKÜ'lü geopolimer harç üretiminde farklı kütleli karışım oranlarına sahip UKÜ ve alkali çözeltiler yaklaşık olarak, %60 UKÜ ve %15 Al-Si çözeltilerinden oluşurken, karışımın geri kalanında alkali olarak silikat çözeltisi kullanıldığı bilinmektedir (Jaarsveld vd., 1998; Jaarsveld vd., 1999; Jaarsveld ve Deventer, 1999; Jaarsveld vd., 2002; Swanepoel ve Strydom, 2002; Jaarsveld vd., 2003; Feng vd., 2004; A'lvarez-Ayuso vd., 2008).

Geopolimerizasyon çalışmalarında katı malzeme olarak kullanılan (Bakharev, 2005a; A'lvarez-Ayuso vd., 2008) UKÜ'nün özelliklerine (Si ve Al içerikleri) göre belirlenmiş kütleli karışım oranları büyük ölçüde değişiklik gösterebilir. Bundan dolayı, UKÜ

yüzdelere bazı durumlarda %10 gibi düşük oranlarda kullanıldığına rastlanmaktadır (Bankowski vd., 2004a; Bankowski vd., 2004b; A lvarez-Ayuso vd., 2008).

Geopolimer malzeme sentezinde, silika ve alümina kaynağı olarak UKÜ'nün kullanılması ile ilgili yapılmış araştırmaların yetersiz olduğu ve üretilmiş geopolimer ürünlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile bu geopolimerlerin oluşumunu düzenleyen etkenler hakkında hala araştırılması ve tespit edilmesi gereken verimli bilgilerin olduğu açıktır. Geopolimer numune üretimi sürecinde kullanılan UKÜ'lerin fiziksel özellikleri yapısal stabiliteyi belirlerken, kimyasal açıdan bakıldığında ise (sızdırma davranışı), numunenin stabilizasyonlarını değerlendirmeyi ve bu sentezde yer alan süreçleri daha iyi anlamayı amaçlamaktadır (Ayuso, 2008).

Geopolimerler oluşumları esnasında çevreyi göz ardı etmemeleri ve mükemmel mekanik özellikleri dolayısıyla kolay işlenebilmekte ve kullanımları açısından geniş enerji tasarruf alanı sağlamaktadırlar. Bu sayede gopolimerler, çeşitli inşaat ve yapı malzemelerinde hızlı artışa geçen kullanımlarının yanı sıra, yangına dayanıklı seramikler ve toksik atıkların değerlendirilerek immobilize edilmesi için tercih edilen malzemelerdir (Kumar ve Kumar, 2011).

Bazı araştırmacılar, geopolimer malzeme üretiminde UKÜ'lerin kullanım kolaylığı sağladığı ve nihai malzemelerde verimli işlenebilirlik özelliği sunduğunu belirtmişlerdir (Palomo vd., 1999; Skvara ve Bohunek, 1999; Swanepoel ve Strydom, 2002; Fernandez-Jimenez ve Palomo, 2003; Bakharev 2005c; Hardjito vd., 2005b; Puri vd., 2008; Kumar ve Kumar, 2011).

Portland çimentosu üretiminde kullanılan UKÜ'nün yapısının, termik enerji santralinin performansına ve verimliliğine bağlı olarak, kömür kaynağının kimyasal ve mineralojik bileşimi ve özellikle yanmamış karbon kalıntılarının içeriğine göre önemli ölçüde değişiklik gösterdiği açıktır. Van Jaarsveld vd. (2003) UKÜ kaynaklı geopolimerlerin nihai yapısının ve fiziksel özelliklerinin eklenen su içeriği, kürlleme süresi, partikül boyutu ve amorf düzeni gibi çeşitli materyal parametrelerine bağlı olduğunu ileri sürmüşlerdir (Van Jaarsveld vd., 2003; Temuujin ve Riessen, 2009).

Beton endüstrisinde Portland çimentosunun kızdırma kaybı (LOI) değerlerinin %6'dan az olması koşulu ile UKÜ kullanılmasına karar verilmiştir. Kızdırma kaybından sorumlu ve yüksek karbon içeriğine sahip UKÜ'den yapılmış geopolimer malzemelerde, UKÜ'lerin yapısında bulunan yanmamış karbon istenmeyen bir faktördür. UKÜ'nün kullanıldığı geopolimer malzemelerde; geopolimer betonun elektriksel iletkenliği yüksektir, işlenen geopolimer harç daha koyu renktedir ve harcın istenen kıvama gelmesi için ihtiyaç duyulan su ve katkı maddelerinde artış gözlenmektedir (Ha vd., 2005; Temuujin ve Riessen, 2009).

Geopolimer harcın koyu renkte olması UKÜ'nün karbon içermesinden kaynaklandığından dolayı karbon içermeyen UKÜ bazlı geopolimerlerin karbon içeren UKÜ bazlı geopolimerlerden daha iyi mekanik özelliklere sahip olması beklenir (Thomas, 1997; Temuujin ve Riessen, 2009). Ayrıca mekanik özellikler açısından, UKÜ içeren geopolimer betonun su ve kül oranının kontrol edilmesi önemli ve dikkate alınması gereken bir konudur, çünkü su oranının ayarlanamaması yapısal bozulmalara neden olmaktadır (Hardjito ve Rangan, 2005; Rangan, 2008; Temuujin ve Riessen, 2009).

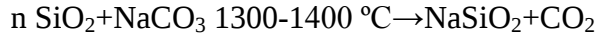
Alkali çözeltiler tarafından aktive edilen ve UKÜ bazlı alternatif bir bağlayıcı olarak sınıflandırılan geopolimerler, Portland Çimento'lu betonun, karbon ayakizini azaltma potansiyeline sahiptirler (Turner ve Collins, 2013).

2.3.2 Geopolimerlerin sınıflandırılması

Tanımlanmış 9 tip geopolimer malzeme mevcuttur.

2.3.2.1 Camsuyu esaslı geopolimer

Camsuyu, geopolimer hamurunun işlenebilirliğini ve kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesini sağlayan en önemli bileşen alkali silikat olarak da isimlendirilen, kum içerisindeki kuartz mineralini oluşturan silikat moleküllerinin alkali tuzlar etkisinde ergitilmesi ve suda çözünmesi ile elde edilir. Oluşumunu gösteren kimyasal denklem aşağıdaki gibidir:



Yapılan araştırmalar ile M.Ö. 3600 yılında Eski Mısır'da bağlayıcı olarak mezar heykelleri ve seramik yapımında, alkali silikatların kullanıldığı keşfedilmiştir (Duxson and Provis, 2005; Yeşilyurt, 2013). Günümüz teknolojesi ile kuartz kumu ve sodyum karbonatın 1300-1400 °C eritilmesi ve su içinde soğutulması ile sıvı ya da öğütölmüş granüle alkali silikatlar elde edilir. Eski çağlarda bu sıcaklığı sağlayacak bir kimyasal teknolojinin olmadığı açıktır. Mısır'daki ilk üretim bol silis bulunduran buğday arpa ve kamış küllerinin opal çakmaktaşı ve krisokolla çakmaktaşı gibi içlerinde tuttıkları suyunda etkisi ile SiO₂ molekölü bağlarının kuartzla kıyasla biraz daha zayıf olduğu volkanik taşlarla birlikte öğüterek elde ettikleri katı karışımı, özellikle soda gölleri içinde bulunan sodyum karbonat, sodyum klorür ve sodyum sülfat alkali tuzlarının sulu çözeltisi ile 620 °C sıcaklıkta kimyasal reaksiyona sokarak eriyik halinde (Na, K, SiO₂) alkali silikatlar elde edip yapı ve heykellerinde kullandıkları düşünölmektedir (Davidovits, 2008a; Yeşilyurt, 2013).

Analitik kimya, geopolimer üretiminde önemli bir bileşen olan çözünür silikatları 19. yüzyılda ortaya çıkarmıştır. İlk kâşifi olan Von Glauber tarafından (oleum silisium) silis yağı olarak isimlendirilen çözünür silikat bitki külleri içindeki potasyum karbonat ile kuartz kumunun birlikte eritilmesi ile üretilmiştir. Johann Von Fuchs (Wasser glass) camsuyu ismi ile 1818'de ürünün patentini almıştır. Daha sonraları KCO₃ ile SiO₂'in çözündüğü alkali ürün elde edilmiş ve taş likörü olarak isimlendirilmiştir (Davidovits, 2008b; Yeşilyurt, 2013).

Deterjan, yapıştırıcı, diş macunu bileşeni ve korozyon önleyici yapımında kullanılan alkali silikatlar zeolit sentezi, silika jel (silikon) ve geopolimer üretiminde de önemli bir hammaddedir. Toz ve sıvı olarak ticari kullanımı mevcuttur (Davidovits, 2008b; Yeşilyurt, 2013).

Hidrotermal üretim prosesi ile silika dumanının NaOH ya da KOH ile 600-800 °C sıcaklarda tepkimeye girmesi ile elde edilen ürün -çok yüksek düzeyde yabancı tortu içermekle birlikte- silis dumanının hammadde olarak kullanımı ile üretiminde daha az ısı enerjisinin tüketildiği camsuyu üretim tekniğidir. Hidrotermal proses pek kullanılmamakla beraber özellikle geopolimer hamurunun aktifleştirilmesinde

kullanılan sodyum metasilikati daha kolay ve ucuz elde edebilmek için geopolimer laboratuvarlarında kullanılabilir (Roy, 1999).

Na veya K bazlı olması alkali silikatların suda çözünürlüğünü farklı etkilemektedir. Suda çözünürlük geopolimer sentezi için önemlidir. Dolayısıyla potasyum bazlı alkali silikatların kullanımının geopolimer pastasının özelliklerini iyileştireceği gözlenmektedir (Yeşilyurt, 2013).

2.3.2.2 Kaolin hidrosodalit esaslı geopolimer

Al ve Si oksitli bileşiklerin geopolimer oluşturan 3 boyutlu bağ yapısına ulaşabilmesi için moleküllerin bağ yapma özellikleri iyi değerlendirilmelidir. Seçilecek malzemenin karışım oranları ve uygulanacak ısı işlemler buna göre belirlenmelidir. Kaolin kilinin mineral kompozisyonu zeolit kristallerini elde etmek için oldukça uygun iken 100 °C altındaki geopolimer sentezi, alüminyumun oluşturduğu hidroksil iyonlarının bağlı olduğu cipsit kristallerinden dolayı oldukça zordur. Kaolin kilinin kimyasal yapısı şu şekildedir (Yeşilyurt, 2013): $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ veya $Al_2Si_2O_5(OH)_4$.

Doğada elde edilen kaolin A, B, C olmak üzere üç tip kompozisyonda bulunmaktadır:

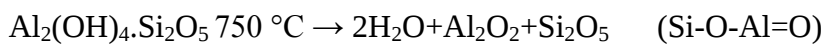
A tipi kaolin %94 kaolin, %6 kuartz ve muskovit,

B tipi kaolin %92 kaolin, %8 montmorillonit, anastaz ve kuartz,

C tipi kaolin ise %33 kaolin, %66 kuartz muskovit ve profilite içerir.

2.3.2.3 Metakaolin esaslı geopolimer

Kaolin 750 °C sıcaklıkta fırınlandığında dehidroksilasyona uğrar ve su molekülleri ayrıştığında alumina silikat oksitler elde edilir. Bu yapı metakaolin (MK) ya da kandoksi MK 750 olarak adlandırılmaktadır.



Metakaolin + alkali silikat + alkali tuz → mineral polimer rezene

Metakaolin tanecik büyüklüğü kaolin killlerinden daha yüksektir. Bu durum fırınlama etkisiyle kil taneciklerinin genleşmesinden kaynaklanmaktadır (Yeşilyurt, 2013).

2.3.2.4 Kalsiyum esaslı geopolimer

Kalsiyum esaslı geopolimer reaksiyonu Al-O ve Si-O moleküllerinin etkileşimi sonucunda oluşmaktadır. Kalsiyumun suda çözünürlüğünün az olması geopolimer reaksiyonunun yavaş ilerlemesine yol açar. Ayrıca oluşan ürünlerin erken dayanımı da düşüktür (Yeşilyurt, 2013).

2.3.2.5 Kayaç esaslı geopolimer

Doğal jeolojik oluşumlu kil kayaçlar geçirimsizliklerinin yüksek olması yönü ile radyoaktif atık depolama sistemlerinde kullanıma uygundurlar. Yüksek ve düşük değişken pH'lı radyoaktif çözeltiler -içerisine hapsedildikleri malzemeyi delerek-depolardan sızmakta ve yeraltı sularının kirlenmesi tehdidini oluşturmaktadırlar. Özellikle Portland çimentolu beton esaslı depolar oldukça kolay aşınmakta, yeraltı suyuna karışan sızıntılar oluşmakta, ayrıca iptal olmuş nükleer santralin atıkları çimentonun hidrotermal reaksiyonunun da etkisi ile sürekli ısınan nükleer bombalara dönüşmektedir. Patlamadan sonra Portland çimentolu betonla kaplanan Çernobil santrali bunun en korkunç örneğidir ve bilim adamlarına göre hala tehlike arz etmektedir (Davidovits and Comrie, 1988; Yeşilyurt, 2013).

Kil kayaçların esaslı olan feldispatoitler ve kumu oluşturan kuartz yeryüzünde en çok bulunan toprak madenler olmakla birlikte kimyasal potansiyelleri tam olarak bilinmemektedir. Diğer geopolimer oluşumlarından farklı olarak kayaç esaslı geopolimer sentezinde farklı tipteki kayaçların asit içersinde çözünmesi söz konusudur. Cs, Co, Sr, Tc, U ve Cr gibi radyoaktif elementlerin düşürülmüş enerjili atık izotopları asit çözeltiler içinde reaktifliklerini tamamen yitirmekte, ancak yine de hiperalkalin çözeltiler oluşturmaktadır. Çözünmüş alümino silikat kaynağı kayaç daha sonra alkali tuz ve silikat çözeltilerinin etkisi ile geopolimere dönüşmektedir (Davidovits and Comrie, 1988; Yeşilyurt, 2013).

Geopolimer beton, Portland çimentolu betona göre 2-3 kat daha fazla çekme dayanımına sahiptir. Ayrıca potasyum polisialat esaslı geopolimerlerin donma çözülme dayanımları da daha iyidir. Geopolimer, doğaya zarar veren arsenik, sülfürik asit, radyoaktif atıkların immobilize edilmesinde, katılaştırılmasında (solidifikasyon) gelecek vadetmektedir (Davidovits and Comrie, 1988; Yeşilyurt, 2013).

2.3.2.6 Silika-esaslı geopolimer

Mavi emaye kaplamalı silis esaslı fayanslar M.Ö. 3000 yıllarında Mısır piramitlerinde kullanılmıştır. Emaye kaplama fayans teknolojisi 1000 °C sıcaklık gerektirmekle birlikte emayeleşmenin vereceği parlaklık silis esaslı geopolimer ile 200 °C’de gerçekleşmektedir. Bu kimyasal sistemin eski Mısırlılar tarafından da keşfedildiği düşünülmektedir (Davidovits, 2008b; Yeşilyurt, 2013).

Silis esaslı malzemelere tarihi bir diğer örnek, M.Ö 200’lü yıllarda Hun saldırılarını durdurmak için Çinliler tarafından inşa edilen ve günümüze kadar dayanan Çin Seddi’dir. Çin Seddi’nin harcında %80 civarında silis SiO_2 içeren pirinç çentiği külü ve sönmüş kireç Ca(OH)_2 bulunmaktadır (Davidovits, 2008b; Yeşilyurt, 2013).

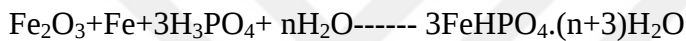
Günümüzdeki SiO_2 kaynağı ise kuartzın 3-10 μm aralığında öğütülmesi ile üretilen silis tozu ve ferrosilikon çelik üretiminde açığa çıkan 0.05-1 μm silis dumanıdır. Silis tozu yüzey kaplaması aşınma yüzeyi ve parlak seramik yüzey üretiminde ince dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır (Davidovits, 2008b; Yeşilyurt, 2013).

Silis dumanının çimentolu beton içinde filler ve puzolan olarak kullanımı mevcuttur. SiO mükemmel bir puzolan malzemedir. Geopolimer sentezinde silis dumanı, NaOH ve KOH gibi alkaliler ile oldukça kolay aktifleştirilebilir. Çözünür silikat ve siloksonatlar içindeki silis partikülleri nano geopolimer üretimini sağlamaktadır. Oluşan nanopolisilanol geopolimer ile ısı ve yangın dayanımı yüksek paslanmaz çelik boyaları üretilbileceği gibi, yüksek ısı direnci olan seramik malzemeler de üretilir (Davidovits, 2008b; Yeşilyurt, 2013).

2.3.2.7 Fosfat esaslı geopolimer

Mısır'da Giza piramitlerinin en büyüğü olan Keops piramidinin iç kısmından alınan bir örneğin 1982 yılındaki X ışınları incelemesinde CaCO_3 (kireçtaşı) ve SiO_2 oluşan matris içinde beyaz kaplamaya kırmızı ton veren fosfat molekülleri ile karşılaşmış ve bu farklı yapının da kristal hidroksiapatitten oluşmuş bir geopolimerik sistem olduğu düşünülmüştür (Barsoum vd., 1989; Yeşilyurt, 2013).

Diğer geopolimer sentezlerinden farklı olarak fosfat esaslı geopolimer düşük pH'lı ortamda iki veya üç değerlikli bir metal oksitin H_3PO_4 (ortofosforik asit) içinde asit baz reaksiyonları vermesi ile sentezlenmektedir:



Fosfat esaslı geopolimer diş protez harcı üretiminde yapı malzemesi üretiminde kullanıldığı gibi en önemli kullanım alanlarından biri de radyoaktif atık depolama işleminde kullanılmasıdır. Fosfat esaslı geopolimer ile ilgili çalışmalar oldukça kısıtlı olmakla beraber gelecek vadede bir araştırma konusu olduğu düşünülmektedir (Davidovits, 2008b; Yeşilyurt, 2013).

2.3.2.8 Organik maden esaslı geopolimer

Hidrokarbon bağ yapılı organik polimerler ile polisialat geopolimer yapısı kullanılarak üç tip malzeme sentezi yapılabilmektedir. Hümik asitin jeolojik mineraller üzerinde yoğunlaşması ile poli organo siloksan yapısı ve kerojen elde edilebildiği gibi organik polimerleri mineral geopolimere karıştırma ve emdirme işlemleri ile de organo-geopolimer bileşikler elde edilir (Davidovits, 2008b; Yeşilyurt, 2013).

Organik polimerlerin inorganik yapıya eklenmesi malzemenin dayanım ve dayanıklılığını arttırmaktadır. Kerojen, mikroorganizmalar etkisinde ölü canlı hücre ve dokularının bozulmasından oluşan humik ve fluvik asit içersinde sentezlenen bir biopolimerdir. Jeolojik kayaç ve kil esaslı geopolimerin humik, malik, aspartik asitlere olan direnci düşüktür. Kerojenin asit içinde sentezlenen inorganik ve organik

polimerleri kapsayan ağ yapısı asit ve iklim şartlarından daha az etkilenen malzemelerin üretimini sağlayabilecektir (Yeşilyurt, 2013).

2.3.2.9 Uçucu kül bazlı geopolimer

Uçucu küllü geopolimer, düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip alternatif bir hafif yapı malzemesidir ve geliştirilen bu malzemenin mekanik mukavemet değerleri yüksektir (Aydın ve Pehlivanlı, 2017).

2.3.3 Geopolimerlerin uygulama alanları

Geopolimer, yüksek mukavemet, düşük büzülme, düşük karbon emisyonu, sülfat ve aside dirençli özellikleri nedeniyle inşaat malzemeleri ve tehlikeli atık yönetimi konusunda dikkat çekici bir malzeme olmuştur (Duxson vd., 2007; Komnitsas ve Zaharaki, 2007; Temuujin vd., 2009).

Geopolimer göstermiş olduğu mükemmel fiziksel ve kimyasal özellikleriyle prefabrik yapı endüstrisi taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı malzemeleri, heykeltçilik ve süsleme sanatları, beton esaslı yol kaplamaları, zemin iyileştirme, zehirli ve nükleer atıkların depolanması, refrakter seramik malzeme üretimi, ağır iklim şartlarına ve yangına dayanıklı duvar kaplaması üretimi, güçlendirme, tarihsel yapıların taşıyıcı sistemlerinin restorasyonu, uçak ve yarış arabası endüstrisi ve nükleer santrallerde kullanılabilir. Kullanılan teknolojinin gelişmişlik düzeyine, seçilen kimyasal oranlara göre ve toprak esaslı hammaddede yapılan fiziksel iyileştirmelerle geopolimere -pek çok seramik malzeme de olduğu gibi- istenilen fiziksel özellikler kazandırılabilir.

Geopolimerler bol ham madde kaynağına, düşük CO₂ salımına, düşük enerji tüketimine, düşük üretim fiyatına, yüksek erken dayanım ve hızlı dayanım kazanma gibi olumlu özellikleri sayesinde mühendislik alanında inşaat, otomotiv, havacılık, metalürji ve plastik endüstrisinde kullanıma uygundur. Ayrıca atık yönetimi, sanat ve dekorasyon gibi benzer birçok alanda kullanıma uygun hale gelmiştir. Bunlar arasında drenaj kollektörü, yem deposu, demiryolu sev betonu ve yerinde dökme beton inşaat alanları, biri 2 katlı diğeri 15 katlı konut inşaatı, 1999-2000 yılları arasında yapılmış inşaatlar ve

betonlar, ağır yüklü (50-60 ton) kamyon trafiğine açık döşemeler, 24 katlı konut binası ve ön gerilmeli donatılı beton demiryolu traversleri de mevcuttur (Yang vd., 2007).

Aynı şekilde Pyrament ticari ismindeki geopolimerik çimento pastası, 1984 yılında Amerika'da havaalanı betonu dökümünde Portland çimentolu betonla karıştırılarak kullanılmış ve 6 saat içinde uçağın inebileceği dayanım ve sertlikte beton elde edilmiştir. Betonun 28 günlük BDA'sı ise 80 MPa'dır.

Biyoaktif malzeme alanı, inorganik polimerlerin yeni alanlarından birisi olmakla birlikte kemik veya yumuşak dokuya bağlanabilme çalışmalarını kapsamaktadır. Geopolimerler bu alanda kullanıldıklarında reaksiyondan kaynaklanan yüksek derecede bazikliğin neden olduğu hücre zehirlenmesi ve alüminyum içerikleri nedeniyle problem oluşturmaktadırlar. Potasyum içeren geopolimerlerde yüksek baziklik, numunelerin 600°C'ye kadar ısıtılması ile giderilebilmektedir. Yüksek ısı kullanımı bazikliği azaltırken poroziteyi arttırmış ve bunun sonucunda kemik yapısına benzeyen malzemeler oluşmuştur (Bellosi ve Babini, 2008; Komnitsas 2011; Arıöz, 2015).

Geopolimerler klor penetrasyonuna karşı yüksek direnç özelliği ile birleştiğinde kullanımı için farklı alanlar açılmaktadır. Yapılan donma-çözünme testlerinde, malzemenin yapısında çok az bozulma görüldüğünden dolayı Dünya'nın birçok bölgesinde büyük ilgi görmüştür. Geopolimerler yol yapımında kullanıldıklarında Portland çimentosuna göre donma-çözünme döngüsünde ve buzlanmanın önlenmesinde daha başarılıdırlar (Duxon vd., 2007a; Arıöz, 2015).

2.4 Literatür Özeti

Termik santrallerde kömür yakılması sonucu ortaya çıkan UKÜ üzerinde yapılan araştırmalar son 25 yılda yoğunlaşmıştır. Özellikle UKÜ ve YFC katkılı geopolimer harçlar hazırlanarak ekolojik yapı malzemesi üretimi araştırılmıştır (Seals, 1977).

Genel olarak UKÜ'nün kullanımına ilişkin çalışmalar 1930'lu yıllarda enerji endüstrisinin başlangıcı ile önem kazanmıştır. Davis vd. (1937), California Üniversitesi'nde betonda UKÜ kullanımı araştırmalarını yaygınlaştırmış ve bu çalışmalar UKÜ kullanımının temelini oluşturmuştur. Bununla birlikte 1970'lerin

başında enerji maliyetindeki hızla artış, kömür kullanımının hızlanmasına paralel olarak, UKÜ üretimindeki artışı beraberinde getirmiş ve UKÜ kullanımı tüm Dünya'da kabul görmüştür (Özcan, 1997; Üstün, 2006; Davis vd., 1937).

Aktivatörün türü ve konsantrasyonu, UKÜ'nün çözünmesi için önemli bir etkiye sahiptir. Al^{+3} ve Si^{+4} iyonlarının ayrışmasının, potasyum hidroksit çözeltisine kıyasla sodyum hidroksit içerisinde genellikle daha yüksek olduğu görülmüştür (Jaarsveld ve Van Deventer, 1999).

Serbest cam suyu bir alkalın aktivatörü olarak NaOH birlikte kullanıldığında, polimerizasyon işlemi, içinde daha fazla Si ve daha fazla mekanik mukavemetin olduğu bir reaksiyon ürününe yol açmıştır. Bu ifade Fernandez-Jimenez ve Palomo tarafından da desteklenmiştir, sadece NaOH yerine NaOH ve cam suyu kullanarak bir günlük kürlemeden sonra BDA'nın 40 ila 90 MPa arasında bir artış gösterdiğini göstermiştir (Criado vd., 2005).

Aktivatörün ideal konsantrasyonu, geopolimerin mekanik özelliklerini artırır. İdeal konsantrasyon dışında, geopolimer malzemenin yapısını değiştirebilen alkali-aktive edilmiş matristeki serbest OH ile güç karakteristiklerinde bazı kayıplar meydana gelebilir. Araştırmacılar, aktive edici konsantrasyonun mekanik dayanımı arttırmak için; deney sıcaklığı ve süresinden daha fazla etki ettiğine dikkat çekmiştir (De Vargas vd., 2011).

Yüksek fiziksel özellikler gösteren inorganik kimya ürünleri içinde bolca barındırdığı toprak mineralleri ve termoset polikondensasyon reaksiyonlu polimer kimyasıyla benzer reaksiyonlarla elde ediliyor olmasından dolayı Prof. Dr. Joseph Davidovits tarafından geopolimer olarak adlandırılmıştır. Ayrıca bu malzemelerin plastiği andıran parlak ve pürüzsüz yüzeyleri olması polimer isimlemesinin uygunluğunu göstermektedir.

Alkali ile aktive edilmiş bir UKÜ'den oluşan "geopolimer" olarak adlandırılan alternatif bir bağlayıcı, Portland çimentonun yerine kullanılmıştır. Geopolimerler Davidovits tarafından çimentolu hale gelmek için alkali aktivatörlerle reaksiyona giren

silikon (Si) ve Alüminyum (Al) bakımından zengin inorganik malzemeler olarak tanımlanmıştır (Davidovits, 1991; Turner ve Collins, 2013).

Geopolimer malzeme üretimi için alkali aktivatör olarak, sodyum ve potasyum silikatın yanı sıra sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) tercih edilmiştir (Davidovits, 1991; Palomo vd., 1999; Xu ve Deventer, 2000; Barbosa ve MacKenzie, 2003b; Duxson vd., 2007; Turner ve Collins, 2013). Sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) maliyet ve ulaşılabilirlik açısından değerlendirildiğinde en yaygın kullanılan alkali çözeltileri arasındadır. Portland çimentolu beton ile kıyaslanabilir bir BDA elde etmek için, geopolimer harç kalıplara döküldükten sonra en az 6 saat boyunca 40 ila 80 °C arasındaki sıcaklıkta kürlenmeye tabi tutulmuştur (Palomo vd., 1999; Hardjito vd., 2005c; Duxson vd., 2007; Turner ve Collins, 2013).

Geopolimerler bol ham madde kaynağına, düşük CO₂ yayımına, enerji tüketimine ve üretim fiyatına, yüksek erken dayanıma ve hızlı dayanım kazanma özelliğine sahiptir. Bu olumlu özellikleri sayesinde geopolimerler mühendislik alanında inşaat, otomotiv, havacılık, metalürji ve plastik endüstrisinde kullanıma uygundur. Ayrıca atık yönetimi, sanat ve dekorasyon gibi benzer birçok alanda kullanıma uygun hale gelmiştir (Gümüş, 2016).

Kömür külleri, metalurjik curuf, yapım ve yıkım atıkları gibi çeşitli katı atıklar veya yan ürünler ile geopolimer beton ve yapı elemanları üretiminde kullanılabilir. Bu malzemelerin en yeni kullanım alanı ise, nükleer atık yönetimi ve zehirli metallerin stabilizasyonu da dahil olmak üzere atık yönetimidir. Alkali alüminosilikat reaksiyonları, atıkları ortadan kaldırmada önemli bir role sahiptir. Bariyer olarak veya kapsüllemeye kullanıldığında hem matrisin geçirimsizliğini azaltır hem de fazların yapısında oluşan belli iyonları sabitleştirir. Zararlı radyoaktif atıklar bentonit, kaolin, halloysit ve dickite gibi killere reaksiyona girerek, dayanıklı monolitik katılar oluşturabilir. Genellikle radyoaktif veya zararlı bir atığın katılaştırılmasında, atığın kendisi oldukça alkalidir ve aktivatör olarak iş görür. Alkali atık olmadığı durumda, sodyum veya potasyum tuzları alkali metallerin hidroksitlerini oluşturmak için alkaline toprak hidroksitlerle (örneğin kireç) karıştırılabilirler (Gümüş, 2016).

Lee vd. (2019) çalışmalarında UKÜ, YFC, alumino-silikat malzemeler (sodyum alüminyum ve sodyum silikatlar) ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanarak dayanıklı geopolimer malzeme üretimi üzerine yoğunlaşmışlardır. Yüksek miktarda kullanılan NaOH konsantrasyonlarının, Al ve Si iyonlarının daha iyi çözünmesi ve alumino-silikat oluşumunun kuvvetlenmesinde artışa yol açmasıyla sonuçlandığını öngörmüşlerdir. Elde edilen test sonuçlarına göre, geopolimer betonun inşaat uygulamalarında gelişme potansiyelinin daha fazla olduğu yapılan deneyler ile ispatlanmıştır (Lee vd., 2019).

Hardjito vd. (2005) uzun kürleme süresinin geopolimer reaksiyonunun derecesinin belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını belirtmiştir. Ayrıca, kürleme süresinin geopolimerizasyon sürecini iyileştirdiğini ve daha yüksek BDA verdiğini bulmuşlardır (Hardjito vd., 2005d; Khale ve Chaudhary, 2007; Lee vd., 2019). Geopolimer reaksiyon sürecinde kullanılan NaOH, geopolimer malzemenin yapısı ve BDA üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Sıvı geopolimer harç fazındaki NaOH konsantrasyonu, çözünme işlemine ve aynı zamanda son yapıdaki katı parçacıkların bağlanmasına da etki etmektedir (Panias vd., 2007; Lee vd., 2019).

Bu tez çalışmasında amaç, termik santral ve endüstrilerde kömür yakılması sonucu fazla miktarda ortaya çıkan ve çevresel olarak sorunlara yol açan UKÜ'nün yeniden kullanımı (reuse) ile inşaat sektöründe ihtiyaç duyulan yüksek dayanıma sahip geopolimer malzemenin üretilerek çevre sorunlarının en aza indirgenmesini sağlamaktır. Bu çalışmada endüstriyel bir katı atık/yan ürün olan UKÜ'den geopolimer kompozit malzeme üretilebilirliği araştırılmıştır. Aynı zamanda UKÜ ve kimyasal bağlayıcılar (sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3)) ile çevre ve inşaat sektöründe önemli bir yere sahip geopolimer kompozit malzemelerin üretimi ve performans değerlendirmesi yapılmıştır.

BÖLÜM III

MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

Bu tez çalışmasının materyalleri UKÜ, Rilem Cembureau standart kumu, alkali aktivatörler (NaOH ve Na₂SiO₃) ve sudur. UKÜ'ler, Zonguldak Çatalağzı Termik Santrali ve Adana İskan Sugözü Termik Santrali'nden sağlanmıştır. UKÜ'lerin kimyasal kompozisyon analizi incelediğinde, her iki külün de SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ bileşiklerini %70'den fazla oranda içerdikleri görülmüştür (Çizelge 3.1). CaO miktarı %10'un altında olduğundan her iki atık kül de F sınıfı UKÜ'dür (ASTM C618, 2000).

3.1.1 UKÜ test ve analizleri

3.1.1.1 UKÜ kimyasal analizi ve morfolojisi

UKÜ'lerin kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları Çizelge 3.1'de ve kimyasal kompozisyon analizinin gerçekleştirildiği cihaz olan X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) (Panalytical/Zetium) Fotoğraf 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. UKÜ'lerin fiziksel ve kimyasal analizleri

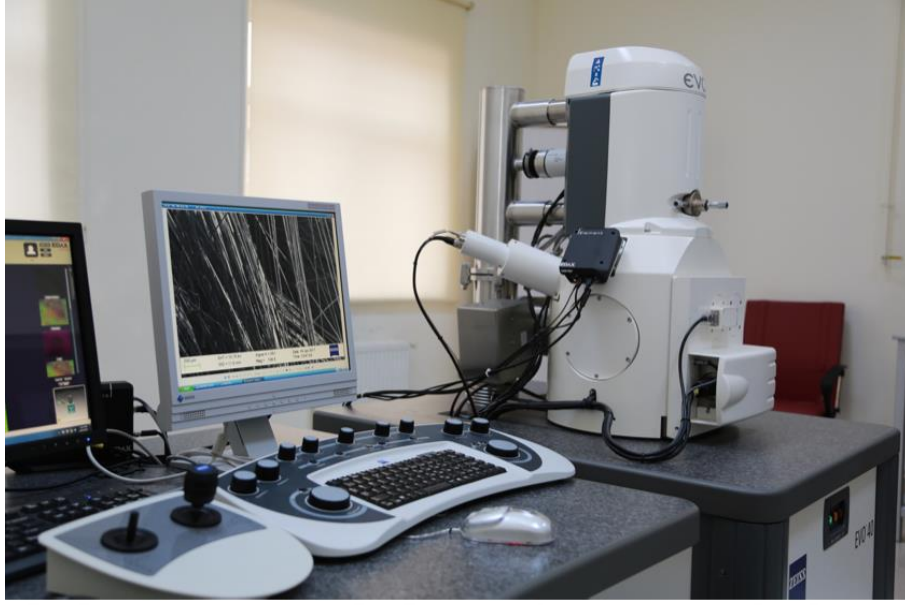
Parametre (%)	Çatalağzı UKÜ (ÇUKÜ)	İskan UKÜ (İUKÜ)
CaO	1,77	1,53
SiO ₂	42,12	62,28
Al ₂ O ₃	20,27	21,46
Fe ₂ O ₃	6,07	7,01
MgO	1,44	2,37
SO ₃	0,31	0,07
K ₂ O	3,81	3,81
Na ₂ O	0,26	0,26
Kızdırma Kaybı	1,52	1,78
Özgül Ağırlık	2,04	2,25
BET (m ² /g)	1,11	2,26

ÇUKÜ ve İUKÜ'lerde Al_2O_3 ve SiO_2 kayda değer ölçüde fazla ($>20\%$ ve 40%), diğer bileşenler ise az ($<7\%$) miktarda bulunmaktadır (Çizelge 3.1). Bu iki bileşimin toplamının ÇUKÜ ve İUKÜ'lerde yüksek (sırasıyla $62,39\%$ ve $83,74\%$) olması nedeniyle, bu atık küller geopolimer kompozit malzeme üretiminde hammadde olarak kullanılmaya çok uygundur.

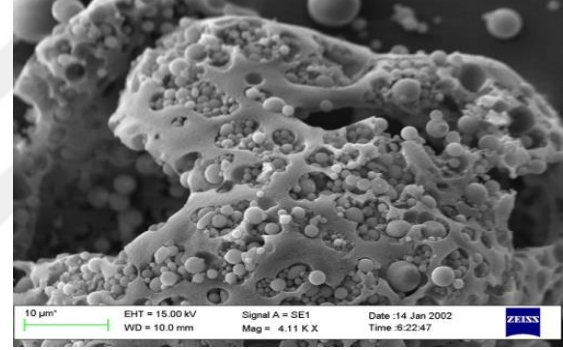
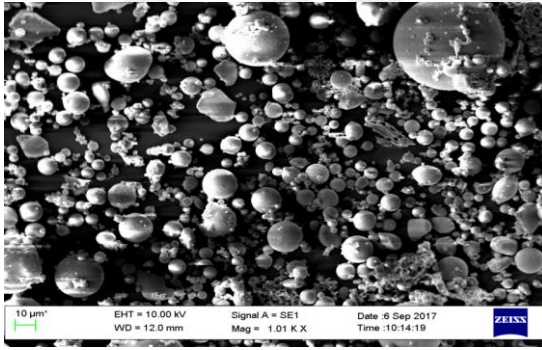


Fotoğraf 3.1. UKÜ'lerin kimyasal analizi için kullanılan XRF

ÇUKÜ ve İUKÜ'nün Zeiss/Evo 40 marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak (Fotoğraf 3.2) gerçekleştirilen detaylı yüksek çözünürlüklü görüntüleri Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, ÇUKÜ ve İUKÜ'lerinin yüzeylerinin nispeten pürüzsüz ve farklı olduğu yorumlanmıştır.



Fotoğraf 3.2. UKÜ'nün morfolojisinin belirlenmesinde kullanılan SEM



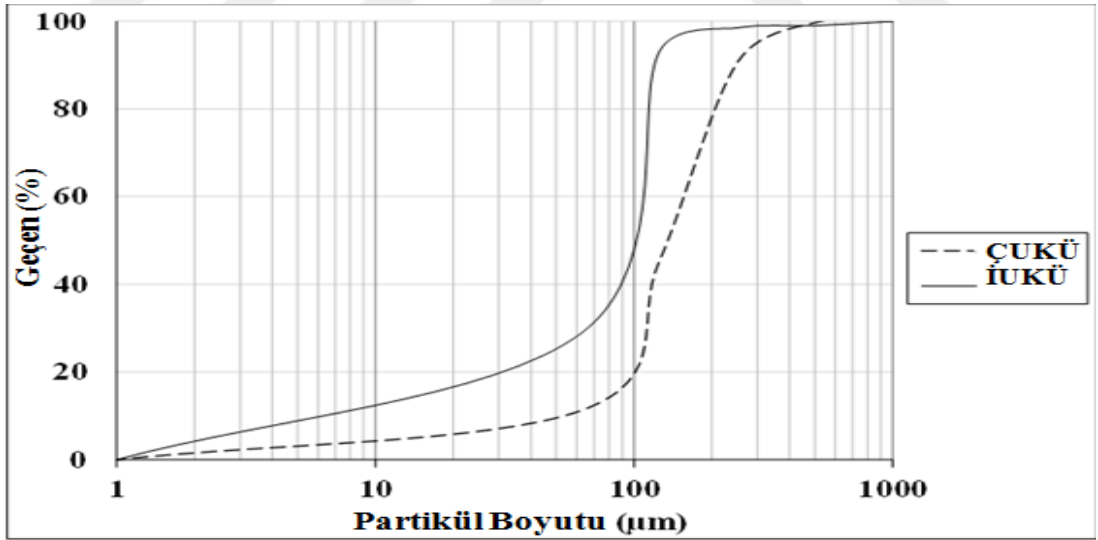
Şekil 3.1. ÇUKÜ (sol) ve İUKÜ (sağ) detaylı yüksek çözünürlüklü görüntüleri (SEM analizi)

3.1.1.2 UKÜ elek analizi ve yüzey alanı ölçümü

UKÜ'lerin elek analizi (Fotoğraf 3.3), TS EN 933-10'a göre yapılmıştır. İUKÜ'nün ÇUKÜ'ye göre daha ince tanecikli olduğu gözlenmiştir (Şekil 3.2).



Fotoğraf 3.3. Elek analizinin gerçekleştirildiği cihaz



Şekil 3.2. UKÜ'lerin granülometrik dağılımı

Bu atık küller, yüzey alanı ölçüm cihazı (BET, Quantachrome/NOVA Touch LX4 marka) ile analizlenmiştir. BET cihazı (Fotoğraf 3.4) toz formunda olan UKÜ'lerde fiziksel adsorpsiyon yöntemiyle düşük basınç ve yüksek çözünürlükte yüzey alanı ölçümü, mikro, mezo ve makro gözenek boyutunu belirleyebilmekte ve gözenek boyut

dağılımını tespit edebilmektedir. Bu tezde hammadde olarak kullanılan ÇUKÜ ve İUKÜ yüzey alan değerleri sırasıyla 1,11 ve 2,26 m²/g bulunmuştur (Çizelge 3.1).



Fotoğraf 3.4. UKÜ yüzey alanı ölçümünü yapan BET cihazı

3.1.1.3 UKÜ'de yanabilir madde verim hesabı

UKÜ'de yanabilir madde verim hesabı yapabilmek için deneyin gerçekleştirileceği krozenin darası alınmıştır. Atık kül numunesi, 105 °C'ye ayarlanmış etüvde 24 saat süresince bekletilmiş ve desikatörde soğumaya bırakılmıştır. Hassas terazide tartım yapılarak bu etüv kurusuna getirilen numuneden 20 g UKÜ kroze konulmuştur. Daha sonra, otomatik olarak ayarlanabilen kül fırınında 750 °C'de 2 saat süresince bekletilmiş, yeniden desikatöre alınarak soğumaya bırakılmıştır. Yanabilir madde verimi=(Numune ağırlığı-(y-x)/Numune ağırlığı))x100 şeklinde hesaplanmıştır (Etüv sonrası kroze+UKÜ=y, Kroze darası=x, Numune ağırlığı=20 g). Bu çalışmanın hammaddeleri olan ÇUKÜ ve İUKÜ'lerinin yanıcı madde miktarı sırasıyla %7 ve %9 olarak bulunmuştur.

3.1.1.4 UKÜ'de gevşek ve sıkışık BHA deneyi

BHA değerleri, agreganın granülometrisine, malzemenin küreselliğine, yerleştirme şekline ve agreganın özgül ağırlığına bağlıdır. Bu tezde hammadde olarak kullanılan

UKÜ'lerin sıkışık BHA değerleri titreşim uygulanarak külün yerleştirilmesi ile elde edilmiştir ve aşağıda verildiği şekilde hesaplanmıştır:

- ÇUKÜ hava kurusu gevşek ve sıkışık BHA: 0,87 ve 1,04 g/cm³, etüv kurusu gevşek ve sıkışık BHA: 0,75 ve 0,88 g/cm³
- İUKÜ hava kurusu gevşek ve sıkışık BHA: 1,10 ve 1,14 g/cm³, etüv kurusu gevşek ve sıkışık BHA: 0,98 ve 1,05 g/cm³

3.1.2 Rilem Cemburea kumu

Tezin 2. materyali, ince agrega olarak kullanılan Rilem Cembureau (TSE EN 196-1, 2009) standart kumdur (Fotoğraf 3.4). Kumun özgül ağırlığı ve yoğunluğu sırasıyla 2,56 ve 1,35 g/cm³'dür. Kuma ait elek analizi Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.



Fotoğraf 3.4. Rilem Cembureau standart kum

Çizelge 3.2. Rilem Cembureau standart kumunun özellikleri

Kum dane çapı (mm)	0,08	0,16	0,5	1	1,6	2
Kalan (%)	99	87	72	34	6	0
Spesifik limit (%)	99±1	99±5	67±5	33±5	7±5	0

3.1.3 Alkali aktivatörler

Tezde materyal olarak kullanılan alkali aktivatörler, çözünmüş halde bulunan 12 M sıvı sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikattır (Na_2SiO_3) ($\text{Na}_2\text{O}=\%14.7$, $\text{SiO}_2=\%29.4$ ve $\text{H}_2\text{O}=55.9$) (Fotoğraf 3.5) .



Fotoğraf 3.5. Sodyum hidroksit (NaOH) (a) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) (b)

3.1.4 Su

Çalışmada karışım suyu olarak Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi kampüsü şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2 Metot

Bu tezde UKÜ, alkali aktivatörler, Rilem Cembureau standart kumu ve su kullanılarak üretilen geopolimer kompozit numuneler üzerinde fiziksel (BHA, su emme ve porozite) ve mekanik testler (BDA, EDA) sırasıyla ASTM C642, ASTM C349, ASTM C348 standartları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geopolimer malzemelerin kimyasal analizleri Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı ve fiziksel-mekanik testleri ise Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

3.2.1 Birim hacim ağırlığı

Geopolimer kompozit numunelerinin BHA'sı, numuneler etüvde kürlenip oda sıcaklığına hazır hale getirildiklerinde hesaplanmıştır. Üçer adet numunenin BHA'sının aritmetik ortalaması alınarak o gruba ait BHA elde edilmiştir. BHA'nın belirlenmesinde ASTM C642 (2013) standardı esas alınmıştır. BHA hesaplanmasında ise aşağıdaki 3.1 eşitliğinden faydalanılmıştır.

$$\gamma_k = \frac{G_k}{V_k} (g / cm^3) \quad (3.1)$$

Bu bağıntıda;

γ_k : Numune BHA'ları (g/cm^3)

G_k : Numune hava kurusu ağırlığı

V_k : Numunelerin brüt hacmi (uzunluk, genişlik ve yükseklik çarpımı) olarak tanımlanmıştır.

Geopolimer kompozit numunelerinin yüzeylerinde oluşan kabarma ve çatlama, BHA deneyinden önce, spatula yardımı ile temizlenmiştir. Daha sonra metre kullanılarak oda sıcaklığında ölçülerek ebatları belirlenmiştir. Son olarak numunelerin kütlesi, önceden darası alınmış ise 0,5 g hassasiyetindeki terazide tartılmıştır. BHA hesabı 1, 7, 28 ve 90. günlerde yapılmıştır.

3.2.2 Eğilme dayanımı

EDA testinde, ASTM C348 (2014) standardı baz alınarak, 4x4x16 cm boyutundaki dikdörtgen prizması biçimindeki geopolimer kompozit numunelere, üç noktada yük uygulayan eğilme düzeneği ile malzeme kırılana kadar tek yönde yük uygulanmıştır (Fotoğraf 3.6). EDA testleri 7, 28 ve 90. gün sonunda gerçekleştirilmiştir. Aşağıda verilen 3.2 bağıntısı eğilme testi hesabını açıklamaktadır.

$$\sigma_e = \frac{1,5 \times P \times L \times d^2}{b \times x} (MPa) \quad (3.2)$$

σ_e : EDA (MPa)

d: Kalıbın iç boyut uzunluğu (mm)

b: Kalıbın iç yüksekliği (mm)

P: Kopma yükü (kN)

L: Rulman aralığı (mm)



Fotoğraf 3.6. Eğilme testi yapılışı

3.2.3 Basınç dayanımı

BDA testinde ASTM C349 (2014) standardı kullanılmıştır. BDA deneyine başlamadan önce, geopolimer kompozit numunelerde yeniden boyut ölçümü yapılmış, numunenin düz yüzeyi pres tablasına denk gelecek biçimde yerleştirilmiştir. BDA testi yapılacak numune üzerinde eşit basınç uygulanmış, değişmez yükleme hızında (3 dk), ne kadar yüke dayandığını belirlemek için kırılmış ve BDA değerleri pres makinesinde

ölçülmüştür. BDA hesaplanmasında 3.3 eşitliği kullanılmıştır. BDA testinin yapılışı Fotoğraf 3.7'de gösterilmiştir.

$$\sigma_b = \frac{P}{A} (MPa) \quad (3.3)$$

σ_b : BDA (MPa)

P: Kopma yükü (kN)

A: Yüzey alanı (mm²)



Fotoğraf 3.7. Basınç dayanımı testinin yapılışı

3.2.4 Su emme

Su emme ASTM C642 (2013) standardına göre bulunmuştur. Geopolimer kompozit numunelerde su emme testi yapılırken, 0,1 g hassasiyetli terazi, etüv ve geniş daralı derin kaplar kullanılmıştır. Geopolimer kompozit numuneler etüvde 100 °C'de 24 saat kurutulmuştur. Ardından numuneler etüv kurusu durumuna getirildikten sonra tartılmış ve G_k ağırlığı belirlenmiştir. Daha sonra numuneler, içi 20-25 °C'lik su dolu, geniş daralı bir

kabın içerisine yerleştirilip 24 saat bekletilmiştir. 24 saatin sonunda sudan çıkarılan numuneler ve yüzeylerinde bulunan kaba su alındıktan sonra hassas terazide tartılıp tekrar suyun içerisine bırakılmıştır ve sabit ağırlığı bulunmuştur (G_d). Son olarak suya doymuş numuneler, Archimedes terazisinde tartıldıktan sonra su içindeki kütleleri belirlenmiştir.

Aşağıda verilen eşitliklerde numunelerin ağırlıkça ve hacimce su emme yüzdeleri (S_k), hesaplanmıştır.

Ağırlıkça su emme yüzdesi (%),

$$S_k = \frac{G_d - G_k}{G_k} 100(\%) \quad (3.4 a)$$

Hacimce su emme yüzdesi (%),

$$S_h = \frac{G_d - G_k}{G_d - G_{ds}} 100(\%) \quad (3.4 b)$$

S_k : Ağırlıkça su emme yüzdesi (%),

S_h : Hacimce su emme yüzdesi (%),

G_d : Doymuş numune kütlesi,

G_k : Kuru numune kütlesi

G_{ds} : Archimedes terazisi ile numune kütlesi, şeklinde ifade edilmektedir.

3.2.5 Porozite

Geopolimer kompozit numunelerde porozite deneyi ASTM C642'ye göre yapılmıştır. Numunenin hacimce su emme oranı, aynı zamanda görünür porozitesidir. Geopolimer kompozit numunelerin porozitesi belirlenirken, su emme deneyinde kullanılan parametreler esas alınmıştır. Hesaplanması 3.5 eşitliğinde verilmiştir.

$$Pr = 1 \frac{\gamma_k}{\gamma_s} 100(\%) \quad (3.5)$$

Burada;

γ_k : BHA (g/cm³),

γ_s : Özgöl ağırlık (g/cm³),

P_r: Porozite (%).



BÖLÜM IV

DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Deney Materyallerinin Hazırlanması

ÇUKÜ ve İUKÜ laboratuvara alındıktan sonra 500 mm göz açıklığına sahip elekte elenip, elek altına geçen kısım deneyde kullanılmıştır. 3.1.1.4’de bahsedildiği gibi UKÜ’nün hava ve etüv kuru BHA’ları belirlenmiştir.

4.2 Geopolimer Numune Üretimi

UKÜ-alkali aktivatör karışım oranları birçok farklı denemeler içeren bir süreç sonrasında belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan UKÜ’ler ile alkali aktivatörlerin BHA’ları birbirinden çok farklı olmadığı için karışım parametrelerinin belirlenmesinde ağırlık esas dikkate alınmıştır. Rilem Cembureau standard kum (Çizelge 3.2), geopolimer karışım hazırlanmasında dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır (Fotoğraf 3.4).

Bu tez çalışmasında üretilen geopolimer kompozit numunelerde farklı karışım oranları ve farklı sıcaklıklar uygulanmıştır. Deney numunelerinin hazırlanmasında UKÜ ve Rilem kumunun ağırlık esasına göre oranları dikkate alınmıştır. Geopolimer kompozit numuneler 2 farklı (kumsuz ve kumlu) tip olarak üretilmiştir.

Birinci tip olan kumsuz geopolimer kompozit harçlar 1000 g UKÜ (ÇUKÜ ve İUKÜ) kullanılarak, NaOH ve Na₂SiO₃ oranlarının %10-15-20-25 karışımında sabit tutulmasıyla elde edilmiştir.

İkinci tip karışım olarak belirlenen kumlu geopolimer kompozit harçlarda, 400 g UKÜ ve 800 g Rilem kumu birlikte kullanılmıştır. NaOH/Na₂SiO₃ miktarı toplam malzemenin %20 ve %40’ı, kütlece oranı ise 1:1, 1:1,5, 1:2, 1:2,5 ve 1:3 olarak alınmıştır.

Geopolimer kompozit malzemelerin karıştırılmasında Fotoğraf 4.1'de gösterilen masa tipi mikser kullanılmıştır. Kumsuz geopolimer harç hazırlanırken, öncelikli olarak ön çalışmalarda belirlendiği üzere yeteri miktarda su, masa tipi mikserin içine konmuştur. Homojen olarak karıştırılan UKÜ ve Rilem kumu eklenerek 1 dk boyunca düşük hızda karıştırılmıştır. Daha sonra karışım önceliğine göre mikser orta hıza alınarak NaOH veya Na_2SiO_3 ilave edilip 3'er dakika boyunca karıştırılarak, ayrı ayrı NaOH ve Na_2SiO_3 için toplamda 4 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışımlar nispeten akışkan olduğu için burada karıştırma süresi kısa tutulmuştur.



Fotoğraf 4.1. Masa tipi mikser

Birinci tip harçlarda olduğu gibi UKÜ ve Rilem standart kumu önceden homojen duruma gelinceye kadar karıştırıldıktan sonra, mikserde hazır halde bulunan su ile birlikte düşük hızda 1 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışıma önce NaOH eklenmiş, 3 dakika karıştırıldıktan sonra Na_2SiO_3 eklenerek 3 dakika daha karıştırılmıştır. Karışımda kullanılan UKÜ ve materyallerin sentezlenmesi için 7 dakikanın yeterli olduğu kanısına varılmıştır.

Hazır hale getirilen her iki tip geopolimer kompozit numune harçları, kalıplara dökülerek 70 ve 100 °C'de 48-24 saat kürleme süresinden sonra, 7, 28 ve 90. günlerde yapılacak olan test süresine kadar oda sıcaklığında bekletilmiştir.

Tip 1 (Çizelge 4.1) ve Tip 2 (Çizelge 4.2) karışımlarına ait UKÜ, Rilem kumu, alkali aktivatörler (NaOH, Na₂SiO₃) ve kür sıcaklığı (70-100 °C) deney parametreleri verilmiştir.

Tip 1 (Çizelge 4.1) ve Tip 2 (Çizelge 4.2) deney parametrelerine ait üretilen, herbir karışım ve kür sıcaklığı için geopolimer kompozit numune sayısı 10 adettir.

Çizelge 4.1. Rilem kum kullanılmadan geopolimer yapı malzemesi üretim parametreleri

Numune	Ağırlıkça UKÜ (g)	NaOH ve Na ₂ SiO ₃ Karışım Oranları				Deney Sıcaklığı (°C)	
		%10	%15	%20	%25		
Tip 1	1000	200	300	400	500	70	100

Çizelge 4.2. Rilem kum kullanılarak geopolimer yapı malzemesi üretim parametreleri

Numune	Ağırlıkça UKÜ(g)	Standart Kum(g)	Alkali Aktivatör	NaOH/Na ₂ SiO ₃ Karışım Oranları					Deney Kür Sıcaklığı (°C)	
				1/1	1/1.5	1/2	1/2.5	1/3		
Tip 2	400	800	%20	120/120	96/144	80/160	68/172	60/180	70	100
			%40	240/240	192/288	160/320	136/344	120/360		

4.2.1 Kalıplara dökme

Masa tipi mikserde, macun kıvamına getirilen geopolimer kompozit harçlarını şekillendirmek amacıyla Fotoğraf 4.2'de gösterilen, 4x4x16 cm boyutlarında prizmatik kalıplar kullanılmıştır. Harçlar kalıplara dökülmeden önce her bir köşesi kalıba uygun yağ kullanılarak fırça yardımı ile yağlanmıştır. Daha sonra spatula yardımıyla, geopolimer harçların kalıba eşit dağılması sağlanmıştır.



Fotoğraf 4.2. 4x4x16 cm boyutlarındaki kalıp (a) ve harç yerleştirilmiş kalıp (b)

4.2.2 Kürleme

Geopolimer kompozit numuneler, Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan 500 °C sıcaklık kapasiteli etüvde (Fotoğraf 4.3), 70 ve 100 °C sıcaklıklarda sırasıyla 24-48 saat bekletilerek kürlenmiştir. Farklı sıcaklıklarda kürleme işleminin ardından kalıplardan sökülen numunelerin deformasyona uğrayıp uğramadıkları kontrol edildikten sonra, oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır (Fotoğraf 4.4). Bu aşamadan sonra geopolimer kompozit malzemeler bölüm 3.2'de bahsedilen fiziksel-mekanik testlere tabi tutulmuştur.



Fotoğraf 4.3. Krleme sırasında kullanılan etüv

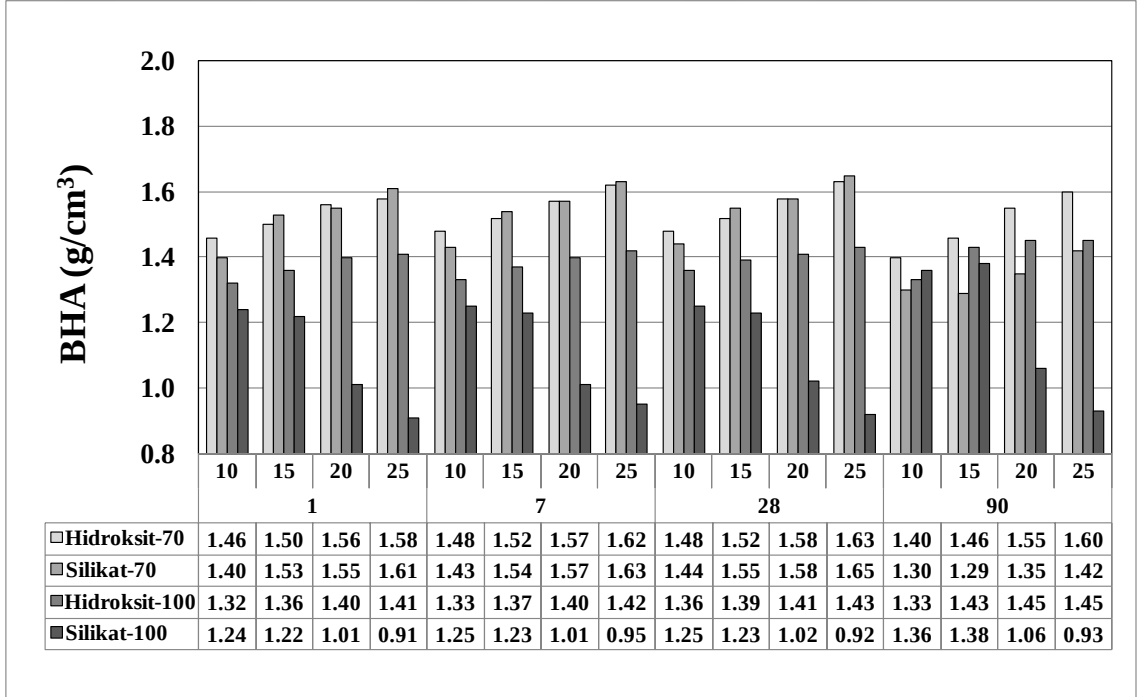


Fotoğraf 4.4. Tezde üretilen geopolimer kompozit malzemeler

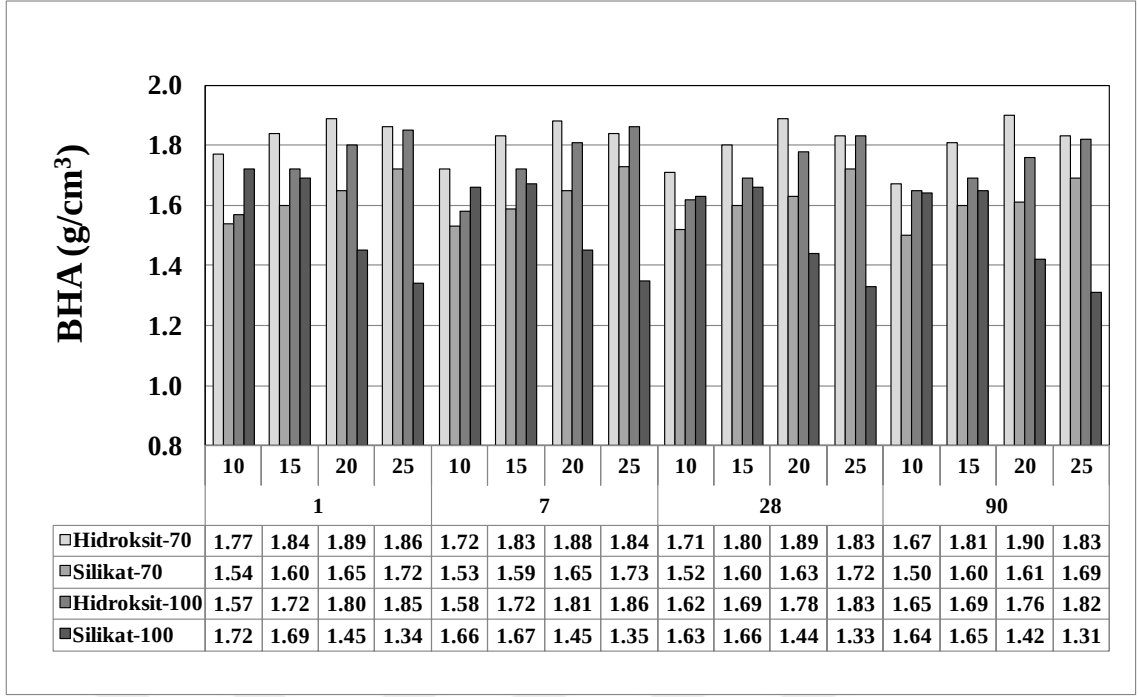
BÖLÜM V

BULGULAR

Bu tezde üretilen tüm kompozit malzemelerin BHA değerleri $0.91-2.15 \text{ g/cm}^3$ aralığındadır. Tip 1 karışımli malzemelerin grafikleri Şekil 5.1 ve 5.2'de verilmiştir. BHA değerleri 1, 7, 28 ve 90. günde belirlenmiştir. Buna göre ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı malzemelerde en yüksek ve endüşük BHA değerleri sırasıyla 70°C sıcaklıkta ve %25 Na_2SiO_3 karışımında 28. günde $1,65 \text{ g/cm}^3$, 100°C sıcaklıkta ve %25 Na_2SiO_3 karışımında 1. günde 0.92 g/cm^3 , 70°C sıcaklıkta ve %20 NaOH karışımında 90. günde $1,90 \text{ g/cm}^3$, 100°C sıcaklıkta ve %25 Na_2SiO_3 karışımında 90. günde 1.31 g/cm^3 olarak hesaplanmıştır.

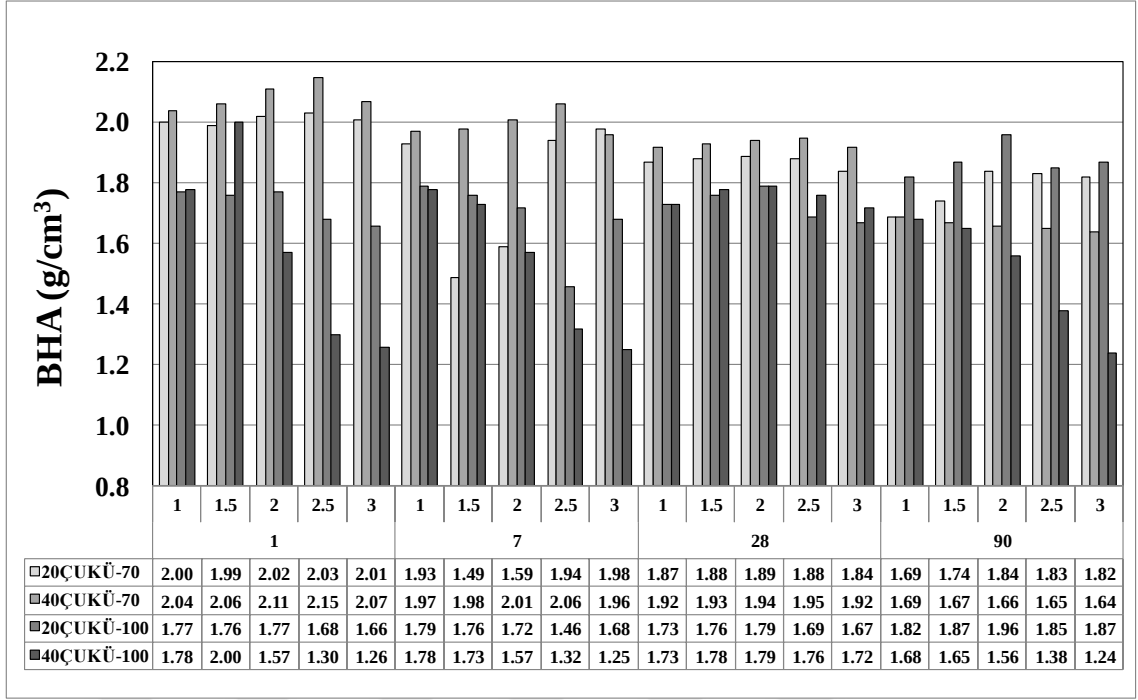


Şekil 5.1. ÇUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin BHA grafiği

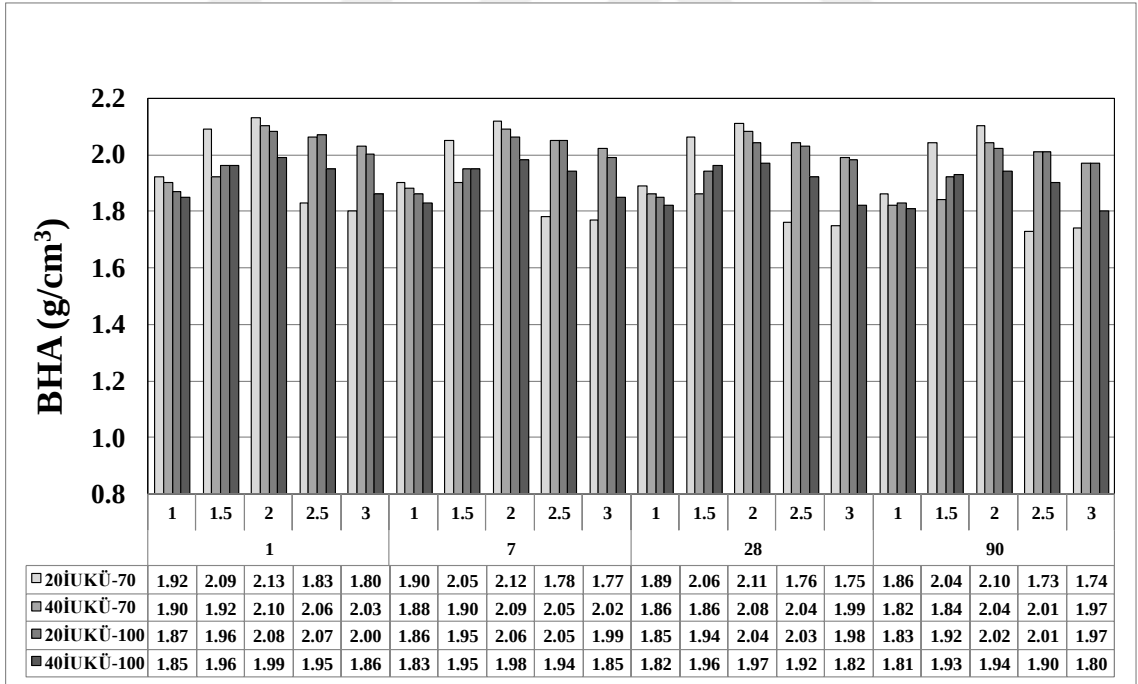


Şekil 5.2. İUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin BHA grafiği

Tip 2 karışımli 800 g Rilem kumu ve ağırlıkça 400 g ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı geopolimer kompozit malzemelerin-alkali aktivatör ve sıcaklık derecesine göre- BHA değişimleri Şekil 5.3 ve 5.4'de verilmiştir. ÇUKÜ esaslı numunelerde en yüksek BHA, 70 °C sıcaklıkta kurlenmiş %40'lık ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 2.5 olduğu numunede 28. günde 2.15 g/cm³ iken en düşük değer ise 100 °C sıcaklıkta kurlenmiş %40'lık ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 3 olduğu numunede 90. günde 1.24 g/cm³ olarak hesaplanmıştır. İUKÜ esaslı numunelerde en yüksek BHA değeri, 70 °C sıcaklıkta kurlenmiş %20'lik ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 2 olduğu numunede 1. günde 2.13 g/cm³, en düşük BHA değeri 70 °C sıcaklıkta kurlenmiş %20'lik ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 2.5 olduğu numunede 90. günde 1.73 g/cm³ olarak hesaplanmıştır.



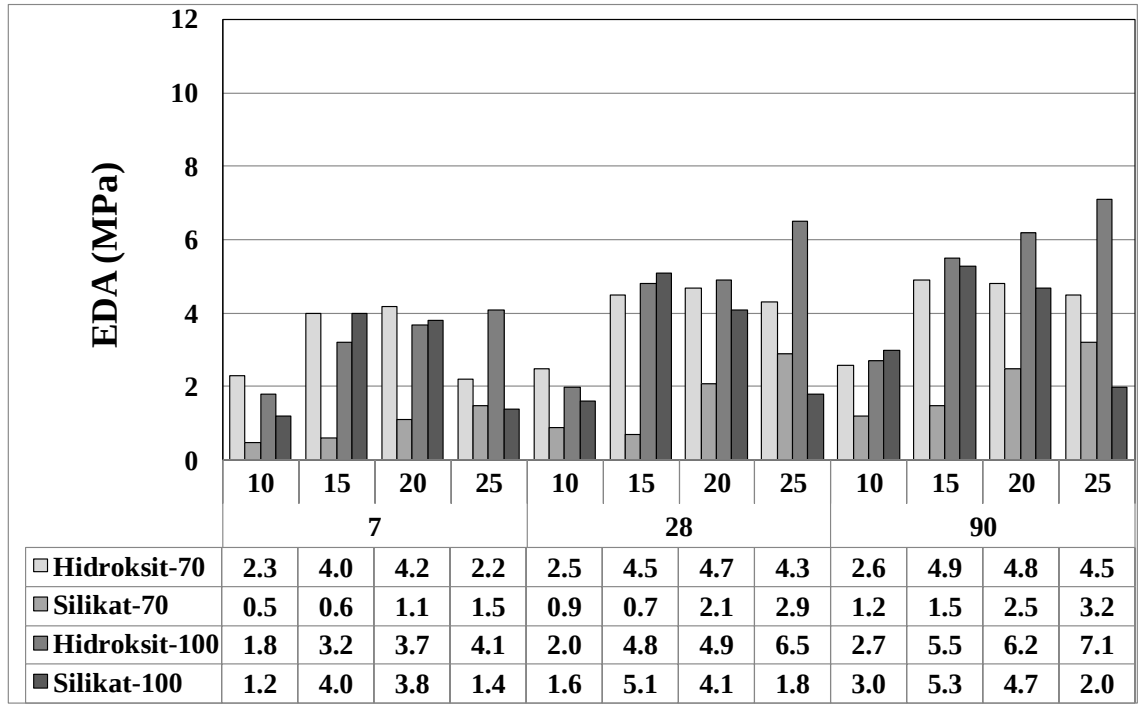
Şekil 5.3. ÇUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin BHA grafiği



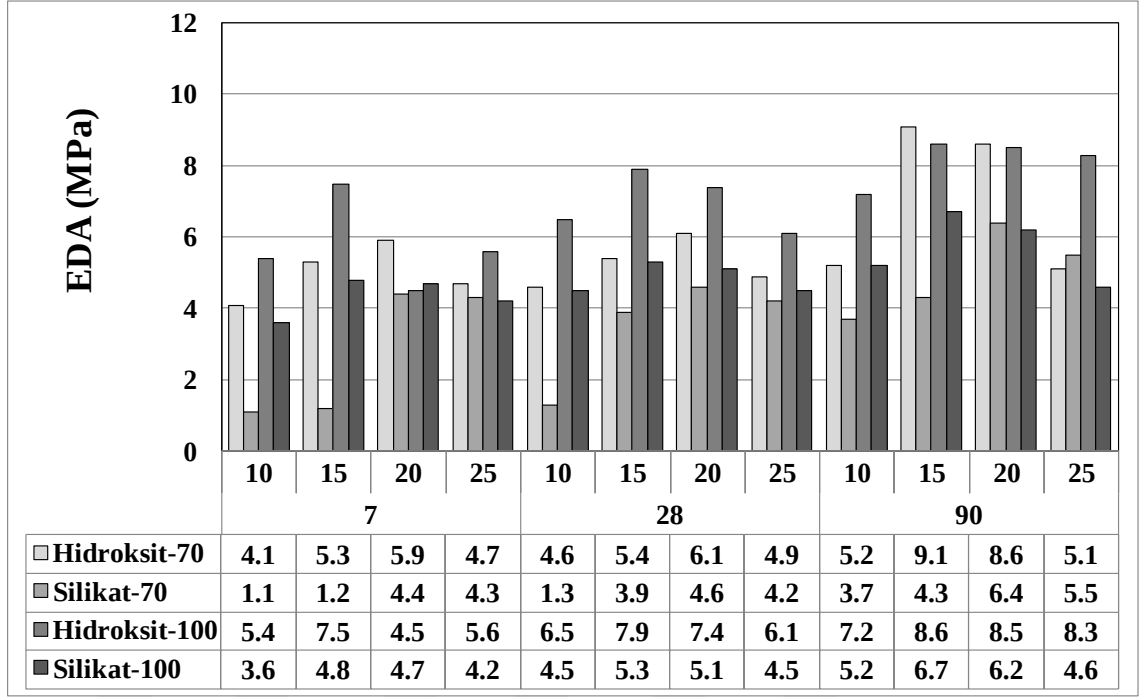
Şekil 5.4. İUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin BHA grafiği

Tezde üretilen tüm geopolimer kompozit malzemelerde EDA 0.5-11 MPa arasında bulunmuştur. EDA değerleri 7, 28 ve 90. günde belirlenmiştir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının

arttırılması, optimum bir noktaya kadar (2 oranı) EDA'da artma sağlamıştır. Tip 1 karışımı, ağırlıkça 1000 g ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı malzemelerde -alkali aktivatör ve sıcaklık derecesine göre- EDA değişimleri Şekil 5.5 ve 5.6'da verilmiştir. ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı malzemeler için en yüksek ve en düşük EDA değerleri sırasıyla 100 °C sıcaklık ve %25 NaOH karışımında 28.günde 6.5 MPa ve 70 °C sıcaklık ve %10 Na₂SiO₃ karışımında 7. günde 0.5 MPa, 70 °C sıcaklık ve %15 NaOH karışımında 90. günde 9.1 MPa, 70 °C sıcaklık %10 Na₂SiO₃ karışımında 7. günde 1.1 MPa olarak hesaplanmıştır.

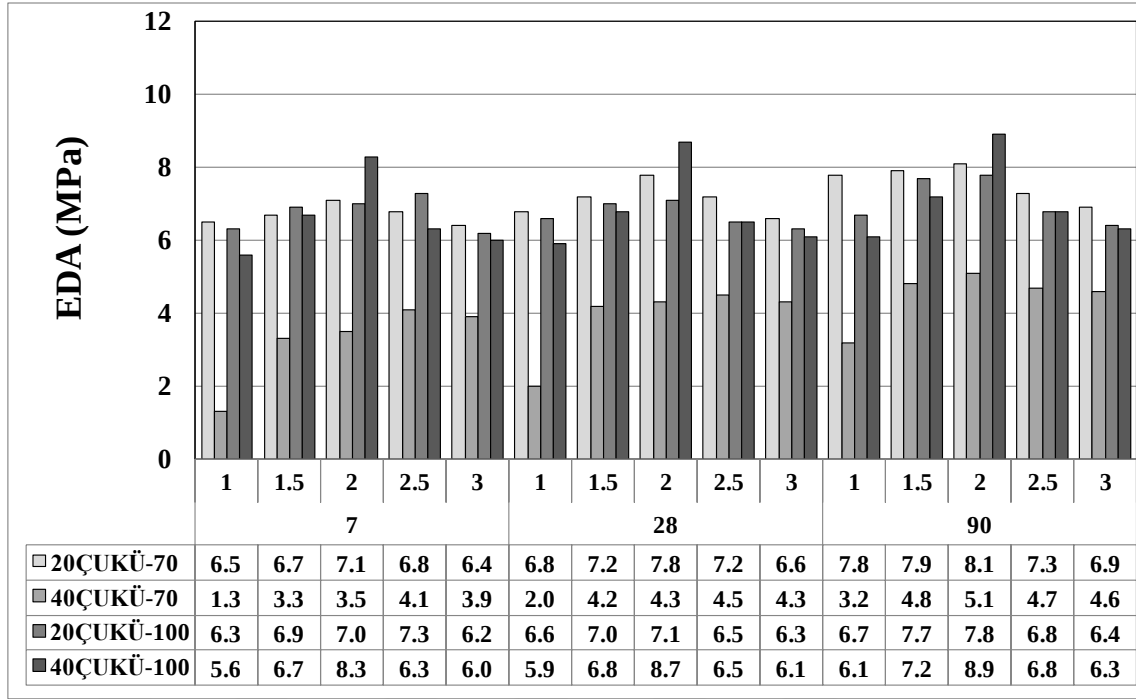


Şekil 5.5. ÇUKÜ esaslı Tip 1 karışımı geopolimer kompozit malzemelerin EDA grafiği

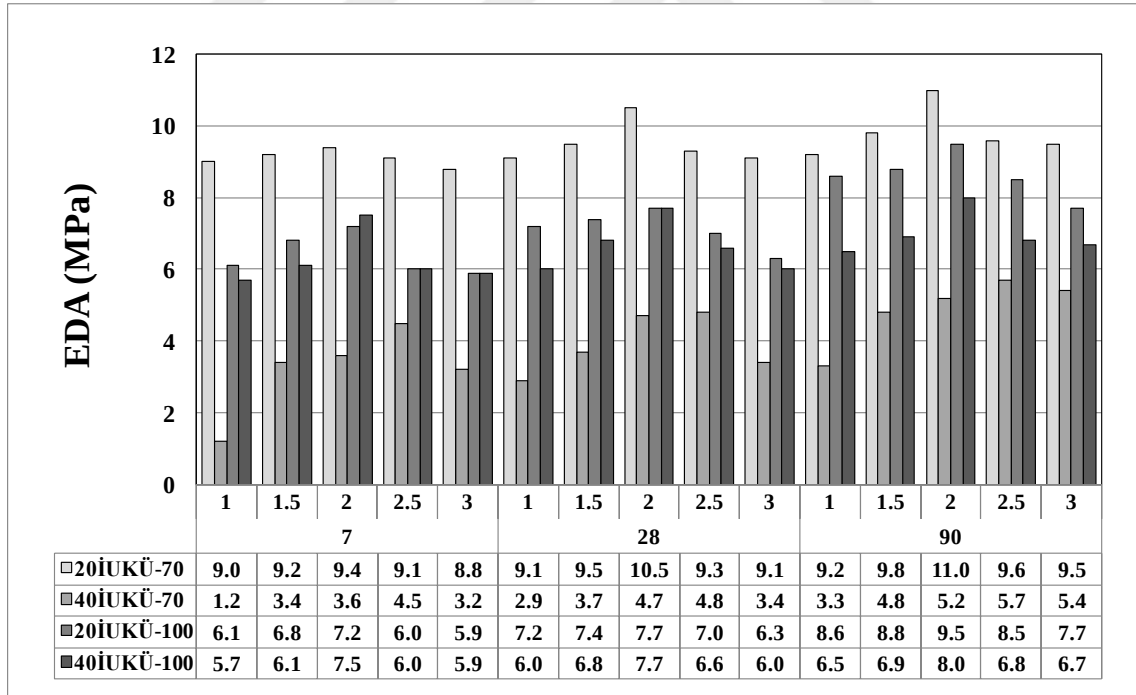


Şekil 5.6. İUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin EDA grafiği

Tip 2 karışımli 800 g Rilem kumu ve ağırlıkça 400 g ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı geopolimer kompozit malzemelerin-alkali aktivatör ve sıcaklık derecesine göre-EDA değişimleri Şekil 5.7 ve 5.8'de verilmiştir. ÇUKÜ esaslı numunelerde en yüksek EDA, 100 °C sıcaklıkta kürlenmiş %40'lık ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 2 olduğu numunede 90. günde 8.9 MPa iken en düşük değer ise 70 °C sıcaklıkta kürlenmiş %40'lık ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 1 olduğu numunede 7. günde 1.3MPa olarak hesaplanmıştır. İUKÜ esaslı numunelerde en yüksek EDA değeri 70 °C sıcaklıkta kürlenmiş %20'lik ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 2 olduğu numunede 90. günde 11 MPa, en düşük EDA değeri 70 °C sıcaklıkta kürlenmiş %40'lık ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 1 olduğu numunede 7. günde 1.2MPa olarak hesaplanmıştır.

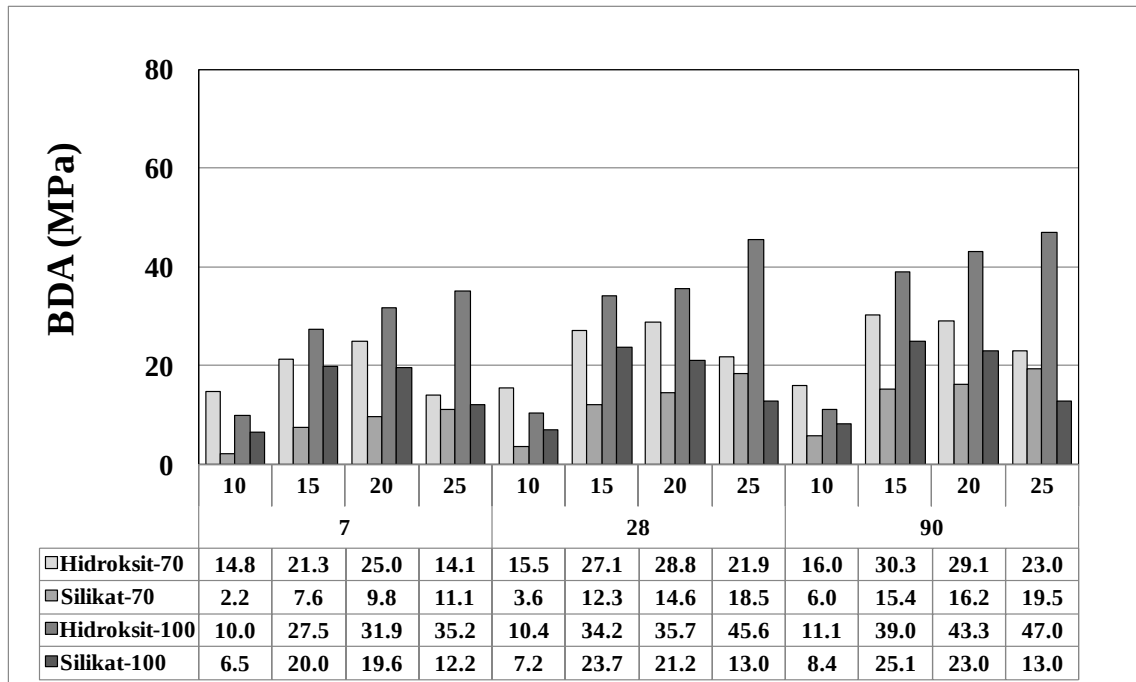


Şekil 5.7. ÇUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin EDA grafiği

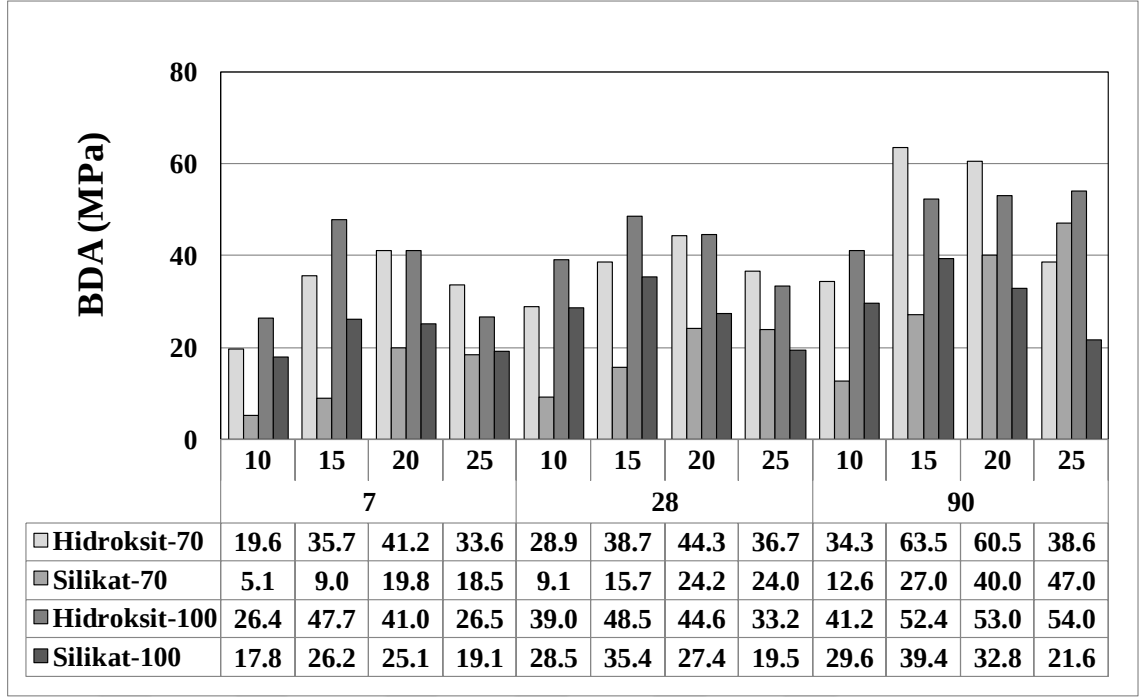


Şekil 5.8. İUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin EDA grafiği

Tezde üretilen tüm geopolimer kompozit malzemelerde BDA 2.2-77 MPa arasında bulunmuştur. BDA değerleri 7, 28 ve 90. günde belirlenmiştir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının artırılması, optimum bir noktaya kadar (2 oranı) BDA'da artma sağlamıştır. Tip 1 karışımı, ağırlıkça 1000 g ÇUKÜ ve İÜK esaslı malzemelerde -alkali aktivatör ve sıcaklık derecesine göre-BDA değişimleri Şekil 5.9 ve 5.10'da verilmiştir. ÇUKÜ ve İÜKÜ esaslı malzemeler için en yüksek ve en düşük BDA değerleri sırasıyla 100 °C sıcaklık ve %25 NaOH karışımında 90.günde 47 MPa ve 70 °C sıcaklık ve %10 Na_2SiO_3 karışımında 7. günde 2.2 MPa, 70 °C sıcaklık ve %15 NaOH karışımında 90. günde 63.5 MPa, 70 °C sıcaklık %10 Na_2SiO_3 karışımında 7. günde 5.1 MPa olarak hesaplanmıştır.

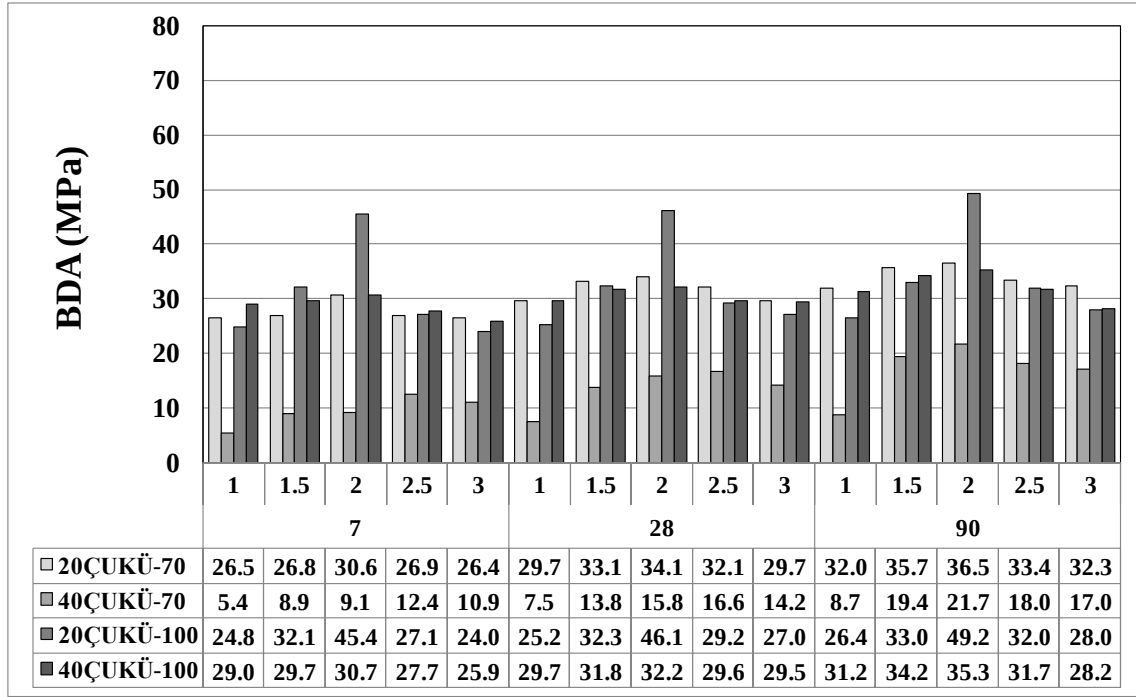


Şekil 5.9. ÇUKÜ esaslı Tip 1 karışımı geopolimer kompozit malzemelerin BDA grafiği

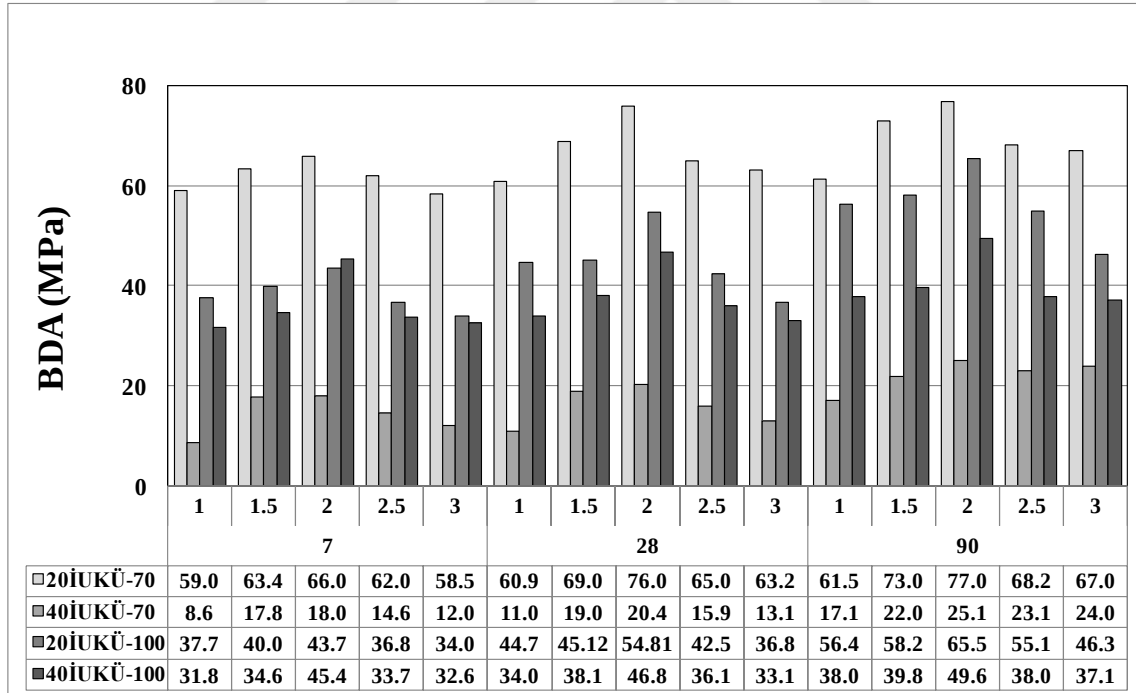


Şekil 5.10. İUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin BDA grafiği

Tip 2 karışımli 800 g Rilem kumu ve ağırlıkça 400 g ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı geopolimer kompozit malzemelerin-alkali aktivatör ve sıcaklık derecesine göre-BDA değişimleri Şekil 5.11 ve 5.12'de verilmiştir. ÇUKÜ esaslı numunelerde en yüksek BDA, 100 °C sıcaklıkta kürlenmiş %20'lik ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 2 olduğu numunede 90. günde 49.2 MPa iken en düşük değer ise 70 °C sıcaklıkta kürlenmiş %40'lık ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 1 olduğu numunede 7. günde 5.4MPa olarak hesaplanmıştır. İUKÜ esaslı numunelerde en yüksek BDA değeri 70 °C sıcaklıkta kürlenmiş %20'lik ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 2 olduğu numunede 90. günde 77 MPa, en düşük EDA değeri 70 °C sıcaklıkta kürlenmiş %40'lık ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 1 olduğu numunede 7. günde 8.6MPa olarak hesaplanmıştır.



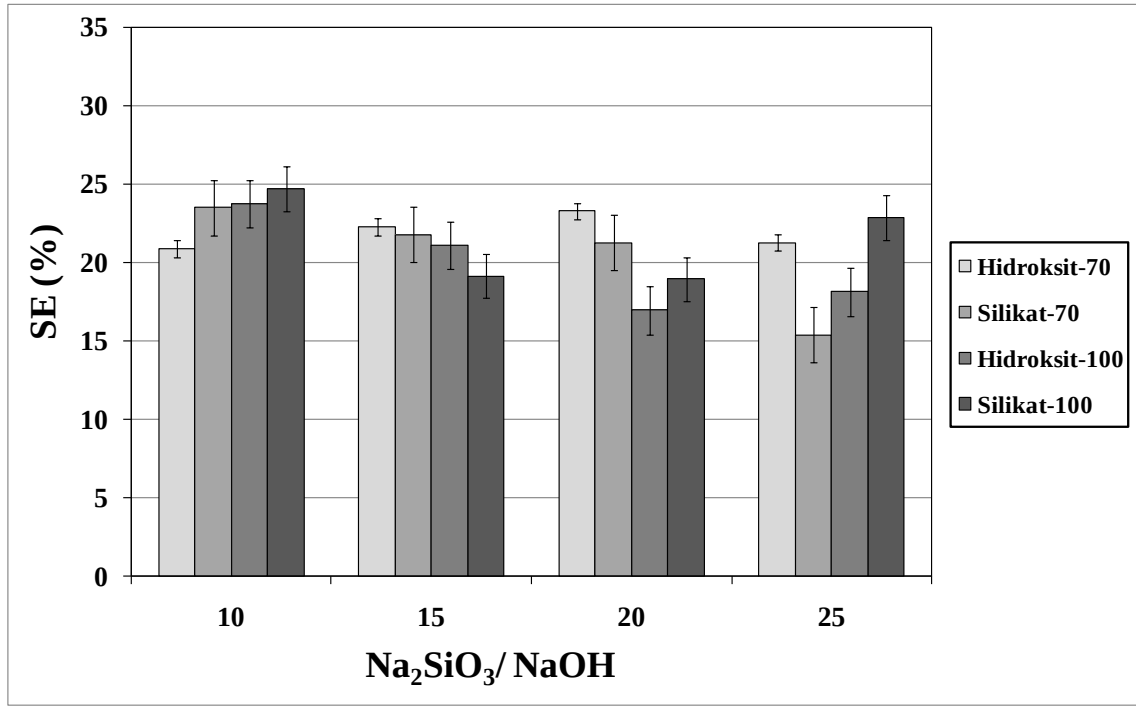
Şekil 5.11. ÇUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin BDA grafiği



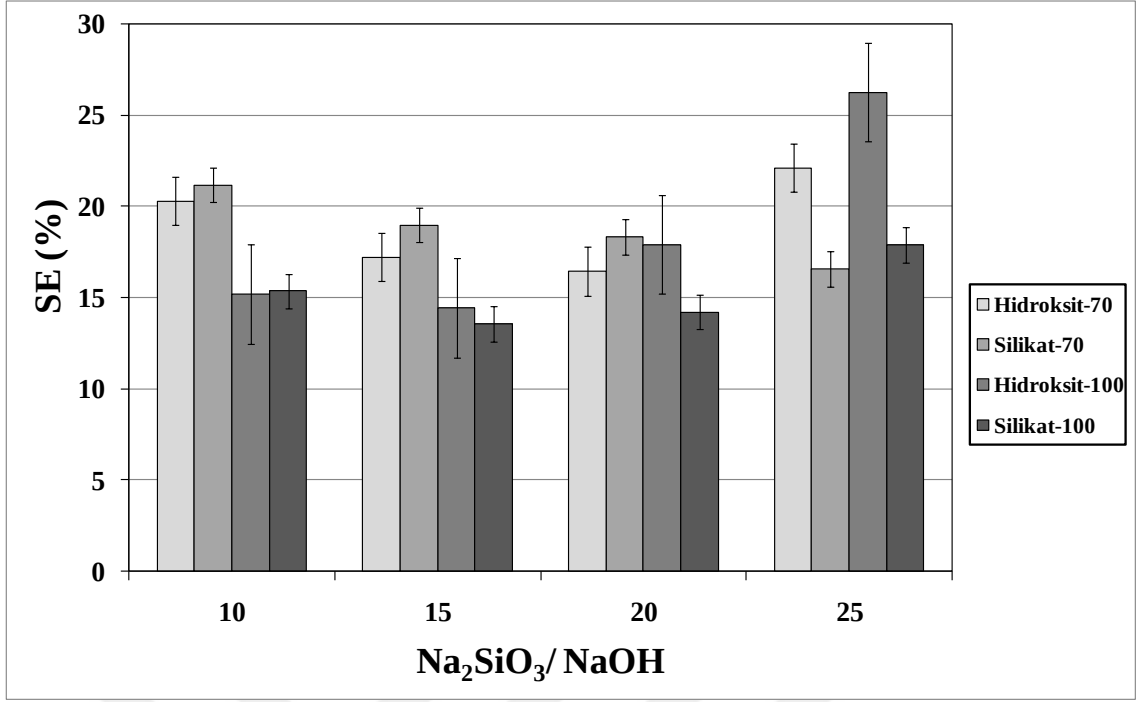
Şekil 5.12. İUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin BDA grafiği

Tezde üretilen tüm geopolimer kompozit malzemelerde su emme (SE) %8.31-26.25 arasında bulunmuştur. Tip 1 karışımli, ağırlıkça 1000 g ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı

malzemelerde, alkali aktivatör ve sıcaklık derecesine göre, SEdeğişimleri Şekil 5.13 ve 5.14’de verilmiştir. ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı malzemeler için en yüksek ve en düşük SE değerleri sırasıyla 100 °C sıcaklık ve %10 Na₂SiO₃ karışımında %24.70 ve 70 °C sıcaklık ve %25Na₂SiO₃ karışımında %15.40, 100 °C sıcaklık ve %25 NaOH karışımında %26.25, 100 °C sıcaklık %15Na₂SiO₃ karışımında %13.57 olarak hesaplanmıştır.

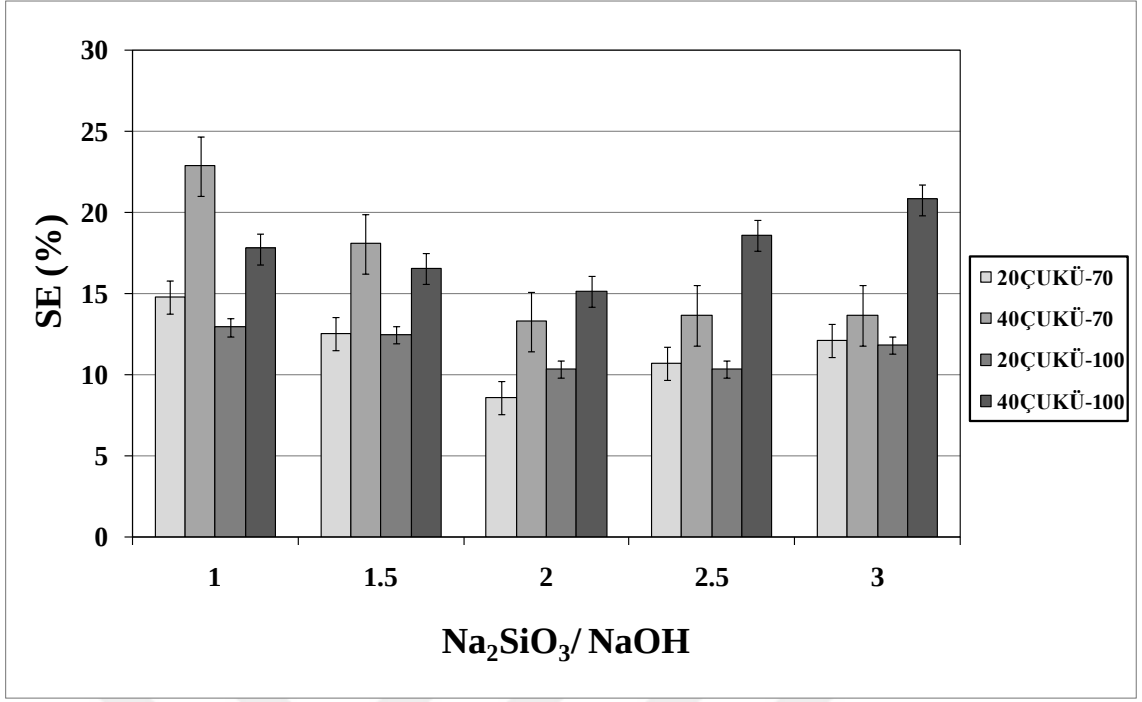


Şekil 5.13. ÇUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin SE grafiği

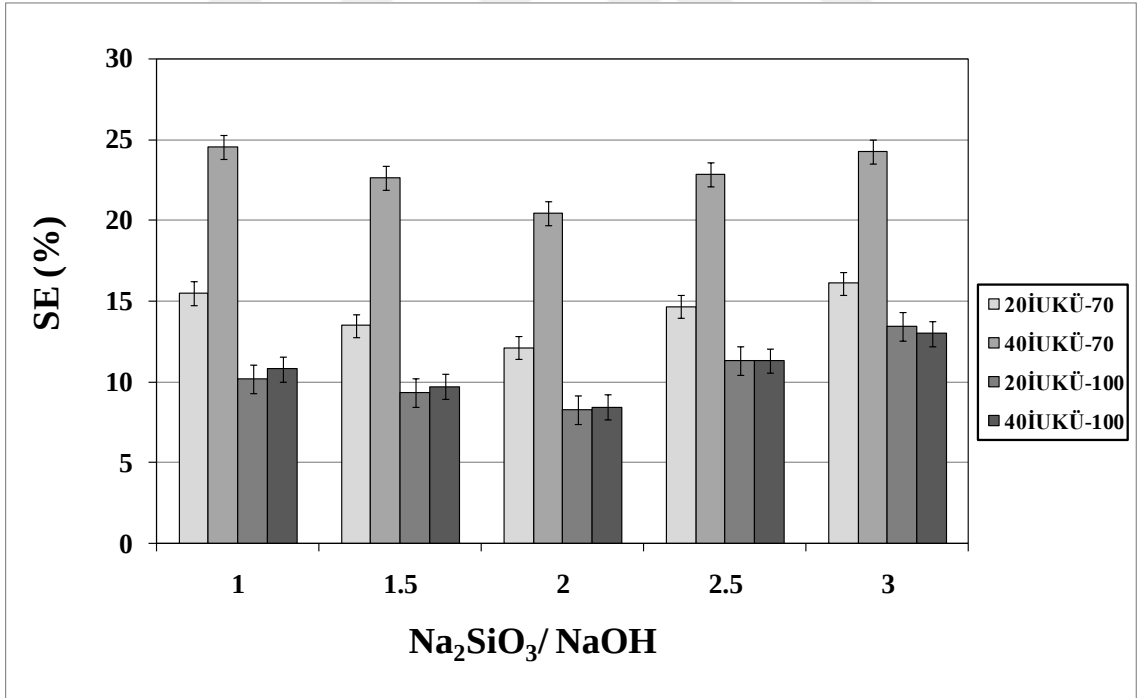


Şekil 5.14. İUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin SE grafiği

Tip 2 karışımli 800 g Rilem kumu ve ağırlıkça 400 g ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı geopolimer kompozit malzemelerin-alkali aktivatör ve sıcaklık derecesine göre-SEdeğişimleri Şekil 5.15 ve 5.16'da verilmiştir. ÇUKÜ esaslı numunelerde en yüksek SE, 70 °C sıcaklıkta kürlenmiş %40'lık ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 1 olduğu numunede %22.87'iken en düşük değer ise 70 °C sıcaklıkta kürlenmiş %20'lik ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 2 olduğu numunede %8.60'dır. İUKÜ esaslı numunelerde en yüksek SE değeri 70 °C sıcaklıkta kürlenmiş %40'lık ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 1 olduğu numunede %24.55, en düşük SE değeri 100 °C sıcaklıkta kürlenmiş %20'lik ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 2 olduğu numunede %8.31 olarak hesaplanmıştır.



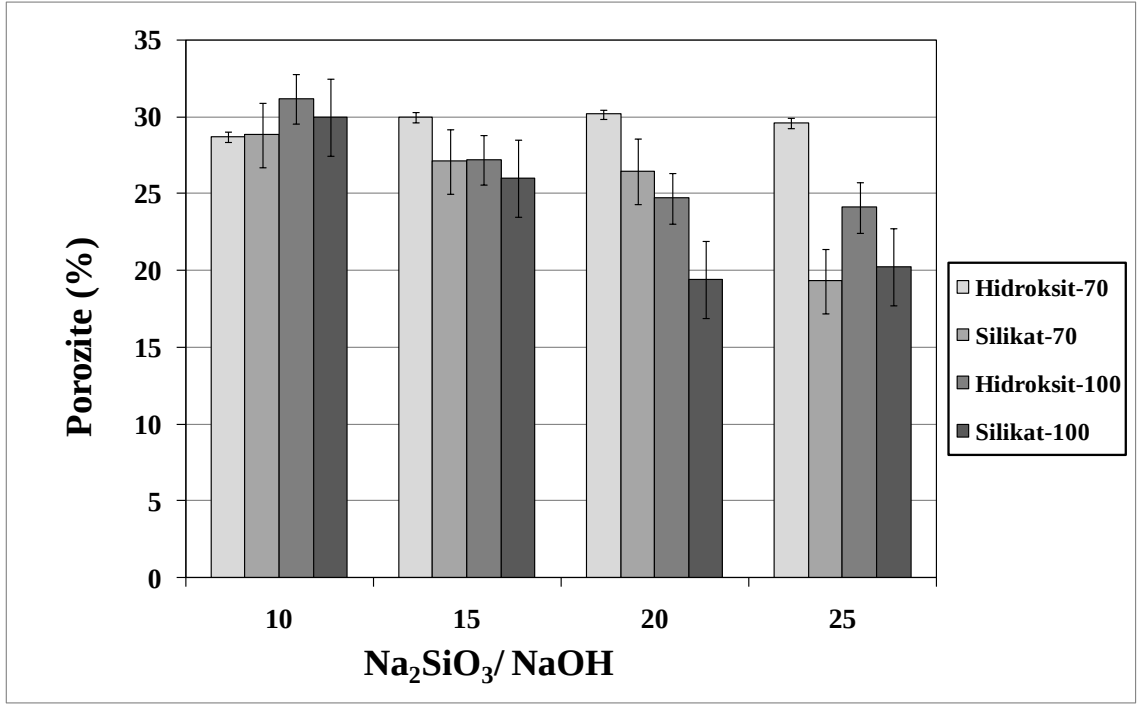
Şekil 5.15. ÇUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin SE grafiği



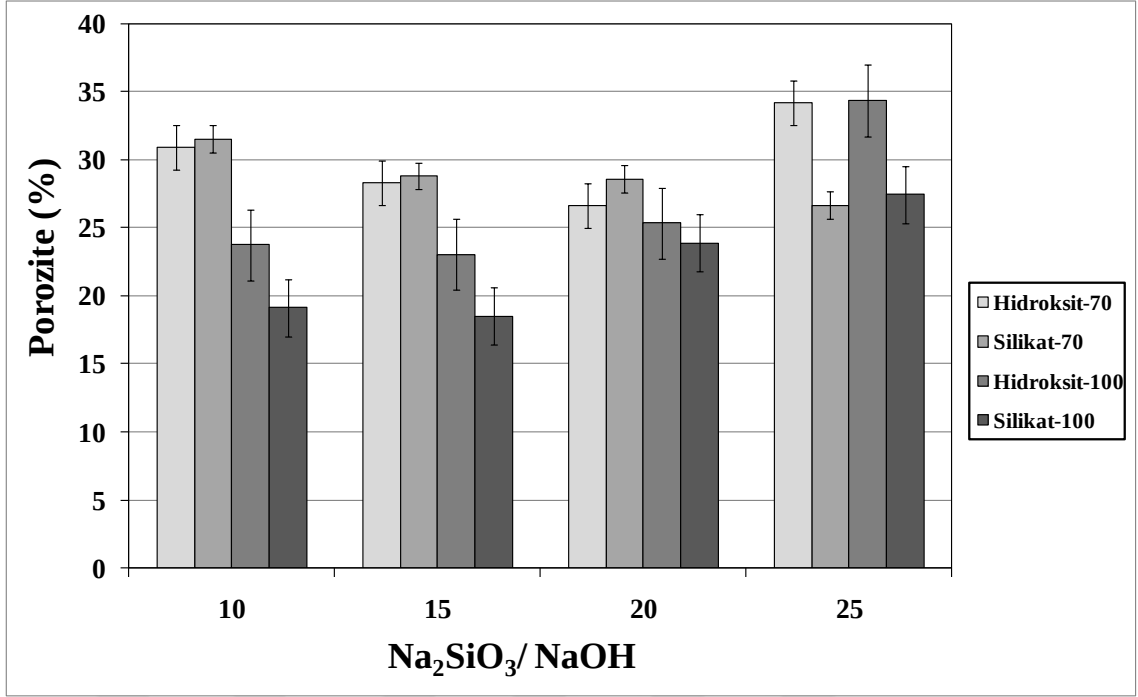
Şekil 5.16. İUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin SE grafiği

Tezde üretilen tüm geopolimer kompozit malzemelerde porozite%17-38.43 arasında bulunmuştur. Tip 1 karışımli, ağırlıkça 1000 g ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı malzemelerde,

alkali aktivatör ve sıcaklık derecesine göre, SEdeğişimleri Şekil 5.17 ve 5.18’de verilmiştir. ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı malzemeler için en yüksek ve en düşük SE değerleri sırasıyla 100 °C sıcaklık ve %10 NaOH karışımında %31.23 ve 70 °C sıcaklık ve %25Na₂SiO₃ karışımında %19.35, 100 °C sıcaklık ve %25 NaOH karışımında %34.39, 100 °C sıcaklık %15Na₂SiO₃ karışımında %18.54 olarak hesaplanmıştır.

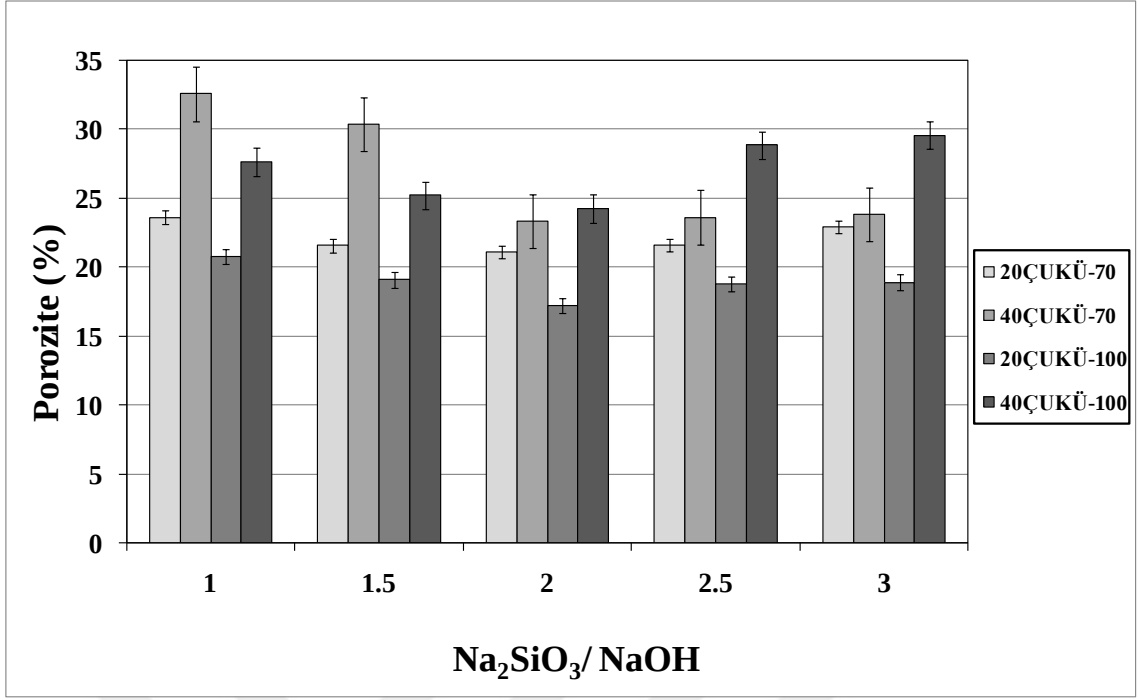


Şekil 5.17. ÇUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin porozite grafiğı

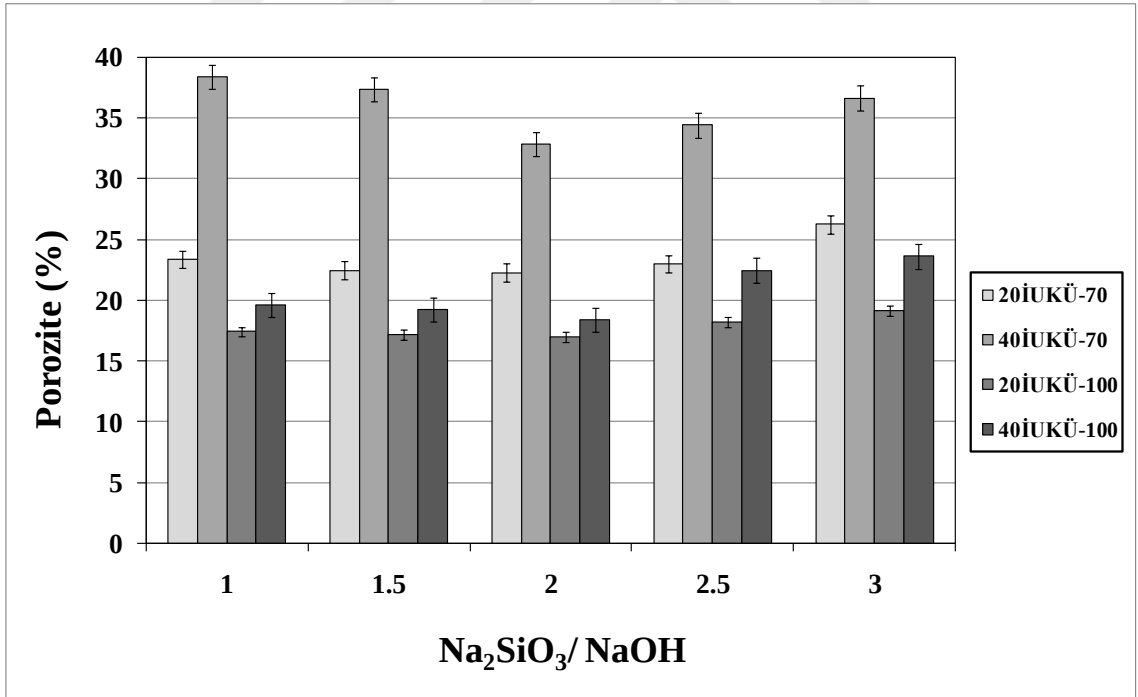


Şekil 5.18. İUKÜ esaslı Tip 1 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin porozite grafiği

Tip 2 karışımli 800 g Rilem kumu ve ağırlıkça 400 g ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı geopolimer kompozit malzemelerin-alkali aktivatör ve sıcaklık derecesine göre-porozitedeğişimleri Şekil 5.19 ve 5.20'de verilmiştir. ÇUKÜ esaslı numunelerde en yüksek porozite, 70 °C sıcaklıkta kürlenmiş %40'lık ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 1 olduğu numunede %35.60iken en düşük değer ise 100 °C sıcaklıkta kürlenmiş %20'lik ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 2 olduğu numunede %17.24'dür. İUKÜ esaslı numunelerde en yüksek porozite değeri 70 °C sıcaklıkta kürlenmiş %40'lık ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 1 olduğu numunede %38.43, en düşük porozite değeri 100 °C sıcaklıkta kürlenmiş %20'lik ve NaOH/Na₂SiO₃ oranının 2 olduğu numunede %17 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.19. ÇUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin porozite grafiği



Şekil 5.20. İUKÜ esaslı Tip 2 karışımli geopolimer kompozit malzemelerin porozite grafiği

BÖLÜM V

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tezde, geopolimer kompozit malzeme üretimi ön denemelerinde sıkıştırılarak oluşturulan numunelerde BHA değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Bütün numuneler için elle sıkıştırma oranları sabit tutulamayacağından dolayı kalıba yerleştirilmesinde sarsma tablası kullanılmıştır. Sarsma tablasında segregasyon olmaması için 5 kez sarsma yeterli görülmüş ve bütün numunelere uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan alkali aktivatörler (NaOH veya Na_2SiO_3) ısı ile reaksiyona girmiş ve endotermik bir süreç söz konusu olmuştur. Bu süreçte numunenin aldığı ısı, geopolimerizasyon sürecini hızlandırmıştır. NaOH'in tek başına veya karışımında Na_2SiO_3 ile birlikte kullanılması BHA değerlerini artırıcı etki yapmıştır.

Bu tezde üretilen geopolimer kompozit malzemelerin 1, 7, 28 ve 90 günlük BHA deney verileri dikkate alındığında:

- Tip 1 karışımı ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı malzemelerde -malzemenin yüksek sıcaklıkta (100 °C) genişlemesi ve sert yapısından dolayı- kütle yoğunluğunda bir azalma görülmüştür.
- Tip 2 karışımı ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı malzemelerin BHA değerleri kür sıcaklığının artması ile azalmıştır. 70 °C ve 100 °C'de kürlenmiş geopolimerlerin kütle yoğunluğu, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2 oranına kadar artmış, sonrasında artan oran ile azalmıştır. Kong ve Sanjayan'ın 2010 yılında yaptığı çalışmada olduğu gibi, bu tezde de kür sıcaklığının yanı sıra $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının polimer ağındaki parçalanmaya ve numunelerin genişlemesine neden olduğu söylenebilir.

Tezde üretilen geopolimer kompozit malzemelerin 7, 28 ve 90 günlük EDA test verileri dikkate alındığında Tip 1 karışımı

- ÇUKÜ esaslı üretilen 70 °C'de kürlenmiş geopolimer kompozit numunelerde %20 alkali aktivatör oranına kadar NaOH miktarının artması ile 7 ve 28 günlerde EDA değeri artmış daha sonra azalmıştır; 90. günde ise %15 alkali aktivatör oranına kadar artan EDA, NaOH miktarının artması ile azalmıştır.

Na_2SiO_3 miktarının artmasıyla EDA değeri sürekli artış göstermiştir. 100 °C’de ise numunelerde NaOH miktarının artması EDA’yı sürekli arttırmıştır. Öte yandan, %15 alkali aktivatör oranına kadar Na_2SiO_3 miktarının artmasıyla 7, 28 ve 90. günlerde EDA değeri artmış, daha sonra azalmıştır.

- İUKÜ esaslı üretilen 70 °C’de kürlenmiş geopolimer kompozit numunelerde %20 alkali aktivatör oranına kadar NaOH miktarının artması ile 7 ve 28. günlerde EDA değeri artmış daha sonra azalmıştır, 90. günde ise %15 alkali aktivatör oranına kadar artan EDA, karışım oranının artmasıyla azalmıştır. %20 alkali aktivatör oranı dahil Na_2SiO_3 miktarının artmasıyla EDA değeri azalmıştır. 100 °C kürleme sıcaklığında ise %15 alkali aktivatör oranına kadar NaOH miktarının artması ile 7, 28 ve 90. günlerde EDA değeri, artmış daha sonra azalmıştır. Öte yandan, 100 °C kürleme sıcaklığında %15 alkali aktivatör oranına kadar, Na_2SiO_3 miktarının artmasıyla 7, 28 ve 90. günlerde EDA değeri artmış daha sonra azalmıştır.

Tip 2 karışım

- ÇUKÜ esaslı üretilen 70 °C’de kürlenmiş %20 alkali aktivatör oranına sahip geopolimer kompozit numunelerde 7, 28 ve 90. günlerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2 olan numuneye kadar EDA değeri artmış, daha sonra azalmıştır. %40 alkali aktivatör oranına sahip numunelerde bu oran 7 ve 28. günlerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranına 2.5 olan numune de dahil olmak üzere artmış, sonrasında azalmıştır. 90. günde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2 olan numuneler dahil EDA artmış, bu oran 3 olduğunda azalma eğilimi göstermiştir. 100 °C kürleme sıcaklığında ise 7. günde %20 alkali aktivatör oranına sahip, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2.5 olan numuneler dahil EDA değeri artmış, bu oran 3 olduğunda azalma eğilimi göstermiştir. 28 ve 90. günlerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2 olan numuneler de dahil olmak üzere artan EDA, bu oranın artmasıyla azalmıştır. %40 alkali aktivatör oranına sahip numunelerde 7, 28 ve 90. günlerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2 olan numuneler dahil EDA değeri artmış, daha sonra azalmıştır.
- İUKÜ esaslı üretilen 100 °C’de kürlenmiş %20 alkali aktivatör oranına sahip geopolimer kompozit numunelerde 7, 28 ve 90. günlerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranına 2 olan numuneler de dahil EDA değeri artmış, bu oran 3

olduğunda azalmıştır. %40 alkali aktivatör oranına sahip numunelerde 7, 28 ve 90. günlerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2.5 olan numuneler de dahil artmış, bu oran 3 olduğunda azalmıştır. Öte yandan 7, 28 ve 90. günlerde 70 ve 100 °C kürleme sıcaklığında %20 ve %40 alkali aktivatör oranına sahip, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2 olan numuneler dahil EDA değeri artmış, bu oran 3 olduğunda azalma eğilimi göstermiştir.

Tezde üretilen geopolimer kompozit malzemelerin 7, 28 ve 90 günlük BDA test verileri dikkate alındığında Tip 1 karışım

- ÇUKÜ esaslı üretilen 70 °C’de kürlenmiş geopolimer kompozit numunelerde %20 alkali aktivatör oranına kadar 7 ve 28. günlerde NaOH miktarının artması ile BDA değeri artmış daha sonra azalmıştır; 90. günde %15 alkali aktivatör oranına kadar artan BDA, NaOH miktarının artması ile azalmıştır. Na_2SiO_3 miktarının artmasıyla BDA değeri sürekli olarak artmıştır. 100 °C’de kürlenmiş geopolimerlerde 7, 28 ve 90. günlerde NaOH miktarının artması BDA değerini sürekli arttırmıştır. 100 °C kürleme sıcaklığında %15 alkali aktivatör oranına kadar 7, 28 ve 90. günlerde Na_2SiO_3 miktarının artmasıyla BDA değeri de artmıştır.
- İUKÜ esaslı üretilen 70 °C’de kürlenmiş geopolimer kompozit numunelerde %20 alkali aktivatör oranına kadar 7. ve 28. günlerde NaOH miktarının artması ile BDA değeri artmış daha sonra azalmıştır; 90. günde %15 alkali aktivatör oranından sonra NaOH miktarının artması EDA değerini sürekli olarak azaltmıştır. Öte yandan %20 alkali aktivatör oranına kadar 7. ve 28. günlerde Na_2SiO_3 miktarının artmasıyla BDA değeri artmış, daha sonra azalmıştır; 90. günde Na_2SiO_3 miktarının artmasıyla BDA değeri sürekli olarak artmıştır. 100 °C kürleme sıcaklığında %15 alkali aktivatör oranına kadar 7 ve 28 günlerde NaOH miktarının artması ile BDA artmış daha sonra azalmıştır; 90. günde ise NaOH miktarının artmasıyla BDA değeri sürekli olarak artmıştır. Öte yandan %15 alkali aktivatör oranına kadar 7, 28 ve 90. günlerde Na_2SiO_3 miktarının artması ile BDA değeri artmış daha sonra azalmıştır.

Tip 2 karışımı

- ÇUKÜ esaslı üretilen 70 °C'de kürlenmiş %20 alkali aktivatör oranına sahip geopolimer kompozit numunelerde 7, 28 ve 90. günlerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2 değerine kadar olan numunelerde BDA değeri artmış, 3 değerinden sonra azalmıştır. %40 alkali aktivatör oranına sahip numunelerde BDA değeri 7 ve 28. günlerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2.5 karışım oranına kadar artmış, sonrasında azalmıştır. 90. günde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2 olan numuneler dahil BDA artmış, daha sonra azalma eğilimi göstermiştir. 7, 28 ve 90. günlerde 100 °C kürleme sıcaklığında %20 alkali aktivatör oranına sahip, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2 olan numuneler dahil BDA değeri artmış, daha sonra azalmıştır. %40 alkali aktivatör oranına sahip numunelerde BDA değeri 7, 28 ve 90. günlerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2 değerine kadar artmış, daha sonra azalmıştır.
- İÜKÜ esaslı üretilen 70 ve 100 °C'de kürlenmiş numunelerde %20 ve 40 alkali aktivatör oranına sahip geopolimer kompozit numunelerde 7, 28 ve 90. günlerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2 olan numuneler de dahil BDA değeri artmış, 3 olan numunelerde azalmıştır. İÜKÜ esaslı üretilen 70 °C'de kürlenmiş geopolimer kompozit numunelerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranına sahip en yüksek BDA değerine %20 alkali aktivatör içeren numunelerde rastlanmıştır. Geopolimer kompozit malzemeler, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2 olduğunda en optimum mukavemet değerine ulaşmıştır. Benzer şekilde Yang vd. (2012) aşırı aktivatör solüsyonlarının kullanılmasının, zayıf bağlanma için gereksiz su veya daha az alkali reaksiyonu sağladığını ve geopolimer kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini azalttığını belirtmiştir. Khale ve Chaudhary (2007) de her bir aktivatör tipinin konsantrasyonu için optimum bir limitin bulunduğu, bu limitin aşılmasının, mukavemet özellikleri için ters etki yarattığına dikkat çekmiştir.

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı arttığında geopolimer numunelerin mekanik özelliklerinde gözlenen azalma, silika kümeleşmesinde bir artışa bağlanabilmektedir. Dahası, yüksek kürleme sıcaklığı, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2'den büyük olan numuneler için BDA değerini belirgin bir şekilde azaltmıştır. Yüksek sıcaklıklardaki geopolimer

numunelerin sıcaklıkla genleşme hızının, numunelerin performansı üzerine etkili bir faktör olduğundan bahsedilebilir.

Tezde üretilen geopolimer kompozit malzemelerin SE test verileri dikkate alındığında Tip 1 karışım

- ÇUKÜ esaslı üretilen 70 °C’de kürlenmiş geopolimer kompozit numunelerde %20 alkali aktivatör oranına kadar NaOH miktarının artması ile SE değeri artmış daha sonra azalmıştır; Na₂SiO₃ miktarındaki artış SE değerini azaltıcı yönde etki göstermiştir. Öte yandan 100 °C’de kürlenmiş geopolimer kompozit numunelerde %20 alkali aktivatör oranı dahil NaOH ve Na₂SiO₃ miktarının artması SE değerini önce azaltmış, daha sonra alkali aktivatör oranı %25 olduğunda artış eğilimi göstermiştir.
- İUKÜ esaslı üretilen 70 °C’de kürlenmiş geopolimer kompozit numunelerde %20 alkali aktivatör oranı dahil NaOH miktarının artması SE değerini önce azaltmış, daha sonra alkali aktivatör oranı %25 olduğunda artış eğilimi göstermiştir; Na₂SiO₃ miktarındaki artış SE değerini azaltıcı yönde etki göstermiştir. Öte yandan 100 °C’de kürlenmiş geopolimer kompozit numunelerde %15 alkali aktivatör oranından sonra NaOH ve Na₂SiO₃ miktarının artması SE değeri arttırmıştır.

Tip 2 Karışım

- ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı üretilen, 70 ve 100 °C’de kürlenmiş, %20 ve %40 alkali aktivatör oranına sahip geopolimer kompozit numunelerde Na₂SiO₃/NaOH karışım oranı 2 dahil azalma eğilimi gösteren SE değeri, karışım oranı 3 olduğunda artışa geçmiştir.
- 100 °C’de kürlenen geopolimer kompozit numuneler, 70 °C’de kürlenenlere kıyasla daha düşük SE değerine sahiptirler. Benzer şekilde Liu vd., (2014) yüksek sıcaklıkta kürlenmiş geopolimer kompozit numunelerin daha düşük SE değerine sahip olduğundan bahsetmiştir. Porozite, 100 °C kürlenmiş numuneler için SE ile doğru orantılı olarak azalma eğilimi göstermiştir. Düşük kütleme sıcaklığında yüksek porozite değeri bulunmuştur.

Tezde üretilen geopolimer kompozit malzemelerin porozite test verileri dikkate alındığında

Tip 1 Karışım

- ÇUKÜ esaslı üretilen 70 °C’de kürlenmiş geopolimer kompozit numunelerde %20 alkali aktivatör oranına kadar NaOH miktarının artması ile porozite değeri artmış daha sonra azalmıştır; Na_2SiO_3 miktarındaki artış porozite değerini azaltıcı yönde etki göstermiştir. Öte yandan 100 °C’de ise kürlenmiş geopolimer kompozit numunelerde ise NaOH miktarının artması porozite değerini azaltıcı yönde etki göstermiştir; Na_2SiO_3 katkılı numunelerde %20 oranına kadar porozite azalmış, daha sonra artmıştır.
- İUKÜ esaslı üretilen 70 °C’de kürlenmiş geopolimer kompozit numunelerde %20 alkali aktivatör oranına kadar NaOH miktarının artması ile porozite değeri azalmış daha sonra artmıştır; Na_2SiO_3 miktarındaki artış porozite değerini azaltıcı yönde etki göstermiştir. Öte yandan 100 °C’de kürlenmiş geopolimer kompozit numunelerde ise %15 alkali aktivatör oranından sonra porozite değerleri, NaOH ve Na_2SiO_3 miktarının artmasına bağlı olarak artmıştır.

Tip 2 Karışım

- ÇUKÜ ve İUKÜ esaslı üretilen 100 ve 70 °C’de kürlenmiş %20 ve %40 alkali aktivatör oranına sahip geopolimer kompozit numunelerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ karışım oranı 2 dahil azalma eğilimi gösteren porozite değeri, bu orandan sonra artışa geçmiştir.

Sanayide hammadde-proses-ürün üç ayağı söz konusudur ve çoğu endüstri kuruluşunda atık oluşumu kaçınılmaz bir sonuçtur (Doğan-Sağlamtimur vd., 2016). Endüstriyel ekoloji kavramı içerisinde bu atıkların kullanım alanlarının geliştirilmesi gereklidir. Çevre teknolojisi açısından atığın başka bir ürüne dönüştürülmesi, atık yönetim hiyerarşisi piramidinde “yeniden kullanım (reuse)” olarak adlandırılan bir dönüşüm sürecidir. Dünya’da ve Türkiye’de endüstriyel/sektörel atıkların değerlendirilmesi durumunda sera gazı emisyonu azaltımı, daha ekonomik malzeme üretilmesi, atıkların

yeniden kullanımıyla ülke ekonomisine katkı sağlanmasının yanı sıra hem doğal hammadde ile ekolojik dengenin korunması hem de çevre kirliliğinin önlenmesi mümkün görünmektedir. Atıkların ekonomi için bir kaynağa dönüştürülmesi ve hammadde olarak işleyiş bulması, hem Dünya'da hem de ülkemizde ilerleyen zamanlarda öncelikli bir politika hedefi olarak benimsenmiş, sürdürülebilir çevre ve kalkınma açısından bir gereklilik teşkil etmiştir (Chandra ve Berntsson, 2002). Geopolimer malzemelerin yaşam döngüsü analizi incelendiğinde, malzeme üretimi ile ilgili tüm endüstriyel prosesler göz önünde bulundurulurken kullanım aşamaları (beşikten mezara), değerlendirilmesi (geri dönüşüm, yeniden kullanım, düzenli depolama, vb.) ve kaynak tüketimi (enerji tüketimi ve hava, su, toprak emisyonları) incelendiğinde bu malzemelerin karbon ayak izini azaltıcı yönde katkı sağladığı belirtilmiştir (Erdoğan, 2014).

Bu yüksek lisans tez çalışmada üretilen kabul edilebilir bir dayanıma sahip (BDA, EDA) geopolimerlerin, tuğla bloklar, kaldırım taşı gibi inşaat sektöründe ve ayrıca prefabrik malzemelerde de kullanılabileceği sonucuna varılabilir. Geopolimer üretimi, UKÜ'yü sadece alkali aktivatörler ile bağlayıcı olarak kullanma fırsatı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda UKÜ'nün bertaraf sorunlarından kaçınarak çevresel olarak sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunur.

KAYNAKLAR

A' lvarez-Ayuso , E., Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Morenoa, N., Izquierdo, M. Font, O., Morenoa, T., Diez, S., V'azquez, E. and Barra, M., "Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion fly ashes", *Journal of Hazardous Materials* 154 (1-3), 175–183, 2008.

ACI Committee 226, Use of Fly Ash in Concrete, *ACI Materials Journal* 84 (5), 381-409, 1987.

Ahmaruzzaman, M., "A review on the utilization of fly ash", *Progress in Energy and Combustion Science* 36, 327-363, 2010.

Akova, İ., "Yenilenebilir enerji kaynakları", *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 2008.

Alataş, T., Afşin elbistan termik santrali uçucu külünün yol stabilizasyonunda çeşitli maddelerle birlikte kullanımı üzerine bir araştırma, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, s. 146, 1996.

Alkaya, D., "Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanılmasının incelenmesi", *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi* 5 (1), 61-72, 2009.

Andini, S., Cioffi, R., Colangelo, F., Grieco, T., Montagnaro, F. and Santoro, L., "Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products" *Waste Management* 28, 416–423, 2008.

Anuk, O., Cem I 42.5 Çimentolu Düşük Dozajlı Betonlarda F Tipi Uçucu Külün Etkinliği, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mayıs 2004.

Arıöz , E., Geopolimer elde edilmesi ve katyon, ph ve ısıt işlemin geopolimer üzerine etkisi, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2015.

Aruntaş H.Y., “Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* 21 (1), 193-203, 2006.

ASTM C348, Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars, *Annual book of ASTM standards*, USA, 2014.

ASTM C349, Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure), *Annual book of ASTM standards*, USA, 2014.

ASTM C618, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete, *Annual book of ASTM standards*, USA, 2000.

ASTM C642, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, *Annual book of ASTM standards*, USA, 2013.

Atakay, O., Uçucu küllerin katkılı çimento katkılı çimento üretiminde kullanılması–tane inceliği ve katkı miktarının etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2006.

Aydın T. ve Pehlivanlı, Z.O., “Jeopolimer esaslı gözenekli hafif yapı malzemelerinin geliştirilmesi”, *Mühendislik Dergisi* 8 (1), 227-236, 2017.

Aytekin, S., Uçucu küllerinin killi zeminlerin ıslahında kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 2009.

Bakharev, T., “Geopolymeric materials prepared using class f fly ash and elevated temperature curing”, *Cement and Concrete Research* 35 (6), 1224-1232, 2005a.

Bakharev, T., “Resistance of geopolymer materials to acid attack”, *Cement and Concrete Research* 35, 658–670, 2005b.

Bakharev, T., “Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions”, **Cement Concrete Research** 35 (6), 1233–1246, 2005c.

Bankowski, P., Zou, L. and Hodges, R., “Reduction of metal leaching in brown coal fly ash using geopolymers”, **J. Hazard. Mater.** 114 (1-3), 59–67, 2004b.

Bankowski, P., Zou, L. and Hodges, R., “Using inorganic polymer to reduce leach rates of metals from brown coal fly ash”, **Minerals Engineering** 17 (2), 159–166, 2004a.

Barbosa, V.F.F. and MacKenzie, K.J.D., “Synthesis and thermal behaviour of potassium sialate geopolymers”, **Materials Letters**. 57, 1477–1482, 2003a.

Barbosa, V.F.F. and MacKenzie, K.J.D., “Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate”, **Materials Research Bulletin** 38 (2), 319-331, 2003b.

Barsoum, M.W, Ganguly, A. and Hug, G., “Microstructural evidence of reconstituted lime stone blocks in the great pyramids of egypt”, **Journal American Ceramic Society** 89(12), 3788-3796, 1989.

Bayazıt, Ö.L., “Application of fly ash in gökçekaya dam and economy”, **Europe Committee on Electric Power, Symposium on the Use of Ash**, A-2, 1970.

Bayazıt, Ö.L., Tunçbilek uçucu küllerinin betonun fiziko–kimyasal ve mekanik özelliklerine etkileri, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara. 1980.

Bellosi, A. and Babini G.N., 2ND International Congress on Ceramics Global Roadmap for Ceramics ICC2 Proceedings, **Institute of Science and Technology for Ceramics**, Italy, 2008.

Berry, E.E and Malhotra, V.M., Fly Ash in Concrete, s. 178, **Energy, Mines and Resources**, Ottawa, 1986.

Binghui, M., Zhu, H., Xuemin, C., Yan, H. and Siyu, G., “Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers”, *Applied Clay Science*, 99, 144–148, 2014.

Chandra, S. and Berntsson, L., “Light weight aggregate concrete, science, technology, and applications”, *Noyes Publications William Adrew Publishing*, Norwich Newyork USA, 2002.

Cheng, T.W. and Chiu, J.P., “Fire-resistant geopolymer produce by granulated blast furnace slag”, *Minerals Engineering* 16 (3), 205–210, 2003.

Criado, M., Palomo A. and Fernandez-Jimenez, A., “Alkali activation of fly ashes, part 1: effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products”, *Fuel*, 84 (16) 2048–2054, 2005.

Çil, İ., “Uçucu küllerin beton yapımında kullanımı” *56. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, s. 216-224, 2003.

Davidovits, J. and Comrie, D.C., “Long term durability of hazardous toxic and nuclear waste disposals” *Geopolymer '88 First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne*, France, s. 125-134, 1988.

Davidovits, J. “Geopolymer chemistry and properties”, *Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer'88*, Compiègne, France, s.25–48, 1–3 June 1988.

Davidovits, J., “Geopolymers: inorganic polymeric new materials”, *Journal of Thermal Analysis* 37 (8) 1633–1656, 1991.

Davidovits, J., *Geopolymer Chemistry and Applications*, Saint Quantin, France, 2008b.

Davidovits, J., *Mineral polymers and methods of making them*, Patent, No: US4349386, 1982.

Davidovits, J., SPE PATEC '79, **Society of Plastic Engineering**, 1979.

Davidovits, J., Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process, Patent, No: US4472199, 1984.

Davidovits, J., They Built The Pyramids, **Institute Geopolymer**, Saint Quentin, France, 2008a.

Davidovits, J., “Properties of geopolymer cements”, **Alkaline Cements and Concretes** 1, 131-149, 1994.

Davidovits, J., La Bible Avait Raison L’archeologie Revele L’existence Des Hebreux Enegypte Seld, **Jean Cyrille GodeFroy**, France, 2005.

Davies, D.R. and Kitchener, J.N., “Massive use of pulverised fuel ash in concrete for the construction of a uk power station”, **Waste Management** 16 (1-3), 169-180, 1996.

Davis, R. E., Carlson, R.W., Kelly, J.W. and Davis, H.E., “Properties Of Cements And Concretes Containing Fly Ash”, **Journal Proceedings** 33 (5), 577-612, 1937.

De Vargas, A.S., Dal Molin, D.C.C., Vilela, A.C.F., Da Silva, F.J., Pavao, B. and Veit, H., “The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers”, **Cement and Concrete Composites** 33 (6), 653–660, 2011.

Doğan, M., “Enerji kullanımının coğrafi çevre üzerindeki etkileri”, **Marmara Coğrafya Dergisi** 23, 36-52, 2011.

Doğan-Sağlamtimur, N., Bilgil, A., Demir, M., Yılmaz, M.L., Polat, S., Özen, E. and Dördü, H., “A Reuse Study from Niğde, Turkey: The Conversion of Industrial Ash to Geopolymer”, **Desalination and Water Treatment** 57, 2604-2615, 2016.

Dunstan, M.R.H., Thomas, M.D.A. and Cripwel, J.B. “Investigation into the long term in-situ performance of high fly ash content concrete used for structural applications”, **Proc. of 4th Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete** (1)1-20, 1992.

Duxon P., Provis J.L., Lukey G.C. ve Van Deventer J.S.J., “The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete”, **Cement and Concrete Research**, 37 (12), 1590-1597, 2007a.

Duxson, P., and Provis, J. L., “The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete”, **Langmuir** 21 (7), 3028-3036, 2005.

Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. and Van Deventer, J.S.J. “Geopolymer technology: the current state of the art”, **Journal of Materials Science** 42 (9) 2917–2933, 2007.

Enders, M., Ellis, M.S. and Dhir, R., “The cao distribution to mineral phases in a high calcium fly ash from eastern germany”, **Cement and Concrete Research** 26 (2), 243-250, 1996.

Erdinç, M., Uçucu Küllü Betonlarda Dayanım ve Klor Geçirimsizliği, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, s. 100, 1995.

Erdoğan S.T., “Are geopolymers environmentally friendly?” **Research and Development**, 32-44, 2014.

Erdoğan, T., Ar, G. ve Koman, K., “Türkiye uçucu külleri (üretim, kullanımla olanakları, sorunlar, öneriler, **E.İ.E. Gn. Dir.**, 82-19, 1982.

Erdoğan, T.Y., “Atık malzemelerin inşaat endüstrisinde kullanımı-uçucu kül ve yüksek fırın curufu”, **Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu**, Ankara, s. 1-8, 18-19 Kasım 1993.

Erşan, H., Uçucu küllerin siltli zeminlerin kayma mukavemeti üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, s. 75, 1996.

Feng, D., Tan, H. and Van Deventer, J.S.J., “Ultrasound enhanced geopolymerisation”, **Journal of Materials Science** 39 (2), 571–580, 2004.

Fernandez-Jimenez, A. and Palomo, A., “Characterisation of fly ashes. potential reactivity as alkaline cements”, **Fuel** 82 (18), 2259–2265. 2003

Ferreira, C., Ribeiro, A. and Ottosen, L., “Possible applications for municipal solid waste fly ash”, **Journal of Hazardous Materials**, 96 (2-3), 201-216, 2003.

Glukhovsky, V.D., Soil Silicates, in Russian, **Gosstroyizdat Publishing**, Kiev, Ukrayna, 1959.

Gorai, B., Jana, R.K. and Premchand., “Characteristic sand utilization of copper slag-a review” **Resources Conservation Recycling** 39 (4), 299-313, 2006.

Gray, M.L., Champagne, K.J., Soong, Y., Killmeyer, R.P., Maroto-Valer, M.M., Andresen, J.M., Ciocco, M.V. and Zandhuis, P.H., “Physical cleaning of high carbon fly ash”, **Fuel Processing Technology** 76 (1), 11–21, 2002.

Gül, R. ve Yıldız, İ. “Uçucu Küllerin inşaat Sektöründe Kullanılması”, **Teknik Bülteni**, 57, 1997.

Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H., Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları, **Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı**, 9-12 Haziran, İzmir, 2005.

Gümüş A., Geopolimer Beton Özelliklerine Termal Kül Prosesinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, **A. K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Afyon, s. 68, 2016.

Gürbüz, E., C tipi uçucu küllerin etkinliği, Yüksek Lisans Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 2009.

Ha, T.H., Muralidharan, S., Bae, J.H., Ha, Y.C., Lee, H.G., Park, K.W. and Kim, D.K., “Effect of unburnt carbon on the corrosion performance of fly ash cement mortar”, ***Construction and Building Materials*** 19 (7), 509–515, 2005.

Hardjito, D. and Rangan, B.V., Curtin University of Technology, Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, ***Research GC1 Report-103***, Perth, Australia, 2005.

Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V., “Studies on fly ash based geopolymer concrete”, ***Proceedings of 4th World Congress on Geopolymer***, Saint Quentin, France, s. 133–137, 2005b.

Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, V., “Fly ash-based geopolymer concrete”, ***Australian Journal Structural Engineering*** 6 (1–9), 77-86, 2005a.

Hardjito, D. Wallah, S.E. Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V., “On the development of fly ash-based geopolymer concrete”, ***ACI Materials Journal*** 101 (6), 467-472, 2005c.

Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V., “Fly ash-based geopolymer concrete”, ***Australian Journal Structural Engineering*** 6 (1), 77-86, 2005d.

Haynes, R.J., “Reclamation and revegetation of fly ash disposal sites—challenges and research needs” ***Journal of Environmental Management*** 90 (1), 43-53, 2009.

Hewlett, P., Lea’s Chemistry of Cement and Concrete, 4, Oxford, 1998.

Hubbard, F.H. et al., “Pulverized fly ash for concrete: compositional characterization of united kingdom pfa”, ***Cement and Concrete Research*** 15 (1), 185-198, 1985.

Jala S. and Goyal D., “Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production—a review”, ***Bioresource Technology*** 97 (9), 1136-1147, 2006.

Joshi, R.C. and Nagaraj, T.S., Fly ash utilization for soil stabilization, environmental geotechnics and problematic soils and rocks, **Balkema Rotterdam** 77-93. 1987.

Kaplan, G. ve Gültekin, A.B., “Yapı sektöründe uçucu kül kullanımının çevresel ve toplumsal etkiler açısından incelenmesi”, **International Sustainable Buildings Symposium**, Ankara, Turkey, 2010.

Kefelioğlu, S., “Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanılma İmkanları” **Teknoloji Dergisi**, 1998.

Keyte, L.M., Lukey, G.C. and Van Deventer, J., “The Effect of coal ash composition on properties of waste based geopolymers”, **International Symposium of Research Students on Material Science and Engineering**, Victoria, Australia, s.1-13, 2006.

Khale, D. and Chaudhary, R., “Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review”, **Journal of Materials Science** 42 (3), 729-746, 2007.

Kılıç, R. ve Şimşek, O., “Maden şehri (karaman) doğusundaki ponza taşı ile üretilen hafif beton dayanımına uçucu kül oranının etkisinin incelenmesi”, **Türkiye Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi** 15 (3), 283-295, 1991.

Kim D., “Geopolymer formation and its unique properties” **Environmental Geology** 51 (1), 103-111, 2000.

Koç, Ö., Bor atıkları, uçucu kül ve silis dumanının inşaat tuğlası üretiminde değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, **YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 1997.

Komnitas, K. and Zaharaki, D., “Geopolymerisation: a review and prospects for the minerals industry”, **Minerals Engineering** 20 (14), 1261–1277, 2007.

Komnitsas K.A., “Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities”, **Procedia Engineering** 21, 1023-1032, 2011.

Komnitsas, K. and Zaharaki, D., “Gepolymerisation: a review and prospects for the minerals industry” *Minerals Engineering* 20, 1261-1277, 2007.

Kong, D.L.Y. and Sanjayan, J.G., “Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete”, *Cement and Concrete Research* 40 (2), 334-339, 2010.

Kula, I., Olgun, A., Erdoğan, Y. and Sevinç, V., “Effects of colemanite waste, cool bottom ash, and fly ash on the properties of cement”, *Cement and Concrete Research*, 31 (3), 491-494, 2001.

Kumar, S. and Kumar, R., “Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer”, *Ceramics International* 37 (2), 533–541, 2011.

Lee, W.H., Wang, J.H., Ding, Y.C., Cheng, T.W., “A study on the characteristics and microstructures of GGBS/FA based geopolymer paste and concrete”, *Construction and Building Materials* 211, 807-813, 2019.

Li, Z., Ding, Z. and Zhang, Y., “Development of sustainable cementitious materials”, *Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, 55–76, 2004.

Liu M.Y.J., Alengaram U.J., Jumaat, M.Z. and Mo K.H., “Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete”, *Energy and Buildings* 72, 238-245, 2014.

Manz, O.E., “Coal fly ash: a retrospective and future look”, *Fuel* 78 (2), 133-136, 1999.

Montemor, M.F., Simoes, A.M. and Salta, M.M., “Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by eis”, *Cement&Concrete Composites* 22 (3), 175-185, 2000.

Morrison, R.E., “A review of ash specifications” *Symposium on Fly Ash Utilization*, Pittsburgh, Ovens. P.L, s. 24-31, 1970.

Neville, A.M., Properties of concrete, *Longman Scientific & Technical*, New York, 1981.

Öksüz, K., Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 2006.

Özcan, M., Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Katsayısının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1997.

Özel, İ., “Utilization of fly ash in the production of mass concretes used in the construction of porsuk dam in turkey”, *Europe Committee on Electric Power, Symposium on the Use of Ash*, A-5, 1970.

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. and Jalali, S., “Alkali-activated binders: a review: part 1. historical background, terminology, reaction mechanism sand hydration products” *Construction and Building Materials*, 22, 1305–1314, 2008.

Palomo, A. Grutzeck, M.W. and Blanco-Varela, M.T., “Alkali activated fly ashes: a cement for the future”, *Cement Concrete Research* 29 (8), 1323–1329, 1999.

Palomo, A., Blanco-Varela, M.T., Granizo, M.L., Puertas, F., V’azquez, T. and Grutzeck, M.W., “Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin”, *Cement and Concrete Research* 29 (2), 997–1004, 1999.

Panias, D., Giannopoulou, I.P. and Perraki, T., “Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers”, *Colloids Surf. A: Physiochem. Eng. Aspects* 301 (1), 246-254, 2007.

Postacıoğlu, B., Beton-Bağlayıcı Maddeler, 1, *Teknik Kitaplar Yayınevi*, İstanbul, 1986.

Puri, A. Badanoiu, A. and Voicu, G., “Eco-friendly binders based on fly ash”, **Revue Roumaine Chimie** 53 (11), 1069–1076, 2008.

Rangan, B.V., Curtin University of Technology, Fly ash-based geopolymer concrete, **Research Report GC4-44**, Perth, Australia, 2008.

Rayzman, V.L., Shcherban, S.A. and Dworkin, R.S., “Technology for chemical-metallurgical coal ash utilization”, **Energy & Fuels**, 11 (4), 761-773, 1997.

Rebeiz, K.S. and Mielich, K.L., “Construction Use of Municipal-Solid-Waste Ash”, **Journal of Energy Engineering-ASCE** 121 (1), 2-13, 1995.

Roy, D.M., “Alkali-activated cements: opportunities and challenges”, **Cement and Concrete Research** 29 (2), 249–254, 1999.

Sanjayan, J.G. and Stocks, L.J., “Spalling of high-strength silica fume concrete in fire”, **ACI Materials Journal** 90 (2), 170–173, 1993.

Seals, R.K., “Properties of bottom ash/boiler slag and fly ash, technology and utilization of power plant ash”, **Short Course**, 59, 1977.

Sevim, U.K., Afşin – Elbistan Uçucu Külünün Beton Ve Çimento Katkısı Olarak Kullanılabilirliğinin Çimento Hamuru Ve Harçlarının Üzerinde Yapılacak Deneylerle Araştırılması, Doktora Tezi, **Ç. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana, 2003.

Skvara, F. and Bohunek, J., “Chemical activation of substances with latent hydraulic properties”, **Ceramicks Silikaty** 43 (3), 111–116, 1999.

Söylemez, M. ve Yıldırım, A., “Termik Santral Uçucu Külünün Tuğla Dayanımına Etkisi” **Mühendislik Bilimleri Dergisi** 4, 19-31, 2016.

Swamy, R.N. and Lambert, G.H., “Flexural behaviour of reinforced concrete beams made with fly ash coarse aggregates”, **Int. Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete** 6 (3), 189-200, 1984.

Swanepoel, J.C. and Strydom, C.A., “Utilisation of fly ash in a geopolymeric material”, *Applied Geochemistry* 17 (8), 1143–1148, 2002.

Şahmaran, M. and Yaman, İ.Ö., “Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash”, *Construction and Building Materials*, 21 (1), 150-156, 2005.

Şimşek, O., Aruntaş, H.Y. ve Eroltekin, V., “Uçucu külün hafif beton yapı elemanı üretiminde kullanımı ve mekanik özelliklerine etkisi”, *Z.K.Ü. Teknoloji Dergisi* 2 (3-4), 15-23, 1999.

Şimşek, O., Aruntaş, H.Y. ve Fırat, S., “Çayırhan ve soma-b termik santralleri uçucu küllerinin betonun basınç dayanımına etkisi”, *Türkiye İnş. Müh. XVI. Teknik Kongresi*, Ankara, 1-3 Kasım 2001.

Temuujin, J. and Van Riessen, A., “Effect of fly ash preliminary calcination on the properties of geopolymer”, *Journal of Hazardous Materials* 164 (2-3), 634–639, 2009.

Temuujin, J., Williams, R.P. and Van Riessen, A., “Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature”, *Journal of Materials Processing Technology* 209 (12–13), 5276-5280, 2009.

Thomas, S., Hossein, R., İsa, L. and Anamolah, Samadi., fly ash cementitious material and method of making a product, US Patent No: 5601643, 1997.

Tokay, M. ve Erdoğan, K., “Türkiye termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin karakterizasyonu”, *TÇMB*, 1998.

Tokay, M., “Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi)”, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu*, Ankara, 29-30, 18-19 Kasım 1993.

Tokay, M., “Betonda uk, gyfc ve sd’nin rolü: mevcut bilgi birikimi” *Hazır Beton Kongresi*, ODTÜ, s.64-84, 2014.

Toktay, M., Effect of a High-Calcium and a Low-Calcium Fly Ash on the Properties of Portland Cement-Fly Ash Pastes and Mortars, PhD Thesis, **METU**, Ankara, 1987.

Topçu, İ.B. ve Canbaz, M., “Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri”, **Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi** 14 (2), 2001.

Toros, H., Afşin elbistan termik santrali uçucu küllerinin yapı malzemesi olarak kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, s. 117, 1987.

Torunoğlu Gedik, Ö., Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları ve çevresel etkileri, Yüksek Lisans Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, s. 16-17, 2015.

TS EN 450, Uçucu kül-betonda kullanılan tarifler, bölüm 1: Özellikler ve kalite kontrolü, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 1998.

TS EN 933-10, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 10: İnce tanelerin tayini - İnce dolgu malzemelerinin tane büyüklüğüne göre sınıflandırılması (hava jetiyle eleme), **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2010.

TSE EN 196-1, Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength, **Turkish Standards Institution**, Ankara, 2009.

Turner, L.K. and Collins, F.G., “Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymers and OPC cement concrete”, **Construction and Building Materials** 43, 125-130, 2013.

Türker P., Erdoğan B., Katnas, F. ve Yeğinoğlu, A., Türkiye’deki uçucu Küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, **Fersa Matbaacılık**, Ankara, 2009.

Tütünlülü, F. ve Atalay, Ü., “Utilization of fly ash in manufacturing of building bricks”, **International Ash Utilization Symposium**, USA, 2001.

URL 1, 2016 yılı faaliyet raporu, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü, <https://www.teias.gov.tr/sites/default/files/201806/2016%20TE%C4%B0A%C5%9E%20Faaliyet%20Raporu.pdf>, 2016.

URL 10, Zor, M., “Kompozit malzemelerle ilgili genel bilgiler, kompozit malzeme mekaniği-Ders Notları” http://kisi.deu.edu.tr/mehmet.zor/composite%20materials/2-Genel_bilgiler.pdf, 2018.

URL 11, Alternatif yapı malzemeleri: Geopolimerler <http://kisi.deu.edu.tr/burak.feleglu/08.geopolimer.pdf>, 2019.

URL 2, “Türkiye seragazi emisyon istatistiklerinden ne anlamalıyız ?”, İklim Haber, <https://www.iklimhaber.org/turkiye-seragazi-emisyon-istatistiklerinden-ne-anlamaliyiz/>, 2017.

URL 3, Duman, İ., Şahin, G., Bolluk, M., “Konya-karapınar kapalı havzası” Termik Santral Etkileri Uzman Raporu, <http://www.tema.org.tr/folders/14966/categorial1docs/97/TERMIK%20SANTRAL%20RAPOR%20A5%20BASKI.pdf>, Kasım 2013.

URL 4, “Termik santral su, atık su ve atık istatistikleri 2010”, Tüik Basın Bülteni, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=10732>, 2012.

URL 5, “Production and utilisation of ccps in 2008 in europe”, http://www.ecoba.com/evjm,media/ccps/Ecoba_Stat_2008_EU15.pdf, 25 Ekim 2011.

URL 6, “Coal combustion products production & use statistics”, ACAA, http://www.acaausea.org/associations/8003/files/2009_Production_and_Use_Survey_Go_ss_FINAL_110310.pdf, 25 Ekim 2011.

URL 7, “Kömür ve Linyit yakıtlı termik santraller, Enerji Atlası”, <https://www.enerjiatlasi.com/komur/>, 2017.

URL 8, Turkish statistical institute, <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=kategorist>, 2008.

URL 9, Zor, M., “Kompozit Malzemelerle İlgili Genel Bilgiler, Kompozit Malzeme Mekaniği - Ders Notları”, http://kisi.deu.edu.tr/mehmet.zor/composite%20materials/2-Genel_bilgiler.pdf, 2018.

URL9, Kocadereli, M., “Santral Küllerinin Değerlendirilmesi” **ETİBANK**, UDK: 621.311-2. http://www.emo.org.tr/ekler/93bc52a941b3951_ek.pdf?dergi=392, 1960.

Uysal, F., “Geotechnical properties of the fly- ashes produced in to thermal plants in turkey”, **M.E.T.U. Inst. of Natural and Applied Sciences**, Ankara, 1987.

Ümit, Ş., “Uçucu Kül ve Çevresel Etkileri”, **AKÜ Fen Bilimleri Dergisi** 7 (1), 89-104, 2007.

Ünal, O. ve Uygunoglu, T., “Soma termik santral atığı uçucu külün inşaat sektöründe değerlendirilmesi”, **Türkiye 14 Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı**, Zonguldak, Türkiye, 02-04 Haziran 2004.

Üstün N., Uçucu küllerin peletlenmesi: çinko (II), bakır (I) ve krom (III) adsorpsiyonunda kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, **Y. T. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 2006.

Valenti, G.L., Cioffi, R. and Sersale, R., “production and utilization of fly ash in italy”, **ACI** 91 (1), 741-762, 1986.

Van Jaarsveld, J.G.S, Van Deventer, J.S.J. and Lorenzen, L., “Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized fly ash”, **Metallurgical and Materials Transactions** 29 (1), 283–291, 1998.

Van Jaarsveld, J.G.S. and J.S.J. van Deventer, “The effect of metal contaminants on the formation and properties of waste-based geopolymers”, **Cement Concrete Res.** 29 1189–1200, 1999.

Van Jaarsveld, J.G.S, Van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C., “The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers”, *The Chemical Engineering Journal* 89 (1), 63–73, 2002.

Van Jaarsveld, J.G.S, Van Deventer, J.S.J. and Schwartzman, A., “The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: part II. material and leaching characteristics”, *Minerals Engineering* 12 (1), 75–91, 1999.

Van Jaarsveld, J.S.G., Van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C., “The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers”, *Materials Letters* 57 (7), 1272–1280, 2003.

Wang, S., “Application of Solid Ash Based Catalysts in Heterogeneous Catalysis” *Environment Science Technology* 42 (19), 7055-7063, 2008.

Wesche, K., “Fly ash in concrete: properties and performance”, 7. Edition, *E&FN Spon*, London, 1991.

Xu, H. and Van Deventer, J.S.J., “Geopolymerisation of multiple minerals”, *Minerals Engineering* 15 (12), 1131–1139, 2002a.

Xu, H. and Van Deventer, J.S.J., “Microstructural characterisation of geopolymers synthesised from kaolinite/stilbite mixtures using XRD, MAS-NMR, SEM/EDX, TEM/EDX, and HREM”, *Cement Concrete Res.* 32, 1705–1716, 2002b.

Xu, H. and Van Deventer, J.S.J., “The geopolymerisation of alumino-silicate minerals”, *International Journal of Mineral Processing* 59 (3), 247-266, 2000.

Yang, K.H, Song J.K., Ashour A.F. and Lee E.T., “Properties of cementless mortars activated by sodium silicate ” *Construction and Building Materials* 22 (9), 1981-1989, 2007.

Yang, T.R., Chang, T.P., Chen, B.T., and Lin, W.L., “Effect of alkaline solutions on engineering properties of alkali-activated ggbfs paste”, ***Journal of Marine and Science and Technology*** 20 (3), 311-318, 2012.

Yaprak, H. ve Kaplan, G., “Farklı kür koşullarının taban külü katkıli geopolimerlerin termal ve mekanik özelliklerine etkisi” ***TÜBAV Bilim Dergisi*** 9 (3), 41-51, 2016.

Yazıcı, H., Yiğiter, H., Aydın, S. and Baradan, B., “Autoclaved sifcon with high volume class c fly ash binder phase”, ***Cement and Concrete Research*** 36 (7), 481-486, 2006.

Yeşilyurt, E., “Isıl İşlem Görmüş Ham Perlit ile Yeni Nesil Yapı Malzemesi Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, s.127, 2013.

Yılmaz, A. ve Bozkurt Y., “Türkiye’de kentsel katı atık yönetimi uygulamaları ve kütahya katı atık birliği (kükab) örneği”, ***Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*** 15 (1), 11-28, 2010.

ÖZ GEÇMİŞ

Türkan VURAL 01.05.1994 yılında Hatay'ın Erzin ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzin'de tamamladı. Lisans eğitimini 2012-2016 yılları arasında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi'nde tamamladı. Özferhanlar Hurda ve Geri Dönüşüm Tesisleri İthalat İhracat Tic. Ltd. Şti. (Hatay)'de Çevre Mühendis'i olarak görev yaptı. 2016 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitime başladı. Avrupa Birliği (AB) FP7 kapsamında kabul alan 7 ülke katılımlı ELAC2015/T02-0721 nolu projede Türkiye'yi temsil eden TÜBİTAK'ın 116Y549 numaralı “Geopolimer Matrikse Dayalı Atık Lifler ile Güçlendirilmiş Çevre Dostu Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi” başlıklı projesinde proje asistanı olarak 2,5 yıl çalıştı.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet ulusal ve 1 (bir) adet uluslararası makale, 1 (bir) adet ulusal ve 3 (üç) adet uluslararası bildiri üretilmiştir. Bu üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Doğan-Sağlamtimur, N., Bilgil, A., Çalışkan, Ö., Aykanat, T., Vural, T. ve Yolcu, F. “Ömrünü Tamamlamış Lastik ve Polietilen Tereftalat (PET) Şişe Atıklarının Pirolizinin Tasarlanan Yeni Bir Reaktörde Kıyaslanması”, **Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 6, 1, 21-27, ISSN: 2147-012X, 2017.

Doğan-Sağlamtimur, N., Bilgil, A., Öz, H.Ö., Vural, T. ve Köker, T.Ş. “Atık Kül Katkılı Geopolimer Yapı Malzemesi Üretiminde Sodyum Hidroksit Kullanımı”, **Ulusal Çevre, Deniz ve Kıyı Kirliliği Sempozyumu (UCEDKKS-2017)**, SB19, Gemlik/Bursa, 10-12 Ekim 2017.

Doğan-Sağlamtimur, N., H.Ö. Öz, A. Bilgil, T. Vural and E. Süzgeç, “The Effect of Alkali Activation Solutions with Different Water Glass/NaOH Solution Ratios on Geopolymer Composite Materials”, **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, in press.

Doğan-Sağlamtimur, N., Öz, H.Ö., Bilgil, A., Süzgeç, E. and Vural, T. “Production of Fly Ash-Based Geopolymer Composite Materials by using Different Design Parameters”, **1st International Conference on Environment, Technology and Management (ICETEM)**, Abstract Book, pp. 243, Niğde, Turkey, 27-29 June 2019.

Doğan-Sağlamtimur, N., Öz, H.Ö., Bilgil, A., Vural, T. and Süzgeç, E. “The Effect of Different Alkaline Ratios on Geopolymer Composite Materials”, **4th International Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies” (IMST 2019)**, Proceeding Book. Riga, Latvia, 25-27 September 2019 (Accepted as oral presentation, in press).

Öz, H.Ö., Doğan-Sağlamtimur, N., Bilgil, A., Köker, T. and Vural, T. “Production of Geopolymer Composite Materials with Sodium Silicate Activator by using Fly Ash”, ***Book of Abstracts of the Seventh International Conference on Advanced Materials and Structures-AMS’18)***”, Timișoara, Romania, pp. 15, 28-31 March 2018.



